Préambule: Comprendre la formation des montagnes et du paysage

1. Formation des montagnes et ouverture des océans: géologie structurale et thermochronologie

Avant les bancs de l'université, mon parcours de chercheur a débuté dans les montagnes et les plaines, à lire le paysage, ramasser des fossiles et chercher à comprendre comment changent les habitats et les reliefs.

Mes premiers travaux de recherche ont eu lieu à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris), alors que j'étais en dernière année de licence à l'École Normale Supérieure. J'ai étudié la structure thermique du massif du Mont Blanc en couplant campagnes d'échantillonnage, analyses par spectroscopie Raman et datations de zircons. J'ai ainsi contribué à reconstituer la **cinématique des massifs cristallins externes lors de l'orogenèse alpine**.

Boutoux et al., (2016) - coauteur; Girault et al., (2020) - coauteur

J'ai ensuite étudié, lors d'un séjour de recherche de master à l'Université de Hong Kong, l'initiation de l'ouverture de la Mer de Chine entre l'Éocène et l'Oligocène. À travers une analyse de géologie structurale que j'ai réalisée grâce à une cartographie fine sur le terrain, la préparation d'échantillons de roches et une analyse thermochronologique, j'ai reconstruit l'**histoire polyphasique de l'inversion de la marge continentale de la Mer de Chine**. En particulier, j'ai montré comment des structures compressives d'une orogène antérieure ont permis de localiser l'extension en proposant un modèle conceptuel qui est aujourd'hui appliqué dans d'autres contextes.

***Nanni** et al., (2017), Journal of Asian Earth Sciences*
Bourse de mobilité internationale obtenue: ~ 5 000 €

2. Érosion glaciaire: thermochronologie et modélisation

Bien que passionné par l'évolution des montagnes et des océans, les temps impliqués me semblaient trop loin des enjeux sociétaux présents. J'ai cherché un objet d'étude pour lier mon envie d'exploration et de compréhension des milieux non-humains à celle de contribuer aux enjeux associés au changement climatique anthropogénique.

J'ai commencé par aborder les glaciers comme objet géomorphologique, lors d'un séjour de recherche à l'Université de Lausanne. Afin d'étudier l**'érosion glaciaire Quaternaire dans les Andes**, j'ai participé au développement d'une méthode de thermochronologie basse température par luminescence stimulée optiquement (OSL) en combinant une pratique de laboratoire et le développement de modèles numériques permettant d'interpréter les signaux de luminescence en termes d'histoires thermiques. Cette méthode est aujourd'hui arrivée à maturité et nous venons de mettre à disposition des bibliothèques de codes pour l'application à d'autres contextes géomorphologiques.

Bouscary et al., (minor revisions) - coauteur; Codes en libre accès: https://github.com/GeorginaKing/OSLThermo
Co-convener du workshop de géomorphologie Steepest Descent de l'European Geosciences Union - 2017, 2019, 2020

Grâce à ces premiers pas en glaciologie, j'ai découvert un champ de recherche dans lequel j'allais évoluer jusqu'à aujourd'hui. Dans cette constante volonté d'ancrer ma recherche autour des enjeux présents, je me suis orienté vers la réponse des glaciers à l'augmentation des températures.

Chapitre 1: Comprendre la réponse des glaciers à la fonte de surface

Les glaciers sont une des cinq composantes de la *Cryosphère*, qui regroupe l'ensemble des composantes de la surface terrestre où l'eau est sous forme solide, avec la banquise, le pergélisol, la neige et les calottes. Dans les hautes altitudes ou les hautes latitudes, si la neige ne fond pas d'une année sur l'autre, alors elle se compacte pour former un névé, puis de la glace. Lorsqu'elle devient suffisamment épaisse, cette glace se déforme sous son propre poids, et ainsi naît un glacier. Cette **déformation** dépend de l'épaisseur du glacier, de sa température et de sa pente. Lors de son écoulement vers des altitude plus basses, la surface du glacier peut commencer à fondre. C'est l'équilibre entre la zone où le glacier gagne de la masse grâce à l'accumulation de la neige (zone d'accumulation), et la zone où le glacier perd de la masse à cause de la fonte (zone d'ablation) qui détermine le bilan de santé d'un glacier (**bilan de masse**). Ce bilan est mesuré par une combinaison de mesures de terrains et mesures satellitaires, et est réalisé aujourd'hui de l'échelle locale à l'échelle globale.

L'eau formée à la surface du glacier lors de la fonte peut percoler à travers le réseau hydrologique intra-glaciaires jusqu'à la base du glacier là où il repose sur de la roche ou du sédiment. Des centaines de mètres sous la surface, l'eau joue un rôle clé car elle peut influencer le **glissement du glacier** en lubrifiant sa base. Cependant, la réponse des glaciers à l'eau de fonte n'est pas unique, ce qui est compte est la pression de l'eau. Cette pression dépend de la configuration du **réseau hydrologique sous glaciaire**. Un réseau distribué et inefficace a tendance à favoriser des fortes pressions d'eau même pour des faibles quantités et donc à favoriser le glissement du glacier. Un réseau localisé et efficace a tendance à évacuer efficacement l'eau et à favoriser une faible pression d'eau. Une augmentation de la fonte de surface peut donc causer une accélération ou un ralentissement du glacier**.**

*Plus de détails dans mon manuscrit de thèse de doctorat: **Nanni** (2020)*

1. Réponse(s) saisonnières des glaciers à la fonte: observations satellitaires et modélisation

Lors des débuts de mon parcours, la compréhension de la physique de l'hydrologie sous-glaciaire était **limitée et incertaine**. Afin d'étudier les processus contrôlant la réponse des glaciers à la fonte, la plupart des approches reposaient sur l'observation indirecte ou la modélisation. C'est ainsi que j'ai abordé cette thématique. J'ai initié en 2016, lors d'un séjour de recherche au Californian Institute of Technology, une étude visant à caractériser la **réponse des glaciers du Pamir occidental à la fonte saisonnière à partir de données satellitaires**. J'ai poursuivi ce travail sur plusieurs années, avant de le finaliser dans le cadre d'une collaboration avec le GFZ (Helmholtz-Zentrum für Geoforschung, Allemagne) et le JPL (Jet Propulsion Lab, Los Angeles).

J'ai développé un protocole fondé sur la corrélation d'images optiques afin de pouvoir étudier les variations de vitesse de la surface des glaciers à des échelles infra-mensuelles sur l'ensemble du massif du Pamir. En tirant profit de la redondance des images satellitaires, en réduisant le bruit associé aux mesures de déplacement et en utilisant des filtres contraints par la physique de l'écoulement glaciaire, et non uniquement par des critères statistiques, j'ai pu extraire des champs de vitesse sur des intervalles de temps courts, de l'ordre de 10 jours et avec une résolution de 30 m. Les séries temporelles ainsi obtenues ont permis de **révéler les variations saisonnières des glaciers de montagne à l'échelle d'un massif pour la première fois**. Au printemps et en été, j'ai pu observer que les glaciers montrent des accélérations pouvant atteindre 300 % par rapport aux vitesses hivernales. Ces accélérations migrent progressivement vers l'amont au cours de la saison de fonte, une signature que j'ai interprétée comme la mise en place et l'évolution d'un **système hydrologique sous-glaciaire** de plus en plus efficace. En automne, j'ai mis en évidence des épisodes d'accélération jusqu'alors rarement observés, causés par des vidanges de lacs glaciaires.

