

# Apport du calcul haute performance pour la simulation numérique des pergélisols sous changement climatique à l'échelle locale

Projet ANR HiPerBorea (2019-2025)

Thibault XAVIER<sup>1</sup>, Laurent ORGOGOZO<sup>2</sup>

1 – CNES (Centre National des Etudes Spatiales)

2 – GET (Géosciences Environnement Toulouse), Université de Toulouse



# Le pergélisol : définition

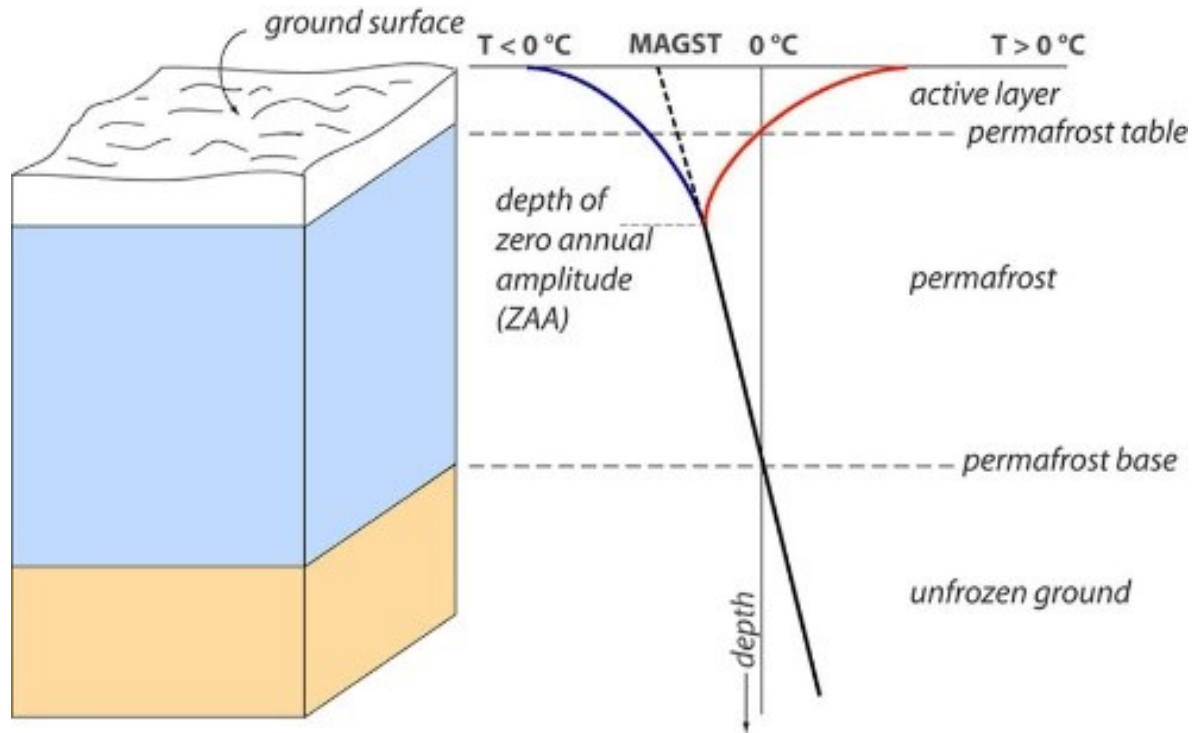
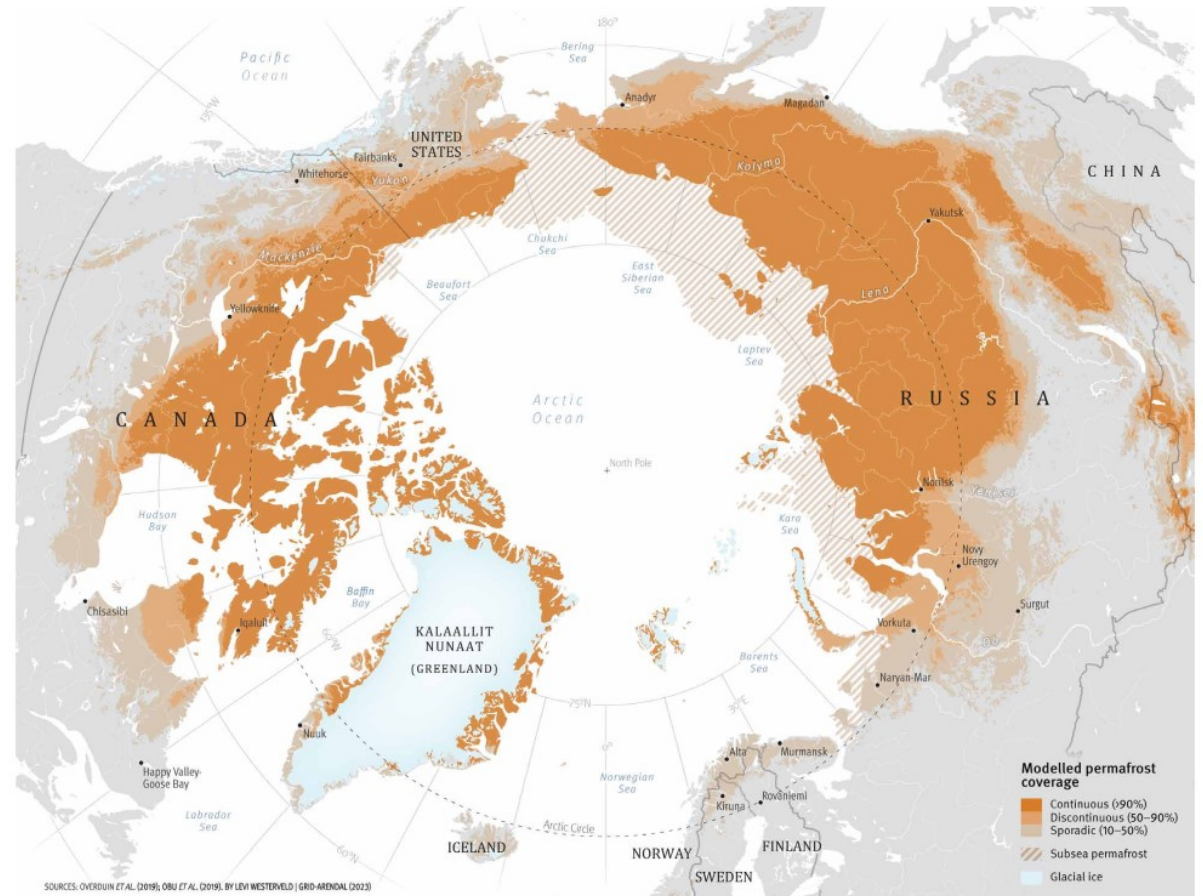


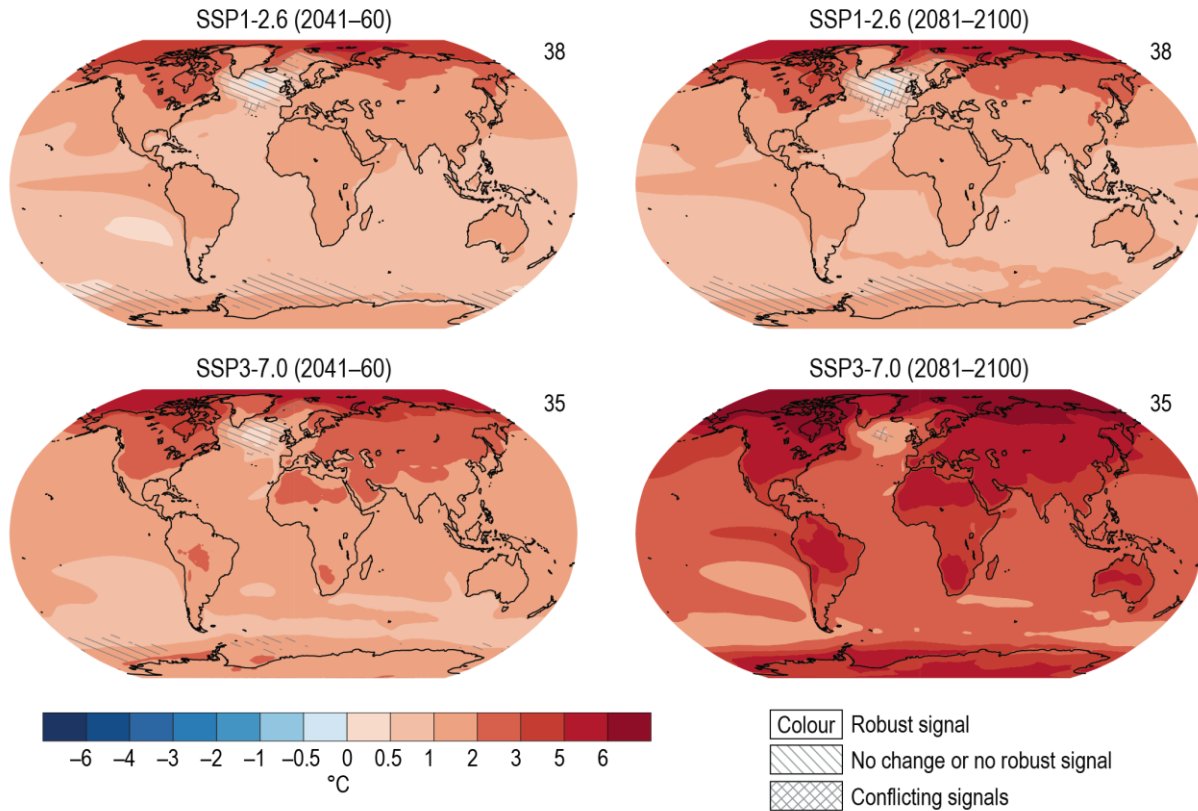
Schéma descriptif d'un profil de temperature type dans une zone à permafrost  
(Swiss Permafrost Monitoring Network)