***Nanni** et al., (2023), The Cryosphere; 1 présentation orale et 1 poster*
Codes en libre accès: https://doi.org/10.5281/zenodo.7149214
Bourse de mobilité internationale obtenue: ~ 3 000 €

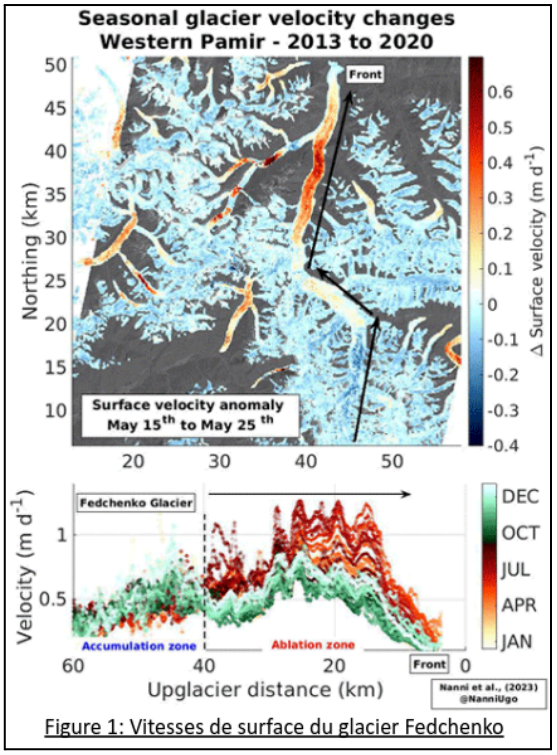


Figure 1: Vitesses de surface du glacier Fedchenko

En complément de cette initiation, j'ai souhaité comprendre comment fonctionne la modélisation des glaciers. J'ai ainsi intégré le Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement lors de ma thèse de master.

J'ai contribué au développement d'un **couplage entre deux modèles numériques**, l'un servant à modéliser l'écoulement de la glace en 3D en résolvant les équations de Stokes et l'autre à modéliser l'évolution du réseau hydrologique sous glaciaire. Ce travail a nécessité du développement numérique et une compréhension des processus physiques en jeu, afin d'identifier les **mécanismes déterminants pour le glissement basal du glacier**. Ces travaux sont les premiers essais de couplage dans un cas réel et s'inscrivent dans une réflexion collective sur la modélisation de l'hydrologie sous-glaciaire, notamment à travers l'inter comparaison des modèles.

De Fleurian et al., (2018) - contribution aux travaux préliminaires; 1 poster

2. Réponse(s) saisonnières des glaciers à la fonte: observer les processus par la sismologie

Suite à mes premières expériences de recherche, j'avais saisi qu'un des enjeux pour comprendre la réponse des glaciers aux changements climatiques résidait dans la compréhension de l'hydrologie sous glaciaire. La caractérisation des processus en jeu, et donc leur représentation, était difficile en raison de l'inaccessibilité et l'hétérogénéité de l'environnement sous-glaciaire. C'est dans la perspective de lever ce verrou que j'ai obtenu une bourse ministérielle (~ *100 000€*) pour réaliser une **thèse de doctorat** à l'Institut des Géosciences de l'Environnement sous la direction de C. Vincent, figure de la glaciologie française, et la co-direction de F. Gimbert, alors jeune recrue au CNRS sur la mécanique des écoulements multiphasiques, dont j'étais le premier étudiant en thèse. Cette combinaison d'encadrement m'a permis d'ancrer ma recherche tant autour des enjeux thématiques que méthodologiques autour de l'utilisation de la sismologie environnementale et la **cryosismologie**.

La *cryosismologie*, sismologie de la cryosphère, s'inscrit dans la mouvance transdisciplinaire de la sismologie environnementale, naît autour des années 2010s. Ce champ couvre l'étude par la sismologie des processus de la surface et la subsurface (biosphère, hydrosphère, cryosphère, anthroposphere) et a la particularité de ne pas s'intéresser uniquement aux événement de types impulsif, comme les séismes, mais aussi à la composante du signal qui était traditionnellement nommée bruit sismique. Dans un glacier, plusieurs processus génèrent des signaux sismiques, qu'ils soient de types *impulsifs* (ouverture de crevasses, vêlage d'iceberg) ou bien de type *bruit* (écoulement turbulent d'eau, frottement du glacier sur la roche). Dans le cas de l'hydrologie sous-glaciaire, les turbulences dans les écoulements d'eau génèrent des forces de frictions qui agissent sur les parois des conduits sous-glaciaires et génèrent ainsi des ondes sismiques avec des fréquences caractéristiques entre 1 et 100 Hz.

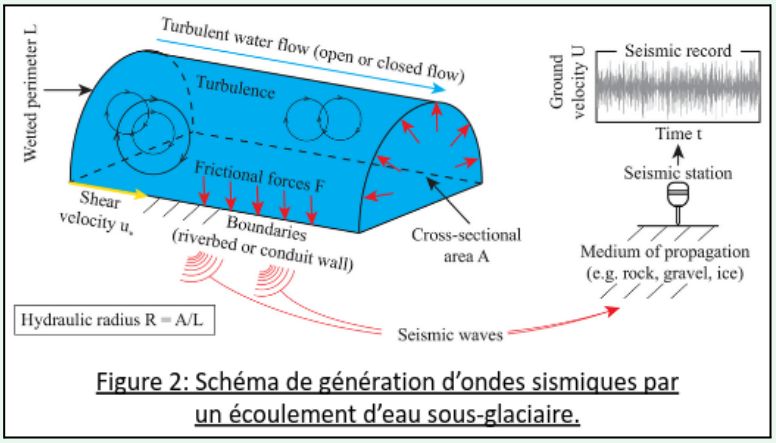


Figure 2: Schéma de génération d'ondes sismiques par un écoulement d'eau sous-glaciaire.

*Plus de détails dans mon manuscrit de thèse de doctorat: **Nanni** (2020)*
Co-convener de la session Environmental Seismology de l'European Geosciences Union - 2022
La cryosismologie sur France Culture dans La série Documentaire, sous le glacier d'Argentière

2.1. Évolution temporelle: première partie du doctorat

Le premier enjeu de mon travail de thèse a été d'étudier l'évolution des propriétés hydrauliques du réseau hydrologique sous-glaciaire, à de multiples échelles de temps (sub-diurne à saisonnière). Pour conduire cette recherche, j'ai travaillé sur le glacier d'Argentière, dans le massif du Mont Blanc (France). Ce glacier est sert tant de glacier témoin que de glacier laboratoire pour développer des nouvelles approches méthodologiques. Ces travaux se sont inscrits en lien avec le service d'observation national des glaciers GLACIOCLIM et dans le projet ANR-SAUSSURE qui combine observations et modélisations afin de mieux comprendre le glissement des glaciers.

J'ai caractérisé la **signature fréquentielle des signaux générés par les écoulements d'eau dans le réseau sous-glaciaire** dans la bande [3-7] Hz, en analysant le signal sismique enregistré à la surface du glacier par des stations que j'ai maintenues pendant plusieurs années. J'ai développé une approche pour différencier ces signaux d'autres types de sources. Cela m'a permis de tester, valider et adapter un modèle théorique et quantifier l'évolution des **propriétés hydrauliques de réseau hydrologique sous-glaciaire** (gradients de pression et rayons hydrauliques) et leur contrôle sur le glissement du glacier pendant deux saisons de fontes, sur une gamme de débits entre 0.25 et 15 m^3/sec. J'ai montré que l'accélération du glacier en début de saison est liée à une mise en pression du réseau sous-glaciaire qui opère à faible capacité et ne peut accommoder toute l'eau. J'ai ensuite quantifié l'accommodation de ce réseau par l'ouverture de conduits à la base du glacier par la fonte.

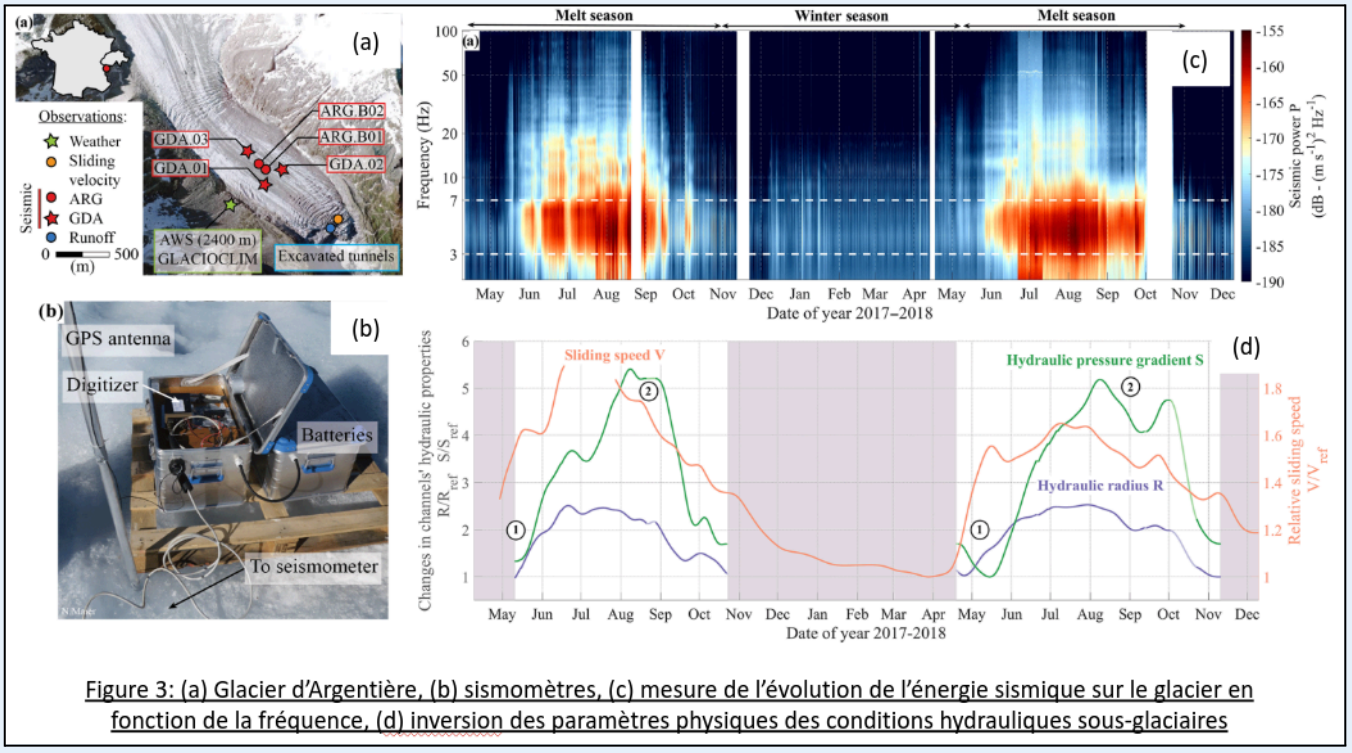


Figure 3: (a) Glacier d'Argentière, (b) sismomètres, (c) mesure de l'évolution de l'énergie sismique sur le glacier en fonction de la fréquence, (d) inversion des paramètres physiques des conditions hydrauliques sous-glaciaires

***Nanni** et al., (2020), The Cryosphere; 2 présentation orales et 1 poster; Vincent et al., (2021) - coauteur*
Codes en libre accès: https://zenodo.org/records/3731508
Contribution à une bande dessinée, un jeu vidéo, un article de vulgarisation et de nombreuses conférences

Cette étude a posé des jalons de la cryosismologie pour l'étude de la dynamique des propriétés du réseau hydrologique sous-glaciaire, une approche aujourd'hui appliquée dans de nombreux contextes. Mes analyses ont permis de faire avancer les modélisations physiques du contrôle de l'hydrologie sur la dynamique des glaciers.

2.2. Évolution spatiale: deuxième partie du doctorat

Pour étudier la période où le réseau sous-glaciaire transitionne d'un système qui favorise l'accélération du glacier a une configuration qui favorise son ralentissement, nous avons installé **100 capteurs sismiques** sur le glacier.

Ce travail s'inscrit au sein de RESOLVE (financement IDEX), un projet collaboratif sur l'imagerie à haute résolution de la subsurface à travers le développement d'une plateforme multi instrumentale et l'inversion jointe d'observables multi physiques. En liant les services d'observations nationaux RESIF (Réseau sismologique et géodésique français) et OMIV (Observatoire Multidisciplinaire des Instabilités de Versants), RESOLVE a permis la première installation d'un réseau sismologique dense sur un glacier. J'ai étudié le réseau hydrologique sous-glaciaire, mais aussi le développement des crevasses et leur influence sur la structure du glacier en associant la cryosismologie à un éventail d'observations (radar, drones, GNSS, mesures de débits). J'ai co-coordonné les campagnes de terrain et les stratégies de recherche de ces projets avec mon co-directeur de thèse et P. Roux, alors à l'Institut des Sciences de la Terre (ISTerre, Grenoble).

*Gimbert, **Nanni** et al., (2020), Seismological Research Letters; 1 poster*
Contribution à un documentaire CNRS Image et accompagnement de la diffusion lors de festivals et avec des scolaires

Les signaux sismiques générés par l'hydrologie sous-glaciaire ne contiennent pas des temps d'arrivée clairs ou des formes d'ondes facilement identifiables comme pour les séismes. Ces sources sont distribuées dans l'espace et variable dans le temps, rendant les méthodes classiques de localisation de signaux sismiques inopérantes.

J'ai développé un protocole basé sur l'analyse de la **cohérence spatiale du champ de phase** du signal sismique. Au lieu de chercher l'écart minimum global entre observation et modèle par une approche de recherche en grille, j'ai utilisé un algorithme de minimisation qui permet d'obtenir des minima locaux et étudier ainsi de très faibles cohérences spatiales dans le champ de phase, ce qui permet d'être sensible à des sources distribuées de bruit sismiques. Grâce à cette approche j'ai cartographié pour la première fois l'**évolution au jour le jour du réseau hydrologique sous glaciaire lors de sa transition** entre un système inefficace à un système efficace.

J'ai ainsi apporté une preuve directe qu'en début de saison, l'eau qui pénètre sous le glacier se distribue sur l'ensemble de l'interface glace-roche, réduisant ainsi la friction basale sur une grande zone et promouvant le glissement du glacier. Ce sont ces régions à faible conductivité hydraulique qui contrôlent la réponse des glaciers sur le court terme et le long terme. J'ai montré qu'il fallait quelques jours pour que des conduits efficaces se forment en fondant la glace, permettant une localisation du drainage et une réduction de la pression d'eau sous glaciaire, limitant ainsi le glissement du glacier.