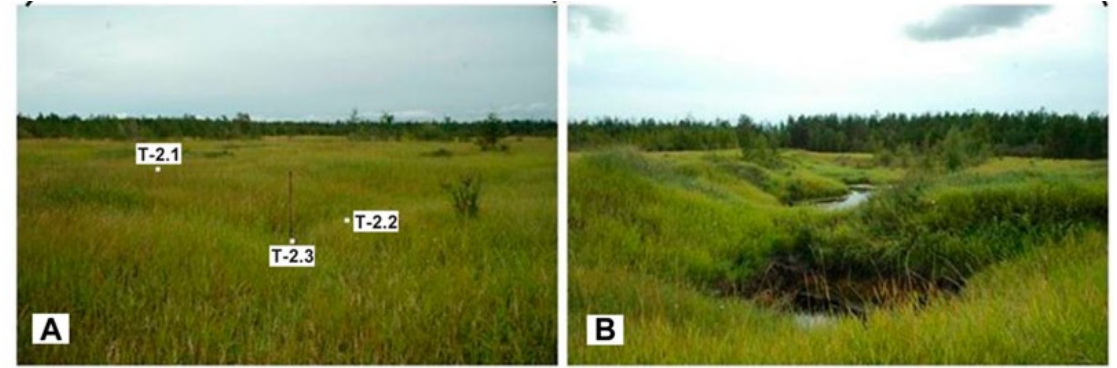
Arctic Permafrost Atlas (2023)  
Couverture et classification du pergélisol arctique  
25% des terres émergées de l'hémisphère Nord

# Le pergélisol : risques & enjeux

Annual mean temperature change



Changement à moyen et long terme de la température de surface en moyenne annuelle par rapport à la période 1995-2014, scénarios SSP1-2.6 et SSP3-7.0 (IPCC Sixth Assessment report, 2021)



Desyatkin et al. (2021)

Thermokarst on former flat arable land in Eastern Siberia



US Army Corps of Engineers (2017)

Thule Air Force base in Northwest Greenland experiences damages from permafrost thaw.

# Projet ANR HiPerBorea



# HiPerBorea

High Performance computing for quantifying climate change impacts on Boreal Areas

Quantify impacts of climate change on permafrost dynamics.

Mechanistic numerical simulations for scenarios of climate change until 2100.

2019 – ~~2023~~ 2024 2025

Echelle d'étude : le bassin versant de tête (O(10km<sup>2</sup>))  
Approche "mécaniste"

4 laboratoires partenaires

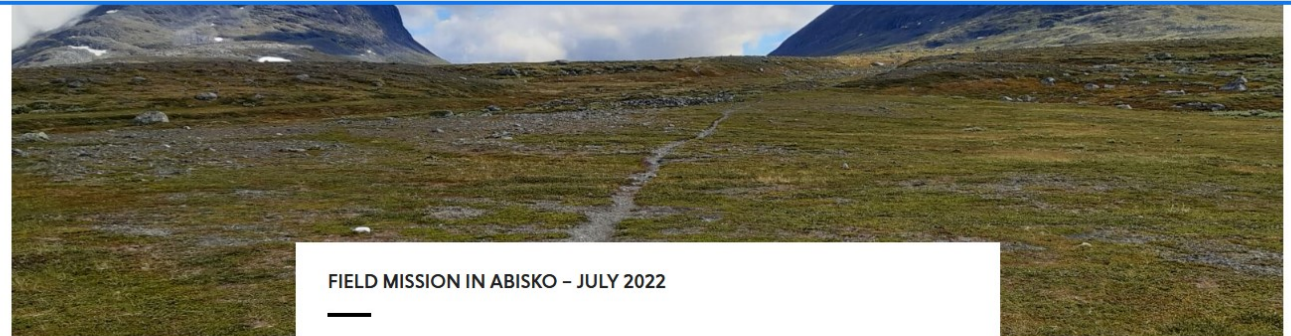
- Geosciences Environment Toulouse
- Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse
- Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
- Centre d'Etude Spatiale de la Biosphère

Aide de l'ANR : 630k€

<https://hiperborea.omp.eu/>

HiPerBorea

PROJECT DATA ACCESS NEWS PUBLICATIONS / ПУБЛИКАЦИИ



## FIELD MISSION IN ABISKO – JULY 2022

25 August 2022

On July 2022 a field mission to Abisko Research Station in Northern Sweden has been done. The goals were to produce a new vegetation map for Stordalen and Mielajokka catchments (see the previous HiPerBorea field mission in Abisko) based on satellite data (Auda et al., in prep) and to sample sphagnum mosses from the peatlands of this area in order to do quantitative estimation of their thermo-hydrological properties (Cazaurang et al., 2022, under review). The HiPerBorea team included Yves Auda (GET), Simon Cazaurang (MFT) and Laurent Orgogozo (GET). On the field we benefited from the guidance of Jonas Gustafsson (Umeå University), many thanks to him for his crucial inputs ! Thanks also to Reiner Giesler (Umeå University), Erik Lundin (Swedish Polar Research Secretariat) and Emily Pedersen (Swedish Polar Research Secretariat) for their help.

We digitalized representative areas for the main land cover types, such as birch forest, heath and wetlands.



# permaFoam : simulateur pour le permafrost

A – Richards equation with evapotranspiration

$$C_H(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (K_H(h, T) \nabla (h+z)) + Q_{AET}(h, T_{air})$$

B – Heat transfer with phase change

$$\frac{\partial \left( C_T(h, T) + L \frac{\partial \theta_{ice}(h, T)}{\partial T} T \right)}{\partial t} + \nabla \cdot (V(h, T) C_{T,liquid} T) = \nabla \cdot (K_T(h, T) \nabla T)$$

Physique couplée et fortement non linéaire

Code permaFoam : permafrost simulator

Orgogozo et al. (2019) - Orgogozo et al. (2023)

Water flow and Heat transfer with phase change

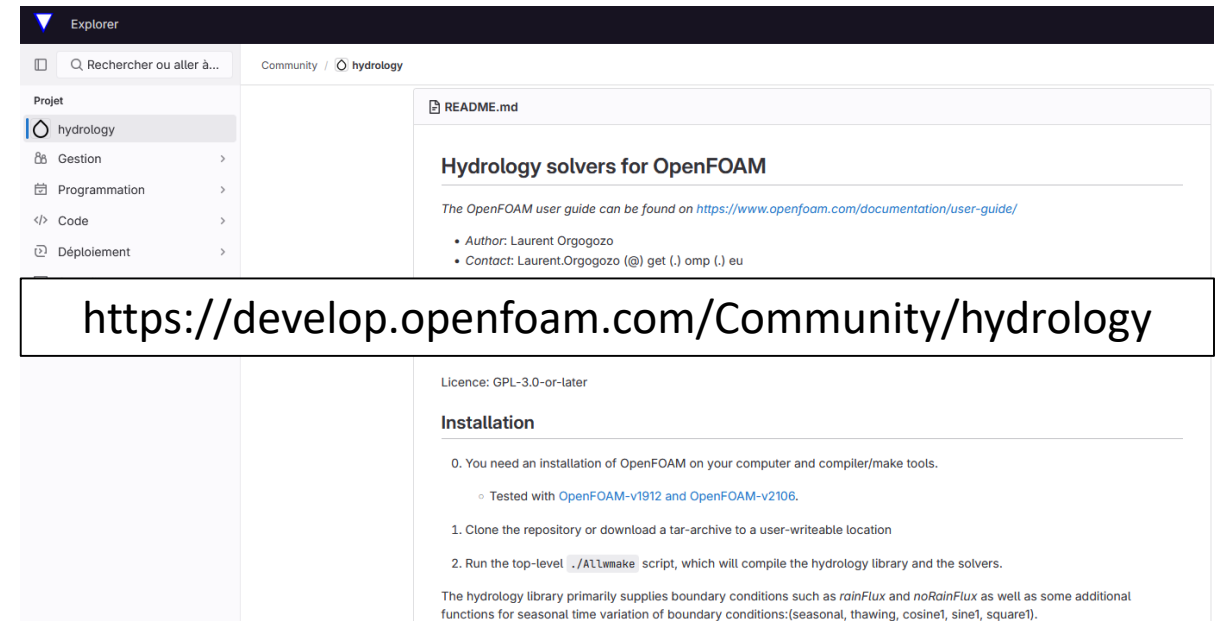
Variably saturated, variably frozen porous media

Subsurface processes (surface = BC)

Evapotranspiration

3D, Transient problems.