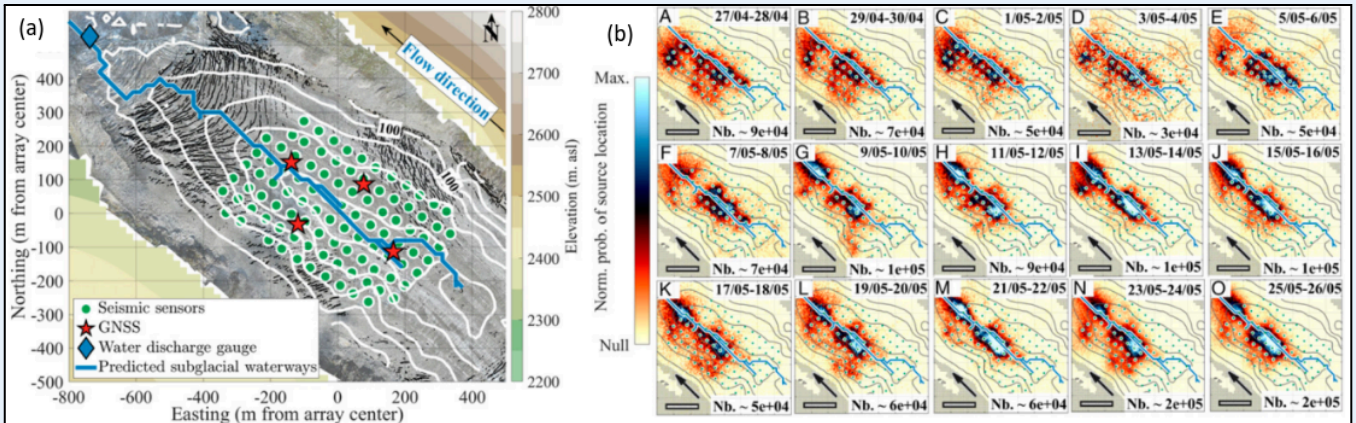


Figure 4: (a) Configuration du réseau de sismomètres, (b) localisation des sources de bruits sismiques liées aux écoulement d'eau sous-glaciaire jour après jour et comparaison avec un modèle

***Nanni** et al., (2021), Proceedings of the National Academy of Sciences; 2 présentations orales, 3 séminaires et 1 poster*
Umlauft et al., (2023) - coauteur
Communiqué de presse, interview sur la RTS, contribution à une bande dessinée
Bourse de formation de l'European Seismological Commission : ~ 4 000 €; AGU student award: ~ 1 000 €;

Nous avons mis en accès libre le protocole développé (lecoinal.gricad-pages.univ-grenoble-alpes.fr/resolve/). Ce protocole est aujourd'hui adopté dans différents projets de recherches, comme le projet ERC-REASSESS qui étudie l'hydrologie sous-glaciaire au Groenland, le projet NERC porté par l'Université de Sheffield (UK) qui étudie les vidanges de lac glaciaires au Groenland ou le projet SEIS-ADELICE porté par l'Institut Polaire français. J'ai formé 3 équipes de recherche à ce protocole et à l'installation de réseaux sismique: une à l'Institut de Physique du Globe de Paris pour une étude en Suisse (Wolf et al., submitted - coauteur); une à l'Académie des Sciences de Pologne pour une étude au Svalbard (Gajek, **Nanni** et al., submitted.); et la dernière à l'Université d'Hokkaido lors d'un séjour de deux mois pour la préparation de la 65ème expédition japonaise de recherche en Antarctique (Minowa et al., in prep. - coauteur; bourse de mobilité de ~ 7 500 €). En dehors des contextes glaciaires, ce protocole a aussi contribué à l'étude des volcans, l'imagerie intra-crânienne, la géodynamique profonde ou encore l'océanographie.

J'ai ensuite utilisé ce protocole pour étudier différents processus glaciaires. Avec une localisation chaque demi-seconde, 29 points de départs pour l'optimisation et 9 bandes de fréquences; cela donnait sur les 35 jours de mesures plus de 1 500 000 000 localisations potentielles. Pour analyser un tel jeu de données, j'ai opté pour une approche statistique qui m'a permis d'identifier les signaux sismiques générées par l'**ouverture des crevasses** et d'étudier leur cinématique, mais aussi d'identifier un type de sources inconnus: des sources sismiques secondaires, causées par des structures diffractantes au sein du glacier qui indiquait la présence de **zones de rhéologie hétérogène** dans la glace causées par l'advection de fractures et de sédiments piégés dans le glacier.

***Nanni** et al., (2022), Geophysical Research Letters; 1 présentations oral, 2 séminaires et 1 poster*
Communiqué de presse

3. Instabilités glaciaires et changement climatique: post-doctorat(s)

Suite à mes travaux de doctorat j'ai décidé d'étudier les potentielles **instabilités glaciaires** que la fonte des glaciers peut causer. J'ai choisi de travailler au Svalbard, un archipel sous souveraineté norvégienne localisé à près de 1000 km du Pôle Nord, qui fait face à une augmentation des températures près de 7 fois plus rapide que sur le reste du globe et est au cœur d'enjeux géopolitiques. J'ai rejoint l'équipe du projet de recherche MAMMAMIA (*Analyse multi-échelle et multi-méthodes des mécanismes à l'origine de l'accélération des glaciers*) à l'Université d'Oslo qui avait pour but de comprendre les **mécanismes contrôlant la déstabilisation du glacier de Kongsvegen**.

Ce projet fédère l'institut de sismologie norvégien, l'institut polaire norvégien et le centre universitaire du Svalbard. J'ai rejoint ce projet en tant que responsable principale du volet sismologique.

Le glacier de Kongsvegen, localisé à 20 km de la station de recherche de Ny-Alesund, est un des **glaciers témoin** de l'Arctique et est suivi depuis près de trois décennies. Ce glacier a été particulièrement affecté par la fonte, avec une augmentation de la limite entre la zone d'ablation et la zone d'accumulation de près de 3 km depuis les années 1990 et une perte d'épaisseur de plus de 30 m a son front. Depuis 2014, les mesures de terrains montrent une accélération du glacier, passant de quelques mètres par an a plus de 80 mètres par an en 2023. Cette accélération est pour l'instant localisée dans la partie haute du glacier et la compréhension des conditions de sa propagation sur l'ensemble du glacier représente un enjeu clé pour comprendre les instabilités glaciaires.