Heterogeneous domains



The screenshot shows the GitHub repository page for 'hydrology solvers for OpenFOAM'. The page title is 'Hydrology solvers for OpenFOAM'. Below the title, there is a link to the OpenFOAM user guide: 'The OpenFOAM user guide can be found on <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/>'. The author is listed as 'Laurent Orgogozo' and the contact information is 'Laurent.Orgogozo (@) get (.) omp (.) eu'. The license is 'GPL-3.0-or-later'. The installation instructions are as follows:

0. You need an installation of OpenFOAM on your computer and compiler/make tools.
  - Tested with [OpenFOAM-v1912](#) and [OpenFOAM-v2106](#).
1. Clone the repository or download a tar-archive to a user-writable location
2. Run the top-level `./Allwmake` script, which will compile the hydrology library and the solvers.

The hydrology library primarily supplies boundary conditions such as `rainFlux` and `noRainFlux` as well as some additional functions for seasonal time variation of boundary conditions: `(seasonal, thawing, cosine1, sine1, square1)`.

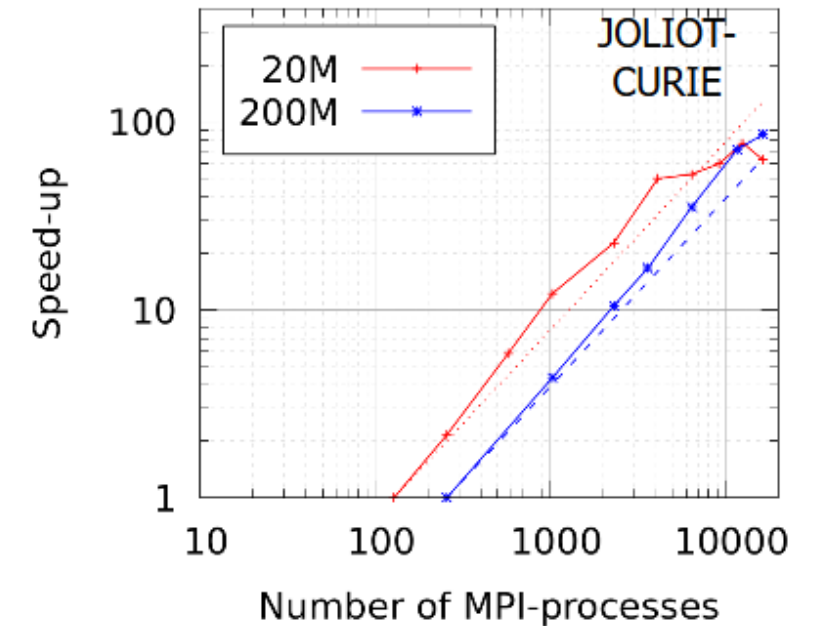
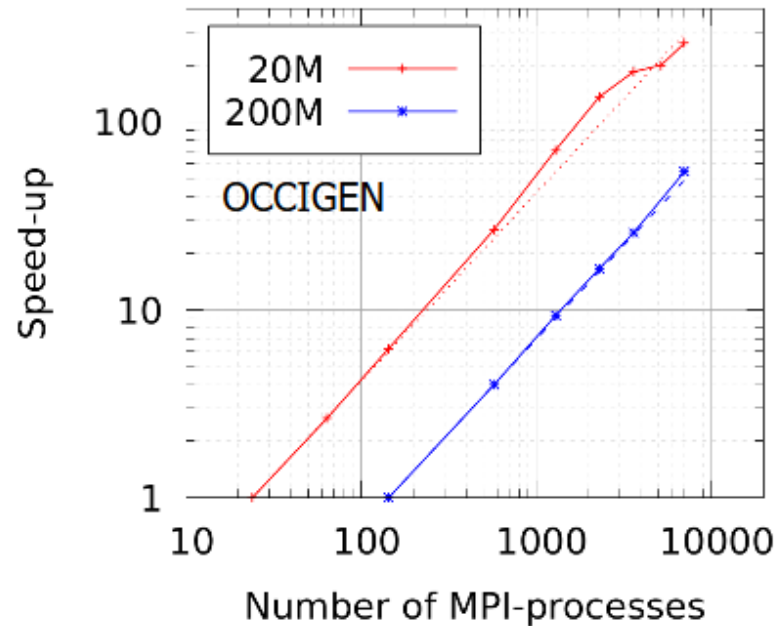
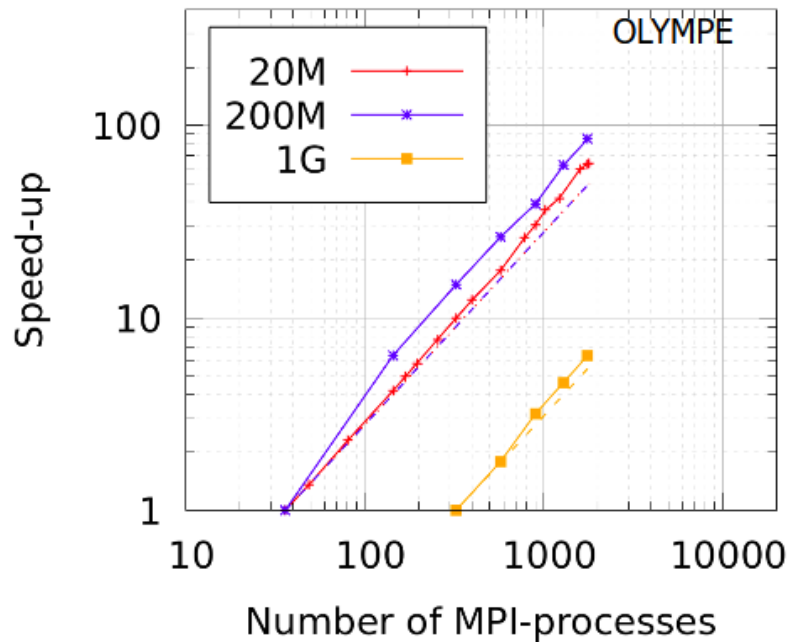
<https://develop.openfoam.com/Community/hydrology>

# OpenFOAM & Calcul à hautes performances

```
// Resolution of the linear system.  
  
// Equation (1) in reference [1]  
{  
  fvScalarMatrix psiEqn  
  (  
    Crel*fvm::ddt(psi)  
    == fvm::laplacian(Krel, psi, "laplacian(Krel,psi)")  
    + gradkz  
    - AET  
  );  
  psiEqn.solve();  
}
```



3D Finite Volume schemes for PDE  
Variety of solvers : fluid flow, heat transfer, solid mechanics, ...  
Maintained HPC methods.  
Large community  
Open-source, free for everyone



# Le bassin versant de Kulingdakan

Position : 64.3°N, 100.3°E

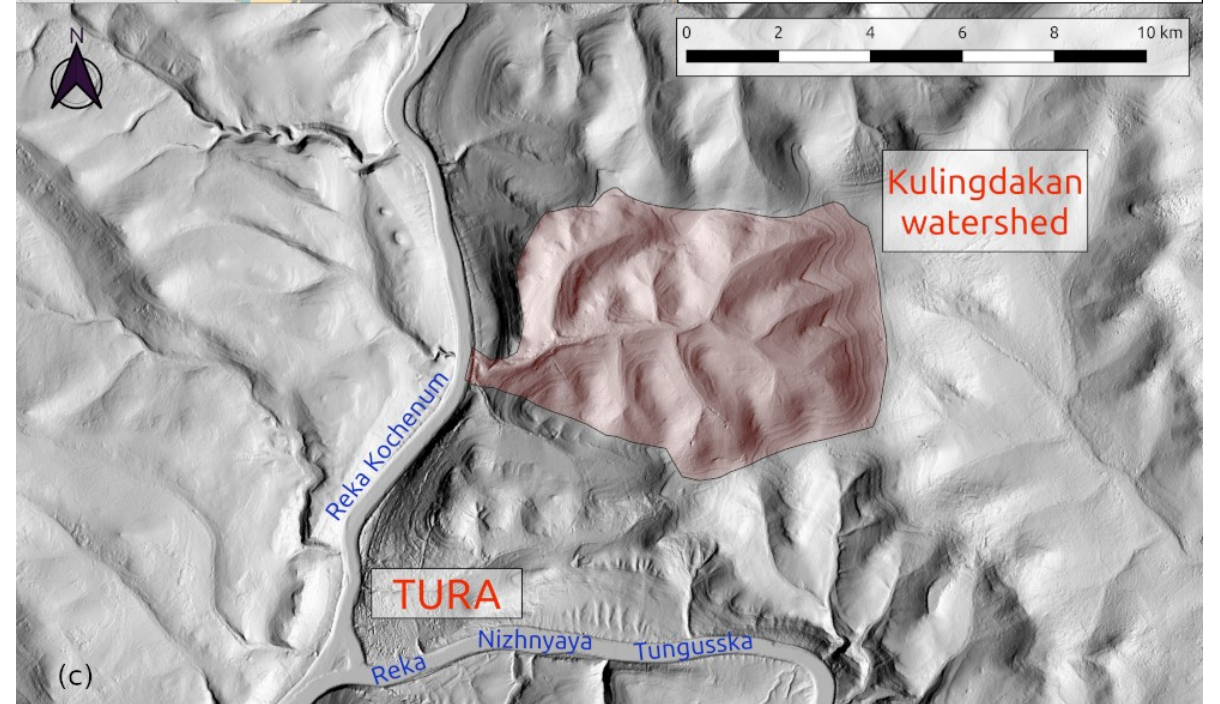
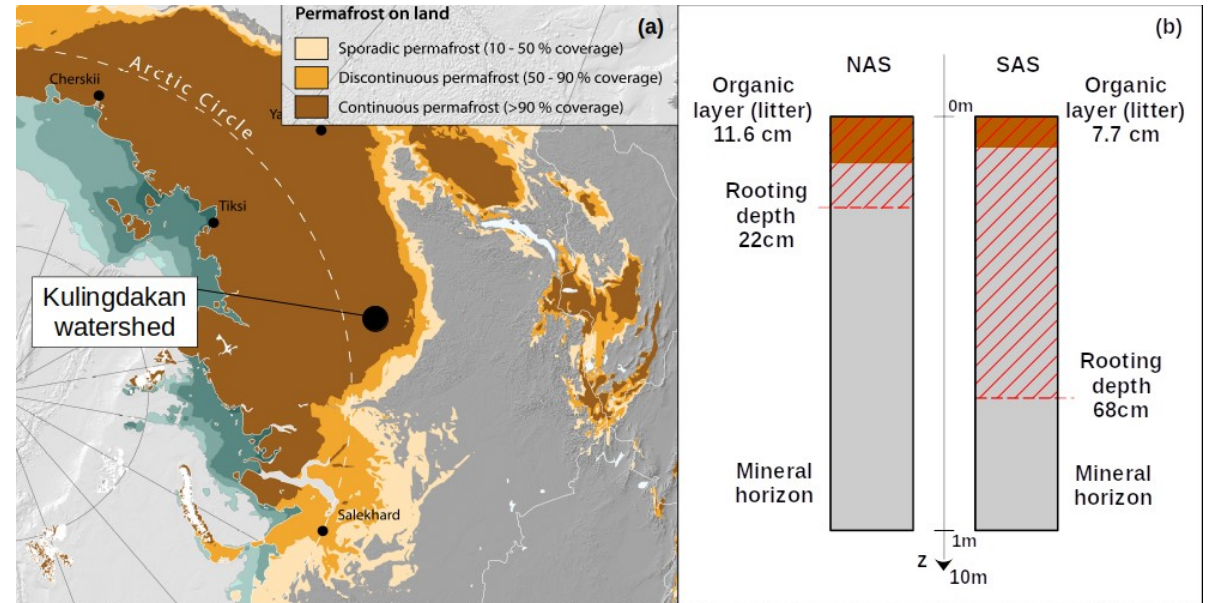
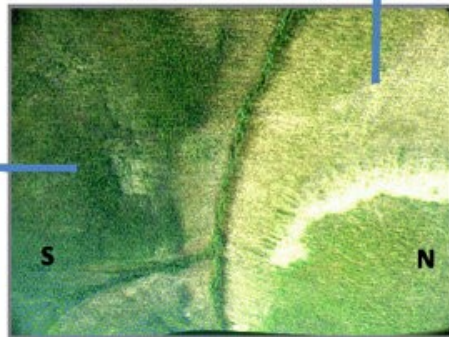
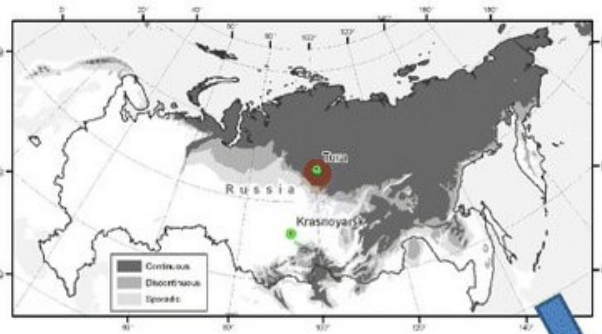
Surface : 41 km<sup>2</sup> divisée en deux versants