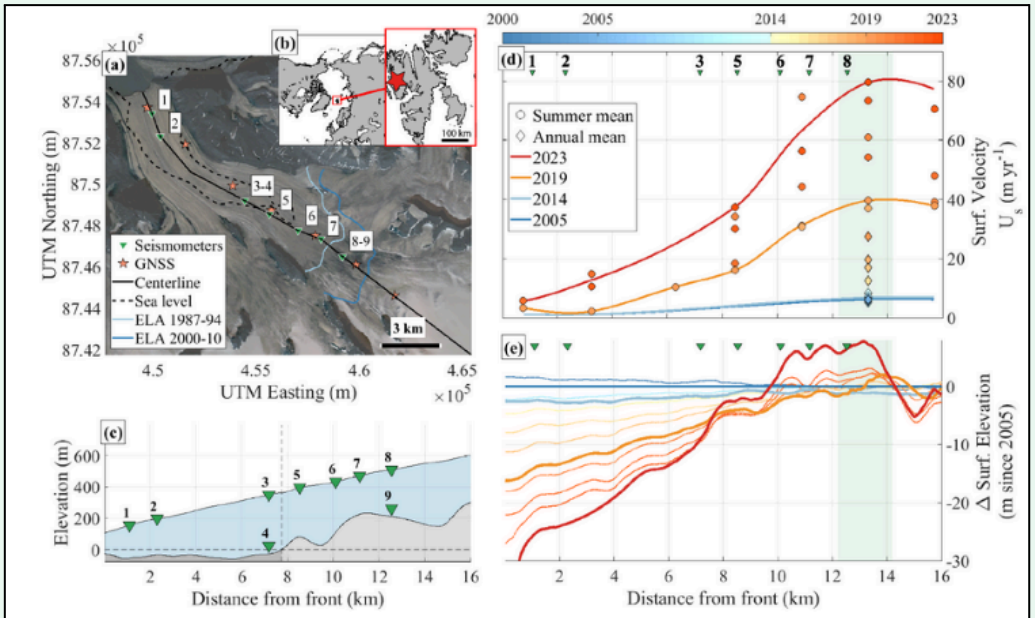


Figure 5: (a, b, c) Réseau d'observations sur le glacier de Kongsvegen, (d) mesures vitesses de surface du glacier et (e) changement d'épaisseur au cours du temps.

3.1. Mécanique de l'interface glacier-sédiment

La première étape pour étudier les processus gouvernant l'instabilité du glacier de Kongsvegen a été de comprendre les conditions mécaniques à la base du glacier. Pour conduire cette analyse, j'ai **supervisé une étudiante en thèse** C. Bouchayer, qui a obtenu sa thèse en Décembre 2023.

Nous avons adopté une approche multi-échelle et multi-instrumentale en couplant approche sismologique, mesures glaciologiques et développement instrumental d'un *ploughmeter*, un appareil permettant de mesurer directement les forces agissant à la base du glacier, 350 m sous la surface. Le *ploughmeter* consiste en une tige de métal de 2 mètres, sur laquelle sont installés des capteurs triaxiaux de force ainsi que des capteurs de pressions et de températures. J'ai accompagné le développement de ces instruments avec J. Hult, ingénieur.

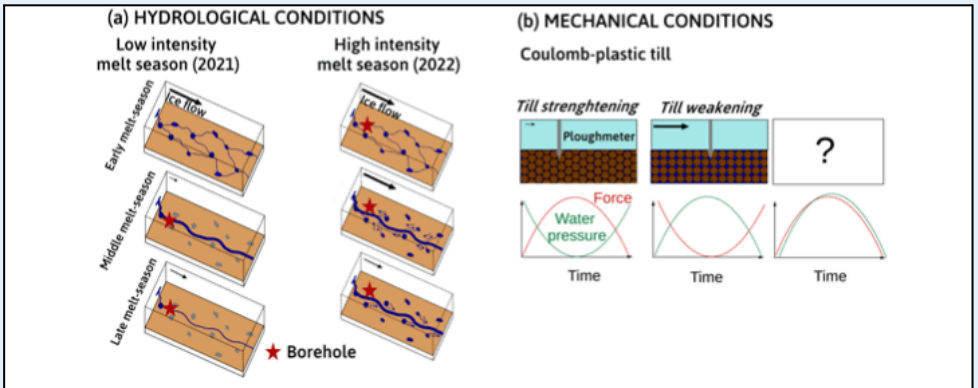


Figure 6: (a) Evolution conceptuelle du réseau sous-glaciaire de Kongsvegen lors de deux saisons de fonte et (b) interprétations des mesures de forces dans des cadres théoriques

En analysant deux saisons de fonte continue, nous avons identifié deux types de réponses de l'environnement sous glaciaire. Lors d'une saison de fonte courte et peu intense, le réseau de drainage a évolué à l'équilibre avec le ruissellement, avec une très faible influence sur le glissement du glacier. Lors d'une saison de fonte longue et intense, le réseau de drainage a évolué de manière transitoire, affaiblissant le couplage glace-sédiments et promouvant le glissement du glacier. Grâce aux mesures directes des forces nous avons pu identifier **deux régimes mécaniques**, permettant une représentation physique des **processus de couplage glacier-sédiments**.

Bouchayer, **Nanni** et al., (2024), The Cryosphere - *étudiante en thèse co-supervisée; 2 présentations orales et 1 séminaire*
Contribution à deux articles de vulgarisation et deux conférences, dont une à l'Institut Français de Norvège
Bourse Circle U pour financer une campagne de terrain : ~ 5 000 €

J'ai ensuite cherché à mieux comprendre l'influence de la rhéologie des sédiments sur la dynamique du glacier. Pour cela, j'ai choisi une approche basée sur l'**interférométrie sismique** qui permet d'étudier les propriétés du milieu traversé en analysant les variations de vitesses des ondes sismiques entre différentes stations. Cette méthode est souvent utilisée avec des sources actives (explosions) ce qui permet de déconvoluer facilement l'influence de la source, mais qui limite la couverture spatiale et temporelle. C'est pourquoi j'ai décidé de faire de l'interférométrie sismique passive en utilisant les signaux générés par des sources naturelles. Ces méthodes étaient encore peu utilisées sur les glaciers de par la complexité des signaux et la variabilité des sources.

J'ai d'abord développé un protocole sur le glacier d'Argentière en utilisant les crevasses comme sources sismiques pour étudier les **variations dans la rhéologie de la glace causée par l'endommagement**. Cette technique nous a permis d'accéder à la vitesse des ondes sismiques non pas entre la source et le capteur comme cela est fait de manière traditionnelle, mais de remonter à la vitesse des ondes sismiques autour de la source et donc de pouvoir **identifier directement les propriétés dans ces zones**, qui sont aussi les zones de crevasses où nous avons besoin de comprendre les propriétés mécaniques. Nous avons donc proposé une approche pour étudier la structure d'un objet, ici le glacier, sans pour autant avoir à faire des mesures in situ.

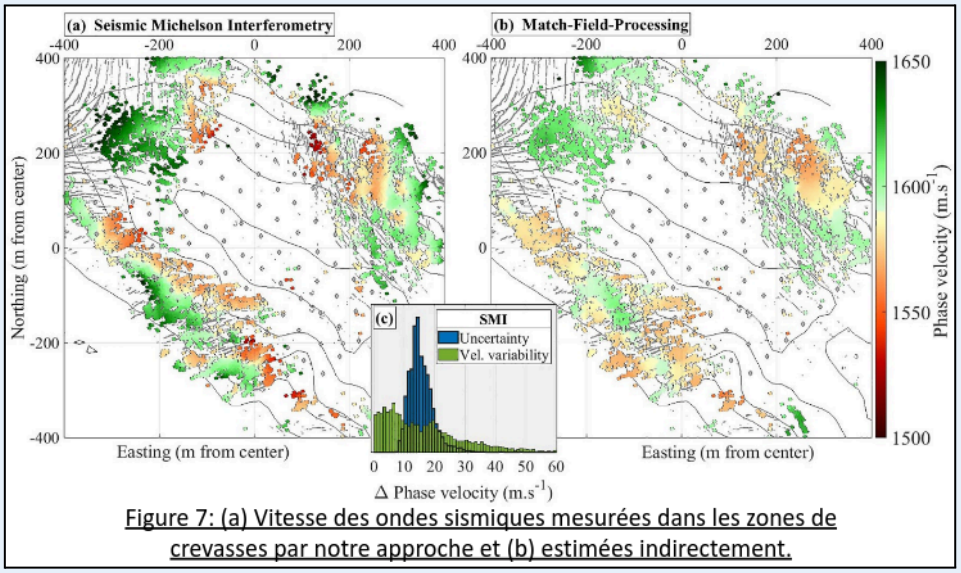


Figure 7: (a) Vitesse des ondes sismiques mesurées dans les zones de crevasses par notre approche et (b) estimées indirectement.