Altitude : 132m - 630m

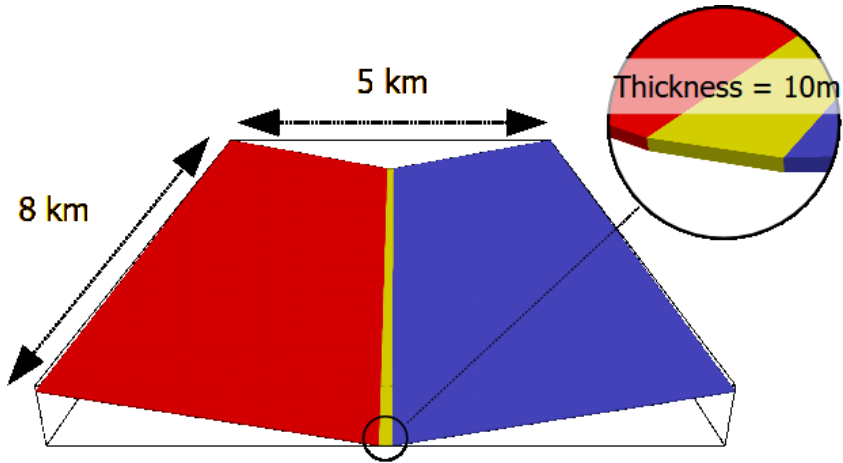
Température moyenne annuelle : -8°C

Précipitations annuelles : 400mm/an

Végétation : forêt de mélèze, buissons, mousses, lichens



# Calculs à Kulingdakan en conditions actuelles

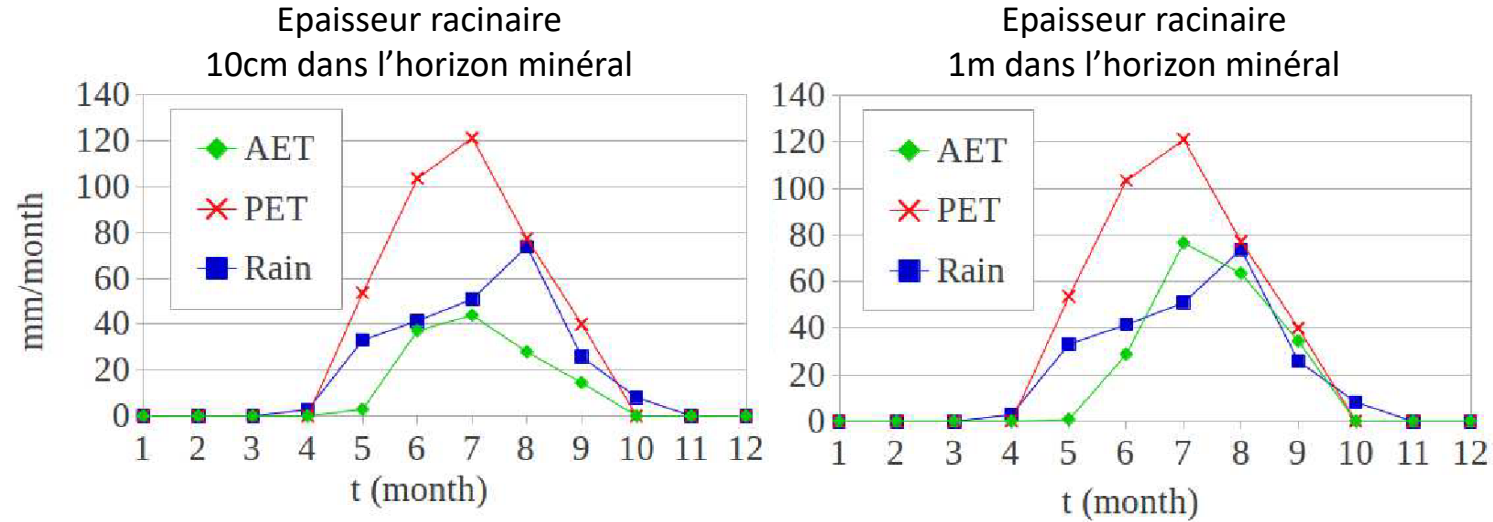


South Aspected Slope    River    North Aspected Slope

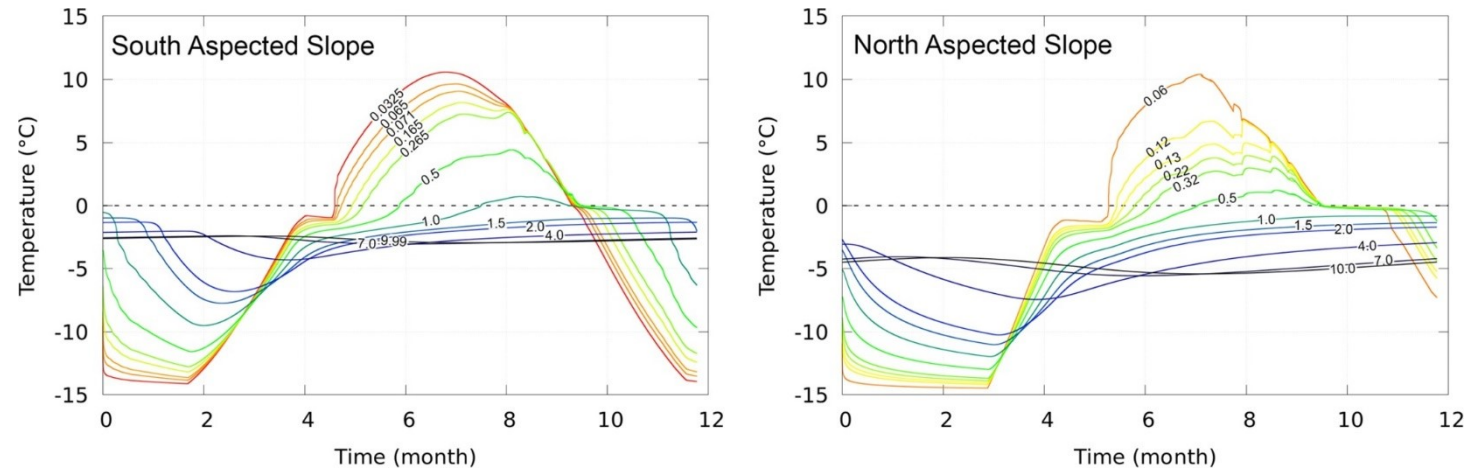
- 3 Patches : Nord / Sud / Rivière
- Conditions aux limites instationnaires
- Maillage non uniforme (raffiné en surface)
- Grilles jusqu'à 500M de points pour le 3D
- $\Delta t$  adaptatif (~1s-10s)
- Plusieurs années à simuler (cyclage)
- Quelques semaines de simulation...

➔ 2D représentatif

## Impact de l'épaisseur racinaire sur le bilan hydrique sur le versant orienté Nord Orgogozo et al. (2019)

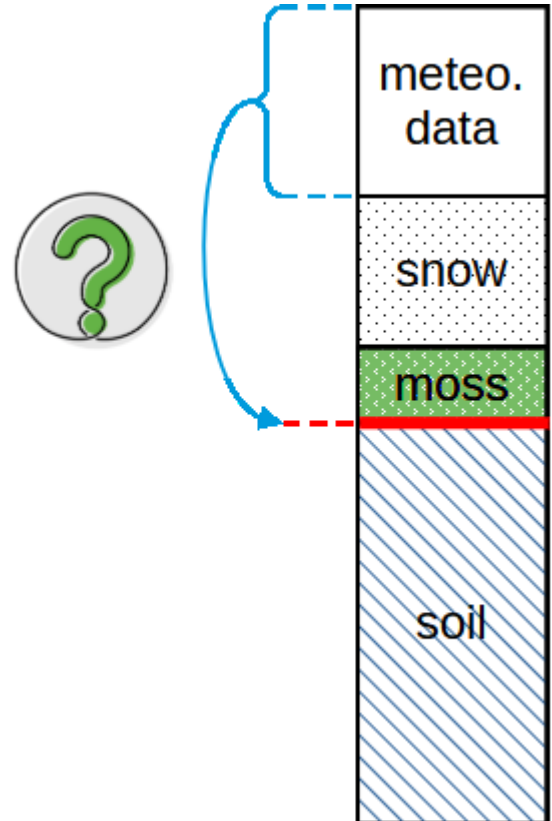
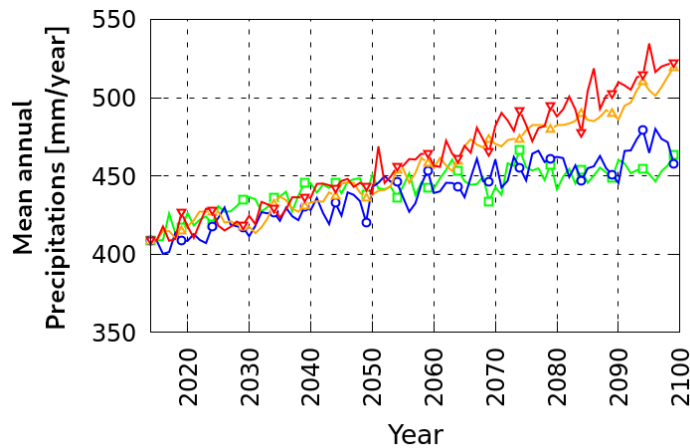
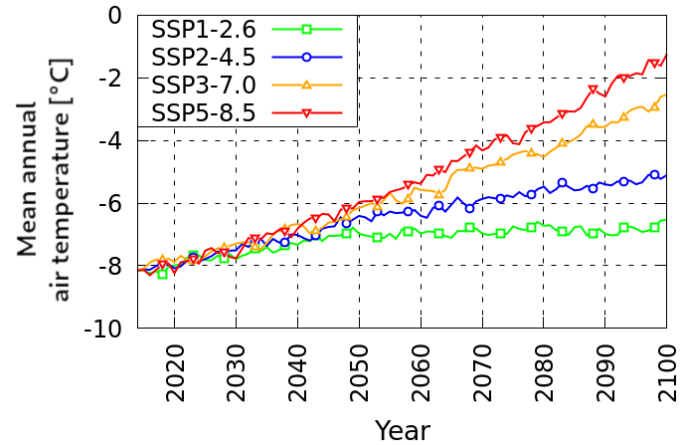


## Evolution de la température au cours de l'année à différentes profondeurs Orgogozo et al. (2023)



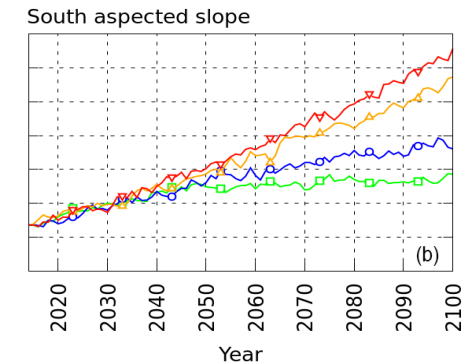
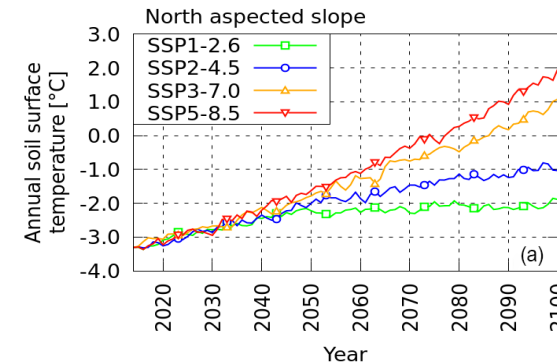
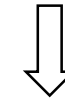


# Construire des scénarios climatiques - prérequis 1 : des données



Approche semi-empirique pour l'estimation de l'accumulation de neige et de la température sous la mousse

Approche partiellement orientée machine learning



Projection de température du sol construite depuis les 4 scénarios CMIP6  
Xavier et al. (accepted)

Projection de température de l'air et des précipitations à Kulingdakan d'après les 4 scénarios CMIP6  
SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5