***Nanni** et al., (2024a), Geophysical Research Letters; 2 séminaires et 1 poster*.

Sur le glacier de Kongsvegen, j'ai développé un protocole similaire en utilisant le bruit sismique généré par les vagues de l'océan. Pour conduire cette analyse, j'ai coordonné l'installation d'un réseau sismique sur ce glacier dès 2020 et j'ai maintenu ce réseau avec des stations à la surface du glacier, étalées sur plus de 20 km, et des stations en profondeur, jusqu'à 300 m. J'ai couplé les observations avec un **modèle théorique de propagation des ondes sismiques** ce qui m'a permis d'identifier les fréquences caractéristiques du signal sensibles à l'interface glace-sédiments. J'ai fait ces travaux en **supervisant trois étudiants en master.** Pour continuer ces travaux j'attend d'avoir une série temporelle qui permet d'étudier la propagation de l'instabilité glaciaire sur Kongsvegen.

***Nanni** et al., in prep.; 1 présentations oral*
Deux bourses de l'Université d'Oslo pour financer la venue de deux étudiants pendant 2x6 mois: ~ 10 000 €

3.2. Développement et propagation d'une instabilité glaciaire en réponse à la fonte

L'ambition de ma recherche durant mon post-doctorat à l'Université d'Oslo a été de répondre à la question:
Comment le changement climatique affecte la dynamique des glaciers?

Dans les suite des travaux précédents, j'ai combiné deux décennies de mesures glaciologiques, reconstruit l'évolution de la surface du glacier de Kongsvegen depuis 2000 grâce à de l'imagerie satellitaire, modélisé l'évolution de la fonte de surface, analysé les signaux sismiques enregistrés à la base et la surface du glacier depuis 2018 et développé un cadre théorique pour établir un diagnostic mécanique du glacier. J'ai sélectionné trois approches sismiques différentes, l'une pour étudier l'évolution des conditions hydrauliques sous glaciaire, la seconde pour étudier l'évolution des crevasses à la surface du glacier et la troisième pour étudier les conditions de friction à la base du glacier. L'enjeu n'était pas de développer une approche méthodologique complexe, mais plutôt de tirer profit de la combinaison des méthodes et des instruments pour sélectionner l'approche la plus à même de répondre à ma question de recherche. J'ai ainsi identifié que l'accélération de Kongsvegen résulte d'une **rétroaction positive, favorisée par le changement climatique anthropique,** qui a durablement augmenté le flux de glace vers l'océan de plus d'un ordre de grandeur et qui pourrait entraîner une déstabilisation complète.

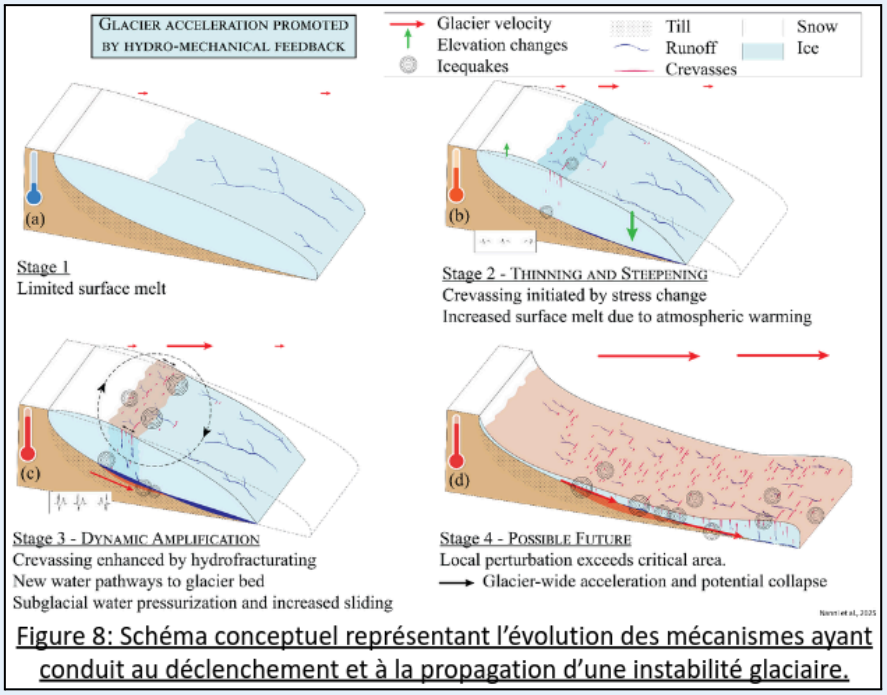


Figure 8: Schéma conceptuel représentant l'évolution des mécanismes ayant conduit au déclenchement et à la propagation d'une instabilité glaciaire.

***Nanni** et al., (2025), Nat. Communications ; 3 présentations orales et 3 séminaires; International Glaciological Society Award*
Communiqué de presse, un article de vulgarisation, une interview sur France Culture, un entretien sur Médiapart
Bourse Circle U pour financer l'analyse des données sismiques : ~ 5 000 €

Avec cette étude, j'ai collaboré avec la quasi-totalité des participants du projet MAMMAMIA, fédérant ainsi neuf instituts de recherche, et proposé une analyse intégrée des mécanismes à l'origine de l'initiation et de la propagation de l'accélération du glacier de Kongsvegen, un processus engagé depuis plus d'une décennie. Ce travail a également permis de valoriser les nombreuses campagnes de terrain depuis la fin des années 1990, ainsi que celles que nous avons conduites. À ce jour, l'instrumentation sismique de ce glacier se poursuit.

Au-delà du cas spécifique de Kongsvegen, cette étude propose un cadre physique et méthodologique permettant d'analyser les réponses dynamiques des glaciers au changement climatique, applicable au-delà des seules régions polaires. Pour moi, cette contribution marque l'aboutissement d'un cycle de recherche consacré à la compréhension des mécanismes par lesquels la fonte de surface influence la dynamique glaciaire et peut conduire à des situations d'instabilité.

Au fil des ans, mon intérêt s'est élargi au-delà de l'étude des glaciers eux-mêmes, pour inclure leurs interactions avec les systèmes humains et non-humains situés en aval. Cette évolution s'est d'abord traduite par des contributions à plusieurs travaux portant sur les impacts de la fonte glaciaire sur les environnements aval, avant de converger vers la problématique centrale qui structure aujourd'hui mon projet de recherche.

Chapitre 2: Comprendre les impacts aval de la fonte de la Cryosphère

1. Crues glaciaires et débits pro-glaciaires

Une question clé dans les vidanges de lacs glaciaires est l'estimation des débits ainsi que des processus d'initiation. Cette dynamique ne peut être obtenue que par l'instrumentation in-situ, difficile dans ces contextes.

J'ai proposé une approche basée sur mes travaux de cryosismologie à une équipe. Nous avons instrumenté un lac glaciaire en bordure de Kongsvegen. J'ai analysé la temporalité de la vidange et estimé l'effet de cette vidange sur la dynamique du glacier et nous avons reconstitué l'impact sur la géochimie du fjord. J'ai collaboré avec mes collègues de l'Université d'Hokkaido pour reconduire ce suivi sismologique sur deux autres saisons de fonte.