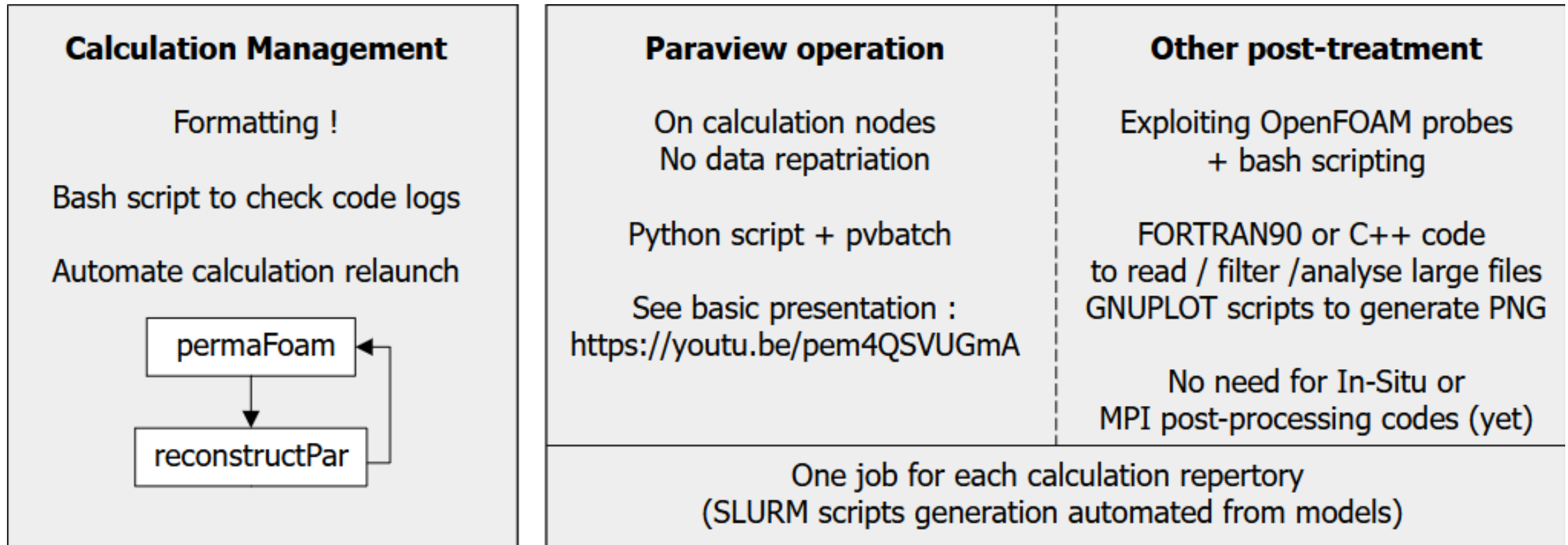
Comment construire, exécuter (sans erreur) et analyser 4 scénarios CMIP6 x 2 versants x 87 ans (2014-2100)

# Construire de scénarios climatiques - prérequis 2 : une méthodologie HPC

Intégrer la méthodologie dans le contexte HPC : du pré- au post-traitement.

Adapter les données de sortie au niveau de détail souhaité (données journalières)

Post-traitement déporté pour monitorer les calculs



# Construire des scénarios climatiques - prérequis 3 : des moyens HPC

Allocation de ressources ayant permis de mener à bien le projet

24Md'hcpu sur 2019-2025

Budget en € comparable au soutien de l'ANR

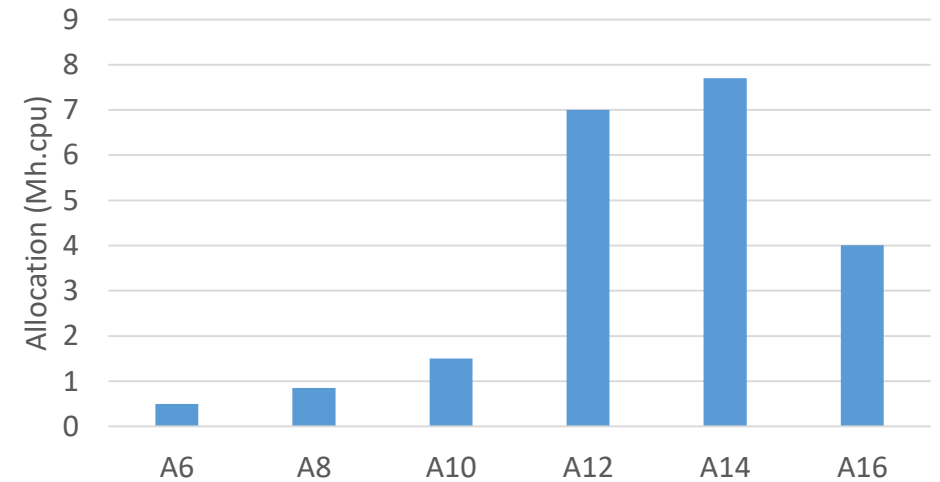
Passage à l'échelle : transition du mésocentre vers le centre national

Soutien continu du mésocentre : environnement de développement

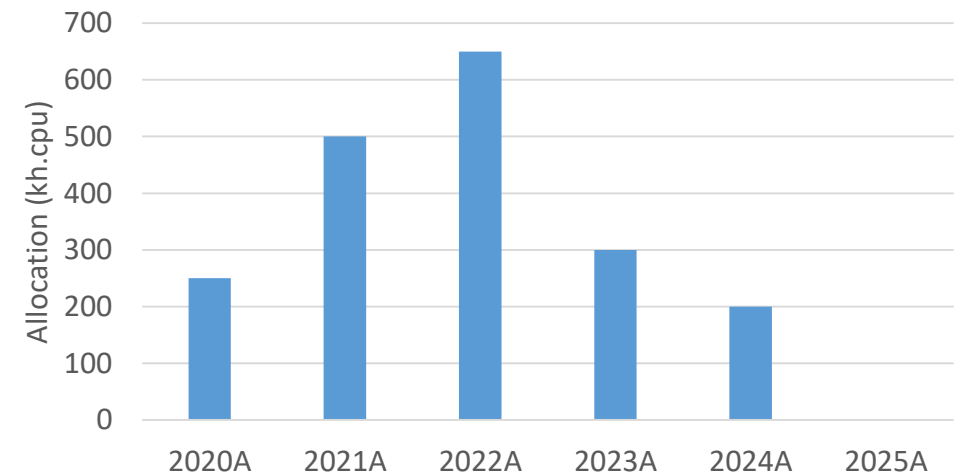
Soutien des équipes techniques précieux: au labo (IR calcul), dans les mésocentres et aux centres nationaux.

- Assistance sur les tâches techniques
- Transfert de compétences
- Explorations de nouveaux usages et technologies
- ...

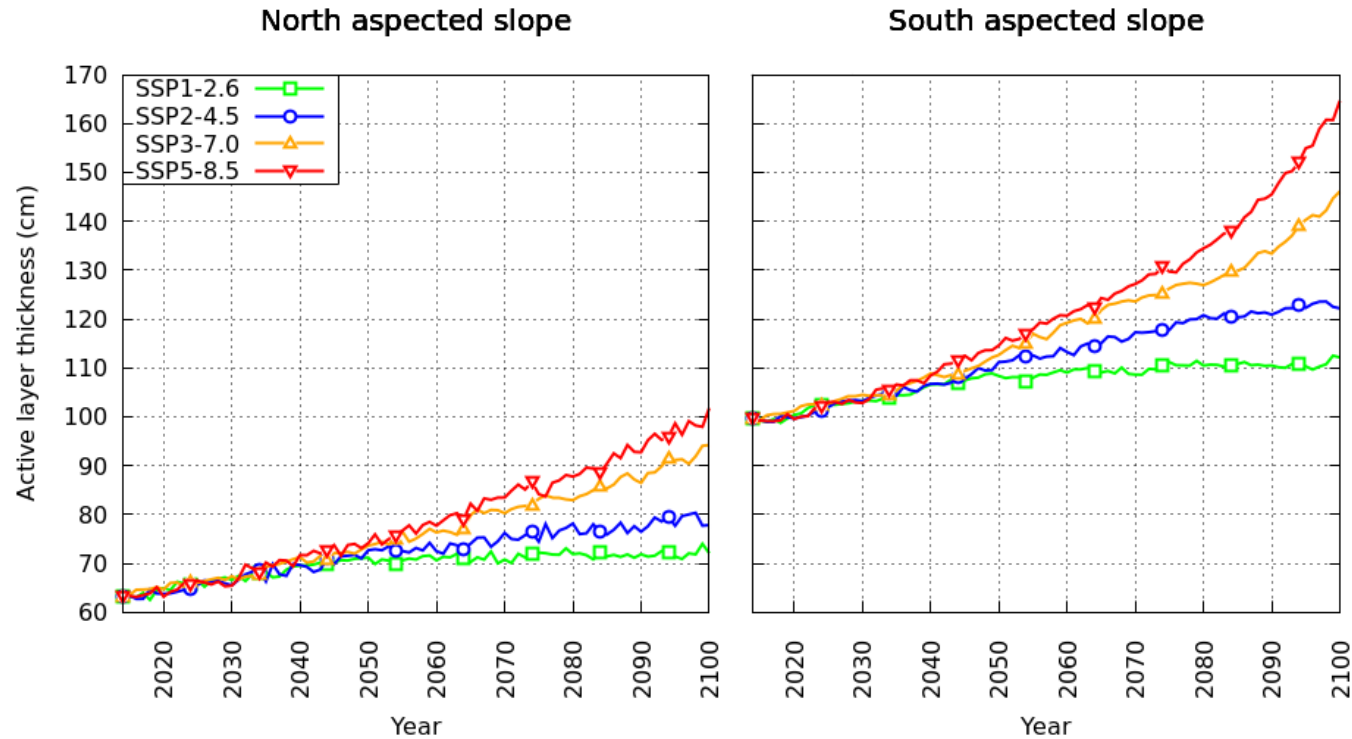
Allocation sur les centres nationaux (CINES/TGCC)



Allocation sur le mésocentre (CALMIP)

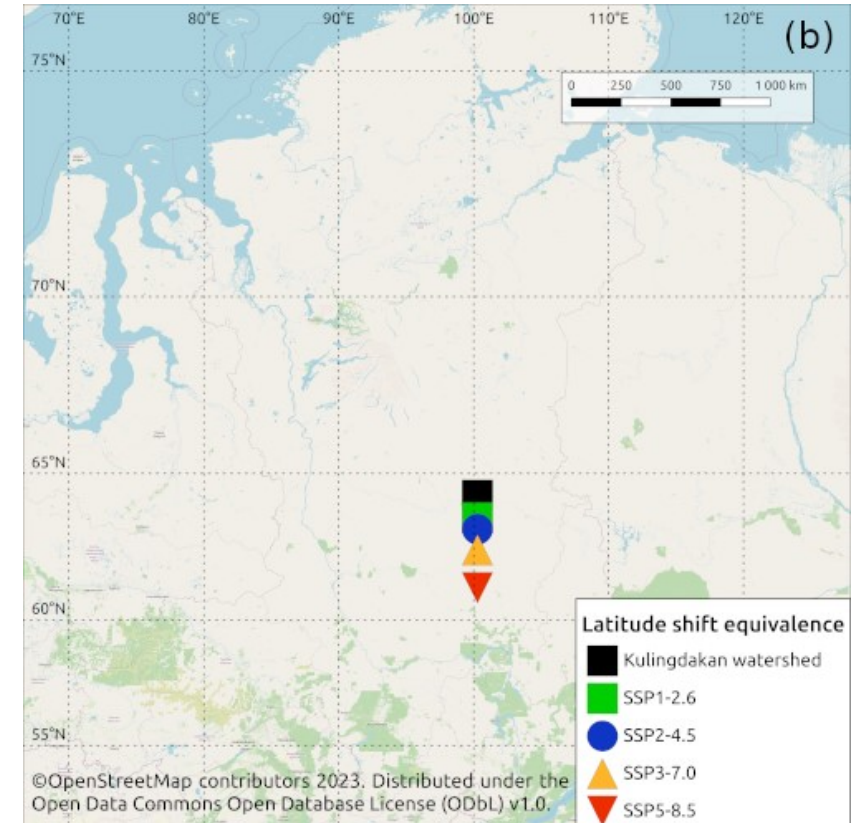


# Projections climatiques jusqu'à 2100 - Résultats



Augmentation de l'épaisseur de couche active (épaisseur max. dégelée en été) au cours du siècle en fonction des scénarios étudiés.

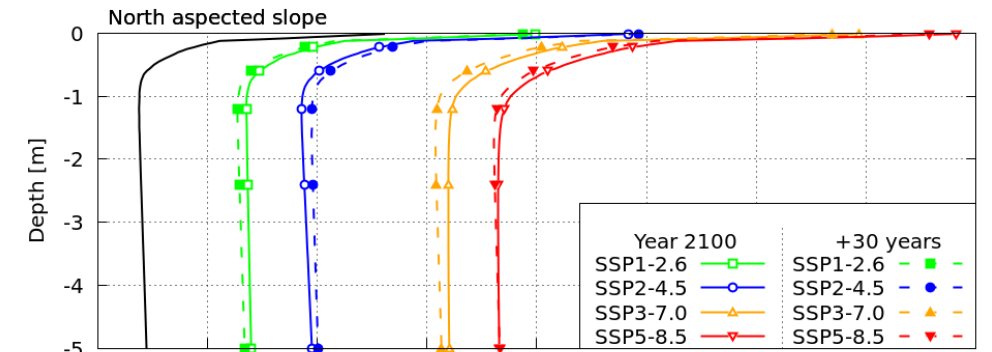
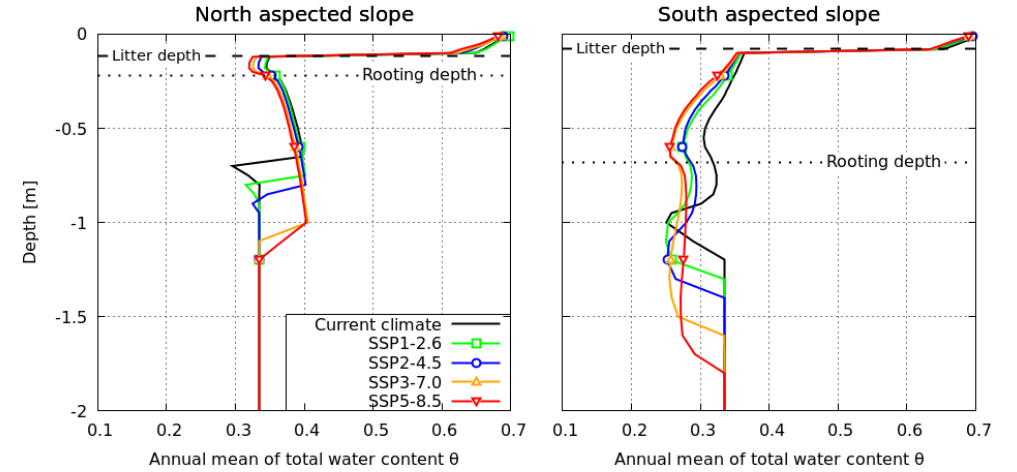
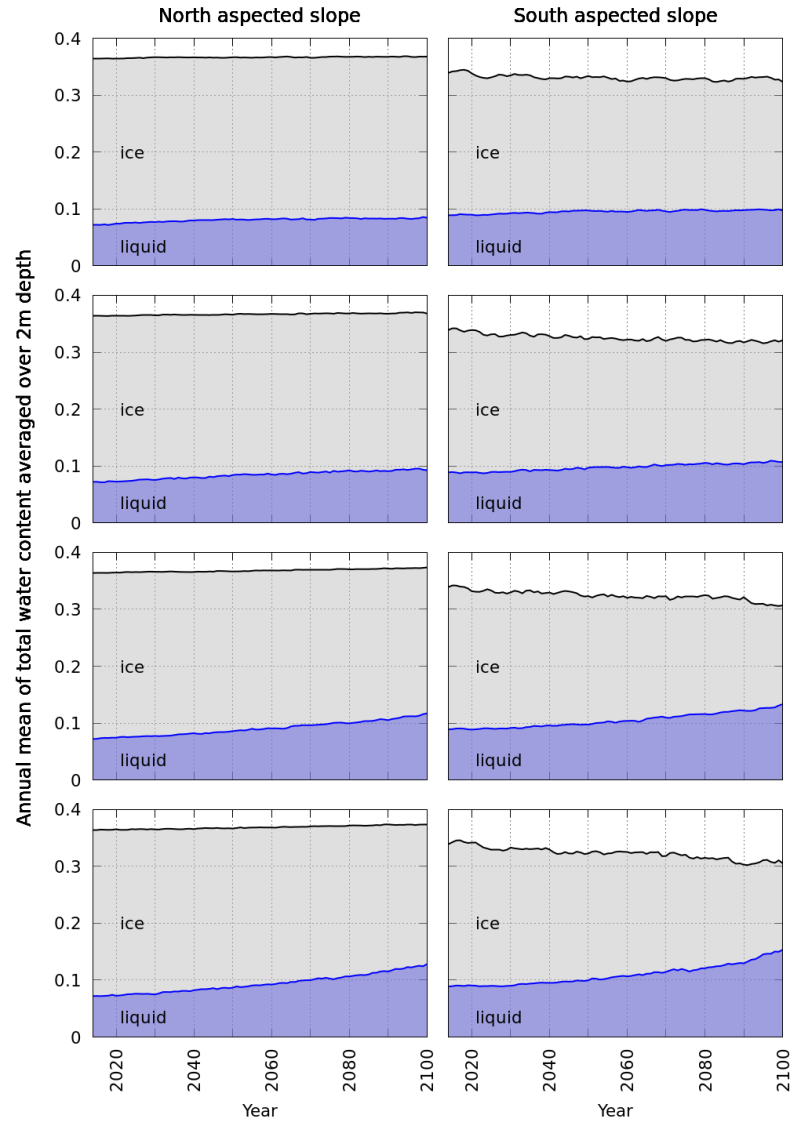
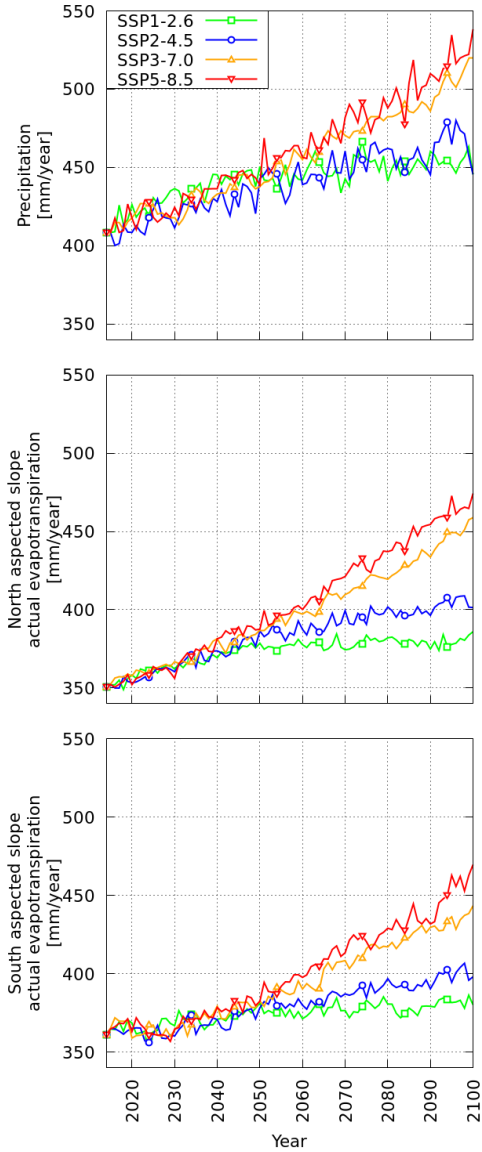
Sur SSP5-8.5, en 2100, la face Nord atteint l'état de la face Sud aujourd'hui



Déplacement, en conditions actuelles, équivalent à l'augmentation d'épaisseur de couche active constatée à la fin du siècle

Shift équivalent jusqu'à 350km vers le Sud.