Alexander et al., in review - coauteur; Imazu et al., in prep. - étudiant en thèse de doctorat

Dans la continuité des approches que j'ai développées pour étudier l'hydrologie sous glaciaire, je me suis intéressé à l'hydrologie pro glaciaire et au stockage dans les aquifères. Les méthodes d'observation classique sont limitées dans de tels environnements où les rivières gèlent et où les conditions atmosphériques sont hasardeuses.

Dans les bassins versants de la calotte du Vatnajökull, je collabore avec une étudiante en doctorat C. Daigre. Nous développons un protocole de mesure des débits des rivières proglaciaires grâce à la sismologie.

Daigre, **Nanni** et al., in prep. - étudiante en thèse de doctorat*

Quantifier le transport sédimentaire pro-glaciaire et fluvial permet de mieux comprendre les processus d'érosion des glaciers tout comme l'évolution morphologique des rivières et les risques associés.

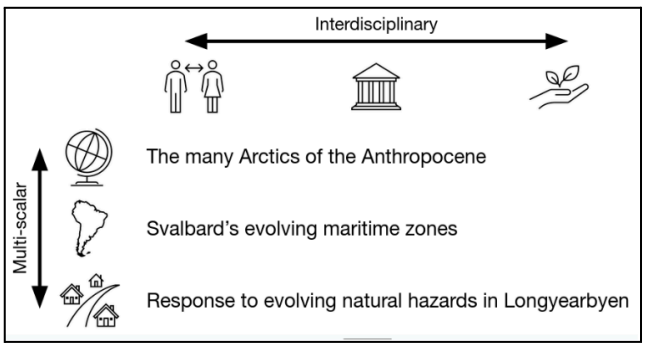
J'ai appliqué mon protocole de localisation de sources sismiques dans le cadre d'un suivi de crue d'une rivière. Le charriage sédimentaire dans les rivières génère un signal sismique causé par les impacts des roches. Avec 80 sismomètres installés sur les berges, nous avons détecté des signaux impulsionnels que nous avons associé à des clusters de sédiments transportés par charriage qui ont refaçonné la morphologie de la rivière durant la crue.

Piantini et al., (2022) - coauteur - étudiant en thèse de doctorat

2. Aléas et vulnérabilité: risques dans un bassin versant englacé

Au-delà des enjeux liés aux sciences naturelles et physiques, mon attrait pour la Cryosphère provient aussi des enjeux sociétaux qui y sont liés. C'est pour me former à ces enjeux que j'ai rejoint une formation sur la recherche interdisciplinaire en Arctique, entre sciences sociales, sciences politiques, et sciences physiques. Suite à cette formation, nous avons débuté une étude transdisciplinaire et multi-échelle autour des transformations de l'Arctique et de ses frontières, physiques, humaines et imaginaires. Pendant deux ans, **j'ai coordonné un groupe de recherche de 15 jeunes chercheur.euses** autour de trois cas d'étude: le premier à l'échelle globale sur l'évolution des frontières physiques et immatérielles de l'Arctique; le second à l'échelle régionale sur les transformations dans les courants océaniques et leur impact sur les politiques de pêche et les enjeux autour des zones économiques exclusives; et le troisième, à l'échelle locale, sur l'**évolution de l'aléa et de la vulnérabilité** face à la transformation de l'environnement naturel et social dans la ville de Longyearbyen, au Svalbard.

Nous avons combiné études sociologiques, cartographie de l'évolution des aléas et étude des politiques de démocratie locale. Le cadre de Longyearbyen est particulier: une ville de 2600 habitants dont près de 50% y résident moins de deux ans, créant ainsi une perception collective mouvante. Ce travail transdisciplinaire a fait l'objet d'une attention particulière de la part du Programme de surveillance et d'évaluation de l'Arctique (AMAP), un des groupes du Conseil de l'Arctique.



***Nanni** et al., (2024b) - Polar Geography; 2 présentations orale*
Bourse de l'Académie Polaire Norvégienne: ~ 5 000 €
Un article de vulgarisation sur la recherche interdisciplinaire et un sur la coordination de la recherche en Arctique

Chapitre 3: Comprendre les enjeux sociétaux liés aux changement de la Cryosphère

Lors de ces engagements entre sciences physiques, sociales et politiques j'ai trouvé ma place en tant que chercheur dans la société. Ce que j'aime en particulier, c'est faire le pont entre les savoirs et les besoins des populations pour informer les décideurs, ainsi que contribuer à un cadre accueillant pour les jeunes chercheurs.

1. Écouter les glaciers: diplomatie scientifique et expertises

J'ai intégré le programme *Emerging Leaders*, qui forme les jeunes professionnels autour des enjeux de l'Arctique Nous avons travaillé sur les barrières structurelles à l'intégration des jeunes en Arctique, que ce soit des jeunes venus d'autres pays, locaux ou autochtones. Nous avons introduit le concept de *youthwashing* afin de proposer une critique et des recommandations pour favoriser une prise de décision inclusive. Nous avons exploré le rôle du **leadership des jeunes dans la gouvernance** dans diverses disciplines et la manière dont des perspectives diverses sont nécessaires pour façonner l'avenir de l'Arctique.

Dabiran-Zohoory et al., (2024) - equal contribution from all authors, authors in alphabetical order
Co-convener de la Session Where are all those Arctic Jobs Everyone is Talking. About? lors de la conférence Arctic Frontiers
*Mentor pour l*e programme *Arctic Frontiers Student Forum; guide pour les jeunes chercheur.es sur la Cryosphère*

C'est dans cette lignée que j'ai intégré l'organisation non gouvernementale Internationale Cryosphere and Climate Initiative (ICCI). Cette organisation s'inscrit dans le contexte de la **Convention Cadre des Nations unies sur le Changement Climatique**. En tant que représentant des jeunes scientifiques de la cryosphère, mon rôle a été d'accompagner les processus de négociations climatiques en participant à la formation des équipes de négociations à travers des **expertises autour des enjeux de la Cryosphère et des impacts de ses changements**. Notre tâche était de produire les outils appropriés, que ce soit avec des pays de l'Afrique francophone pour établir des cartes d'élévation du niveau de la mer causée par la fonte des calottes, ou avec des pays himalayens et andins pour synthétiser les impacts présents et futurs de l'évolution des glaciers sur les ressources en eau ainsi que sur les risques. J'ai ainsi pris part à la COP-Climat 27, lors de la création de AMI, le premier groupe de travail regroupant des pays du Nord Global et du Sud Global à travers leurs liens avec la Cryosphère; à la COP-Climat 28 et à de nombreux sommets intermédiaires (conférence de Bonn des organes subsidiaire); ainsi qu'à des groupes de travail au niveau inter-ministérielle. En particulier, j'ai co-organisé un de ces groupes à Oslo, afin de réunir les équipes de négociations de différents pays en préparation à la COP-Climat 28, à la fois du Nord Global et du Sud Global. J'ai ensuite fait partie de l'équipe du Pavillon de la Cryosphère lors du sommet sur l'Océan (UNOCC, Nice) destiné à un public plus large (lancement de la décennie sur les sciences de la Cryosphère).