# Projections climatiques jusqu'à 2100 – Résultats...nombreux !



Pousser l'automatisation jusqu'au post-processing  
 Permet un gain de temps et une flexibilité dans l'exploration  
 Résultats dans Xavier et al. (accepted).

# De l'ouverture et de la FAIRisation des données

Code permaFoam : Code open-source

<https://develop.openfoam.com/Community/hydrology>

Publications

Publications en open access

Dans le cadre de l'ANR : 4 Publications (+2 attendues)

Frais de publication estimés 10.000€

Données de calcul

- Archive (.tar.gz) du code utilisé
- Données journalières
- Dossiers de reprise tous les 25 ans

Portail <https://hiperborea.omp.eu/catalogue/>

Mis en place par le SEDOO

(Service de Données de l'Observatoire Midi-Pyrénées)

\*Métadonnées, keyword

\*API

\*En visibilité depuis DataTerra

The screenshot shows a data portal page with the following content:

- Search bar: SEARCH, 1 RESULT FOUND
- Page title: - Permafrost mechanical simulation with the permaFoam solver in the Kulingdakan watershed (Central Siberia) based on CMIP6 scenarios (2014-2100).
- Navigation tabs: INFORMATION (selected), DOWNLOAD, STATISTICS, INTEROPERABILITY
- Section: Abstract
- Text: This dataset contains the numerical simulations performed as part of the article by Xavier et al. 2024 [1]. It includes four climate scenarios based on CMIP6 projections (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5), which were used to perform mechanical simulations of permafrost dynamics between 2014 and 2100 in a central Siberian catchment (Kulingdakan River head catchment). The code permaFoam (Orgogozo et al., 2023) is used on a domain divided into two slopes (North Aspected Slope - NAS - and South Aspected Slope - SAS).
- Footnote [1]: Xavier et al., Future permafrost degradation under climate change in a headwater catchment of Central Siberia: quantitative assessment with a mechanistic modelling approach - The Cryosphere, under review. <https://doi.org/10.5194/cryosphere-2023-3074>
- Footnote [2]: Orgogozo et al., Permafrost modelling with OpenFOAM: New advancements of the permaFoam solver. Computer Physics Communications, Volume 282, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2022.108541>.
- Section: Spatial extents
- Map: A map showing the spatial extent of the simulation domain in a central Siberian catchment, with a red rectangle indicating the specific area of interest.

The screenshot shows a 'Data Download' interface with the following content:

- Section: Data Download
- Checkbox:  I agree to the Data Policy
- Total size: 3.8 GB
- Buttons: DOWNLOAD ALL IN BROWSER, DOWNLOAD ALL WITH SCRIPT
- Section: /SSP\_Scenarios/
- Section: PARENT DIRECTORY
- Table of scenarios:

SSP1-2.6	22/08/2024 16:45:32	⋮
SSP2-4.5	22/08/2024 16:46:17	⋮
SSP3-7.0	22/08/2024 16:47:04	⋮
SSP5-8.5	22/08/2024 16:47:59	⋮

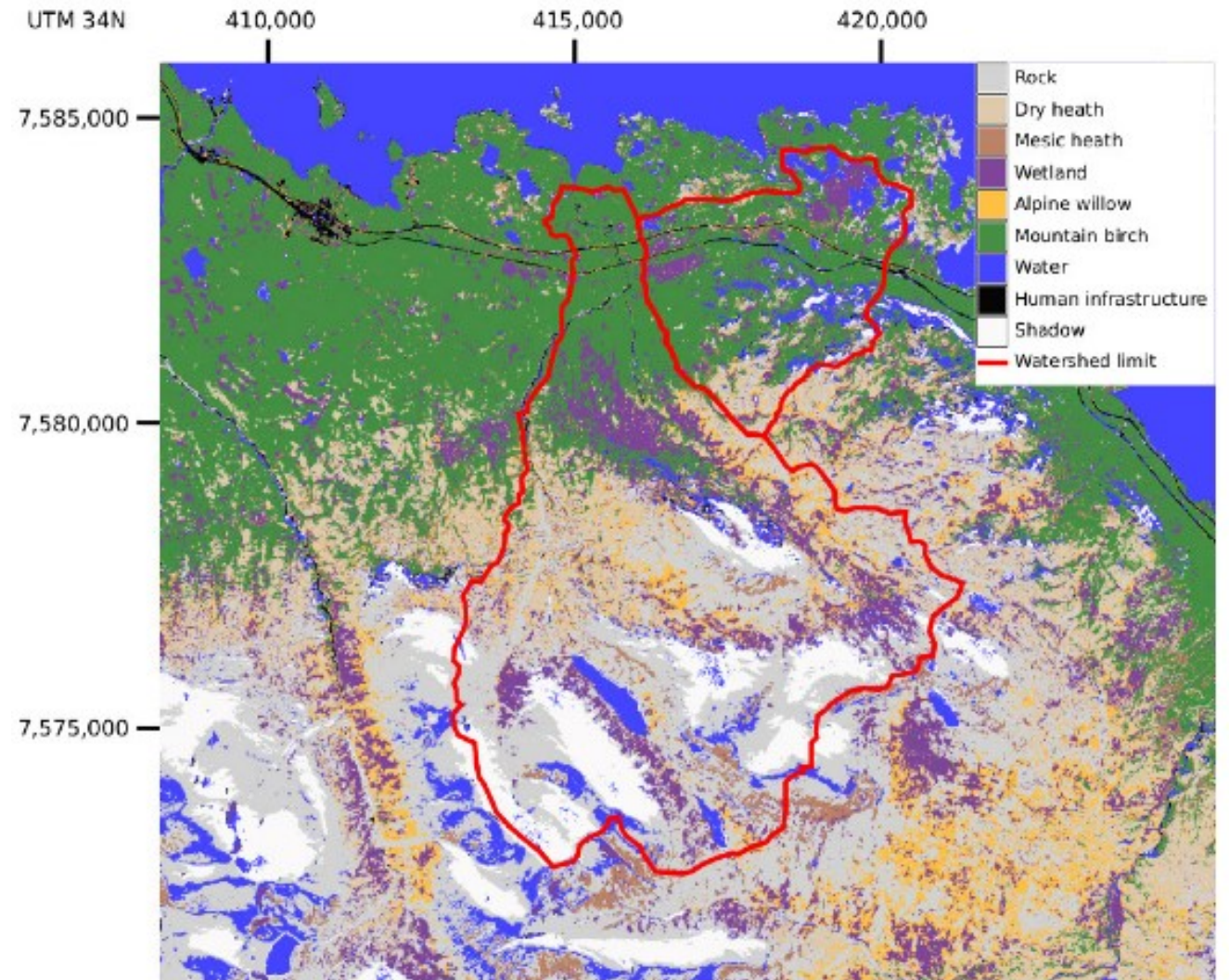
# Vers d'autres sites... et de nouveaux enjeux pour le calcul et les données !

Bassin versant d'Abisko (Nord de la Suède)

Forte hétérogénéité de l'occupation du sol

Problématiques :

- Cartographier l'occupation du sol et son évolution
- Couvert neigeux, évolution des lacs
- Obtention de la température sous la végétation
- ➔ Intérêt de la donnée satellite (+ mesure in situ)
- Calcul fortement 3D, plus de géométrie simplifiée !



Classification par méthode Support Vector Machine  
Auda et al. (2023)

**Merci pour votre attention !**

# **Apport du calcul haute performance pour la simulation numérique des pergélisols sous changement climatique à l'échelle locale**

Projet ANR HiPerBorea (2019-2025) - <https://hiperborea.omp.eu>

Thibault XAVIER<sup>1</sup>, Laurent ORGOGOZO<sup>2</sup>

1 – CNES (Centre National des Etudes Spatiales)

2 – GET (Géosciences Environnement Toulouse), Université de Toulouse