Séminaires et conférence lors des COP 27 et 28 (Blue Zone), SB59 et somment inter-ministérielles (Oslo, Stockholm)
Séminaires et conférence lors d'évènements grand public et académique (e.g., inauguration de l'Académie d'Excellence 3 de l'Université Côte d'Azur), article grand public (Bloomberg)

Suite à ces engagements, j'ai postulé à des postes de diplomatie scientifique. Parmi eux, celui de député secrétaire au Conseil de l'Arctique, pour lequel ma candidature a été considéré, mais c'est un profil en lien avec les peuples autochtones qui a été retenu. J'ai postulé au poste de directeur du groupe de recherche sur la Cryosphère de ICIMOD, une agence transnationale qui fédère l'arc himalayen. Ma candidature a été retenue jusqu'au dernier entretien. Cette période m'a conforté dans ma volonté de travailler en lien entre la Cryosphère et les enjeux sociétaux associés, et de me placer à cette interface **en tant que chercheur**.

Bibliographie

Voir Curriculum Vitae pour liste complète

Articles en préparation

- Gajek, W., **Nanni, U.**, & Gholami, A. *Icequake and noise localization on glaciers: methods comparison on Hansbreen Glacier.*
- Daigre, C., **Nanni, U**., Violette, S., Aðalgeirsdóttir, G., Pálsson, F., Gagliardini, O., Vincent, A., & Guðmundsson, S.. *Characterization of the glacio-hydro-geological conceptual model of glacierized catchments in South-East Iceland.*

Articles en révision

- Wolf, E., Stutzmann, E., Metaxian, J-P., **Nanni, U.**, et al. (Journal of Glaciology). *Tracking the sub-glacial river of Glacier d'Otemma with seismic nodes and Distributed Acoustic Sensing*.
- Alexander, A., [...], **Nanni, U.**, [...], et al. (Journal of Geophysical Research: Biogeosciences). The impact of subglacial drainage system evolution and glacier lake outburst on Arctic fjord macronutrient dynamics: Kongsfjorden, Svalbard

Articles publiés (*tout les pdfs sont disponibles sur https://www.ugonanni.fr/publications*)

- **Nanni, U.**, Bouchayer, C., Åkesson, H., Lefeuvre, P.-M., Mannerfelt, E. S., Köhler, A., Gagliardini, O., Schmidt, L. S., Hult, J., Renard, F., & Schuler, T. V. *Observed positive feedback between surface ablation and crevasse formation drives glacier acceleration and potential surge.* Nature Communications. **16**, 11227 (2025) https://doi.org/10.1038/s41467-025-66349-9
- **Nanni, U.**, DeRepentigny, P., Lundén, A., Popovaitė, V., Shen, Y., Basaran, I. K., et al. (2024b). *Redefining arctic boundaries in a changing climate: interdisciplinary perspectives on governance strategies.* Polar Geography, 47(2), 127–155. https://doi.org/10.1080/1088937X.2024.2359926
- Dabiran-Zohoory, P., Henk, A., Koops, S., Moore, S. E., **Nanni, U.**(*), Palmer, L., et al. (2024). *Co-creating Arctic futures: Perspectives from emerging leaders on youth leadership and inclusive governance.* Arctic Yearbook 2024. (**Equal Contributions from all authors*). https://arcticyearbook.com/arctic-yearbook/2024
- **Nanni, U.**, Roux, P., & Gimbert, F. (2024a). *Mapping glacier structure in inaccessible areas from turning seismic sources into a dense seismic array.* Geophysical Research Letters, 51(11), e2023GL108058. https://doi.org/10.1029/2023GL108058
- Bouchayer, C.(*), **Nanni, U.**, Lefeuvre, P.-M., Hult, J., Steffensen Schmidt, L., Kohler, J., et al. (2024). *Multi-scale variations of subglacial hydro-mechanical conditions at Kongsvegen glacier, Svalbard.* The Cryosphere, 18(6), 2939–2968. (**Co-supervised PhD student*). https://doi.org/10.5194/tc-18-2939-2024
- **Nanni, U.**, Scherler, D., Ayoub, F., Millan, R., Herman, F., & Avouac, J.-P. (2023). *Climatic control on seasonal variations in mountain glacier surface velocity.* The Cryosphere, 17(4), 1567–1583. https://doi.org/10.5194/tc-17-1567-2023
- Umlauft, J., Johnson, C. W., Roux, P., Trugman, D. T., Lecointre, A., Walpersdorf, A., **Nanni, U.**, et al. (2023). *Mapping glacier basal sliding applying machine learning.* Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 128(11), e2023JF007280. https://doi.org/10.1029/2023JF007280
- **Nanni, U.**, Roux, P., Gimbert, F., & Lecointre, A.(2022). *Dynamic Imaging of Glacier Structures at High-Resolution Using Source Localization With a Dense Seismic Array.* Geophysical Research Letters, 49(6), doi.org/10.1029/2021GL095996
- Piantini, M., Gimbert, F., Bakker, M., Recking, A., & **Nanni, U.** (2022). *Using a dense seismic array to study fluvial processes in a braided river reach under flood conditions.* LHB, 108(1), 2053314. https://doi.org/10.1080/27678490.2022.2053314
- **Nanni, U.**, Gimbert, F., Roux, P., & Lecointre, A. (2021). *Observing the subglacial hydrology network and its dynamics with a dense seismic array.* Proceedings of the National Academy of Sciences, 118(28), doi.org/10.1073/pnas.2023757118
- Gimbert, F., **Nanni, U.**, Roux, P., Helmstetter, A., Garambois, S., Lecointre, A., et al. (2021). *A multi-physics experiment with a temporary dense seismic array on the Argentière glacier, French Alps: The RESOLVE project.* Seismological Research Letters, 92(2A), 1185–1201. https://doi.org/10.1785/0220200280
- Vincent, C., Cusicanqui, D., Jourdain, B., Laarman, O., Six, D., Gilbert, A., …, & **Nanni, U.** (2021). *Geodetic point surface mass balances: A new approach to determine point surface mass balances from remote sensing measurements.* The Cryosphere, 15, 1259–1276. https://doi.org/10.5194/tc-15-1259-2021
- Girault, J.-B., Bellahsen, N., Boutoux, A., Rosenberg, C. L., **Nanni, U.**, Verlaguet, A., & Beyssac, O. (2020). *The 3-D thermal structure of the Helvetic Nappes of the European Alps: Implications for collisional processes.* Tectonics, 39(3), e2018TC005334. https://doi.org/10.1029/2018TC005334
- **Nanni, U.**, Gimbert, F., Vincent, C., Gräff, D., Walter, F., Piard, L., & Moreau, L. (2020). *Quantification of seasonal and diurnal dynamics of subglacial channels using seismic observations on an Alpine glacier.* The Cryosphere, 14(5), 1475–1496. https://doi.org/10.5194/tc-14-1475-2020
- **Nanni, U.**, Pubellier, M., Chan, L. S., & Sewell, R. J. (2017). *Rifting and reactivation of a Cretaceous structural belt at the northern margin of the South China Sea.* Journal of Asian Earth Sciences, 136, 110–123. doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.01.008
- Boutoux, A., Bellahsen, N., **Nanni, U.**, Pik, R., Verlaguet, A., Rolland, Y., & Lacombe, O. (2016). *Thermal and structural evolution of the external Western Alps: Insights from (U–Th–Sm)/He thermochronology and RSCM thermometry in the Aiguilles Rouges/Mont Blanc massifs.* Tectonophysics, 683, 109–123. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.06.010

4.7.3 Monographs

- **Nanni, U.** (2020). *Resolving subglacial hydrology network dynamics through seismic observations on an Alpine glacier.* Université Grenoble Alpes [PhD thesis]. https://theses.fr/2020GRALU034