

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

Projet ANR HiPerBorea (2019-2025)

Thibault XAVIER¹, Laurent ORGOGOZO²

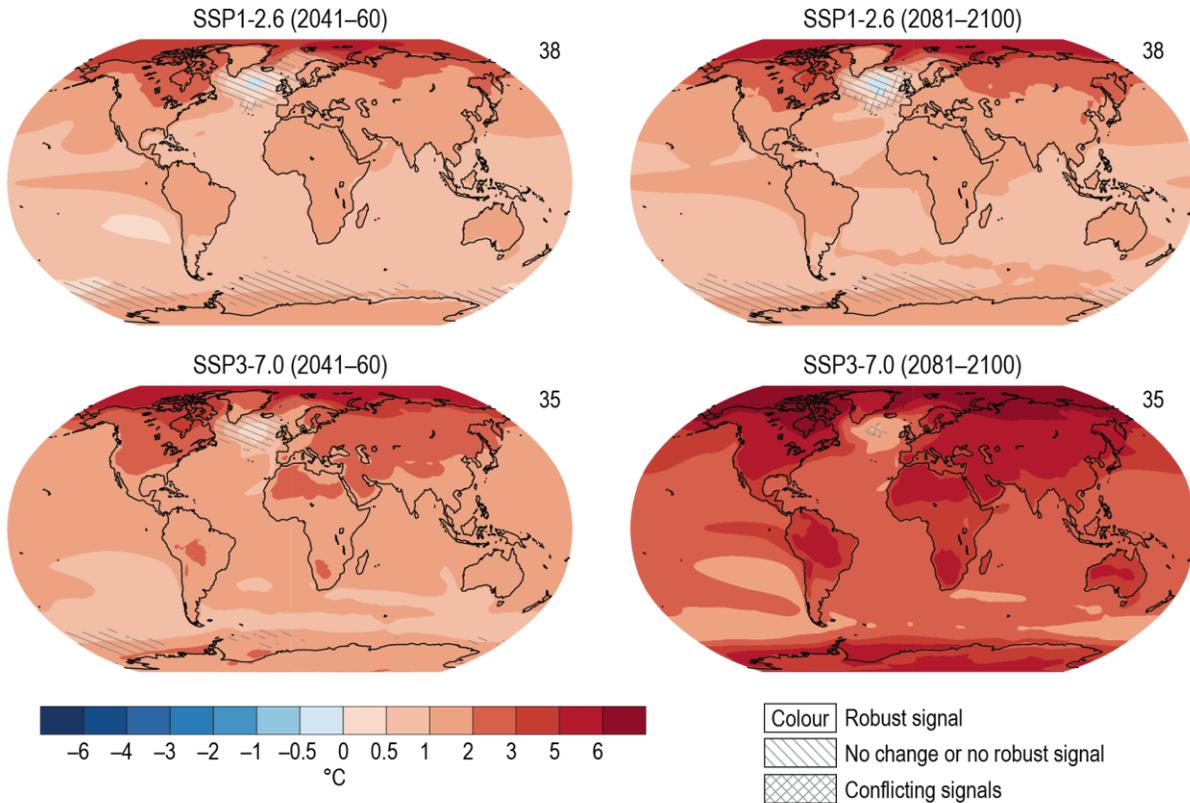
1 – CNES (Centre National des Etudes Spatiales)

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



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(10km²))
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

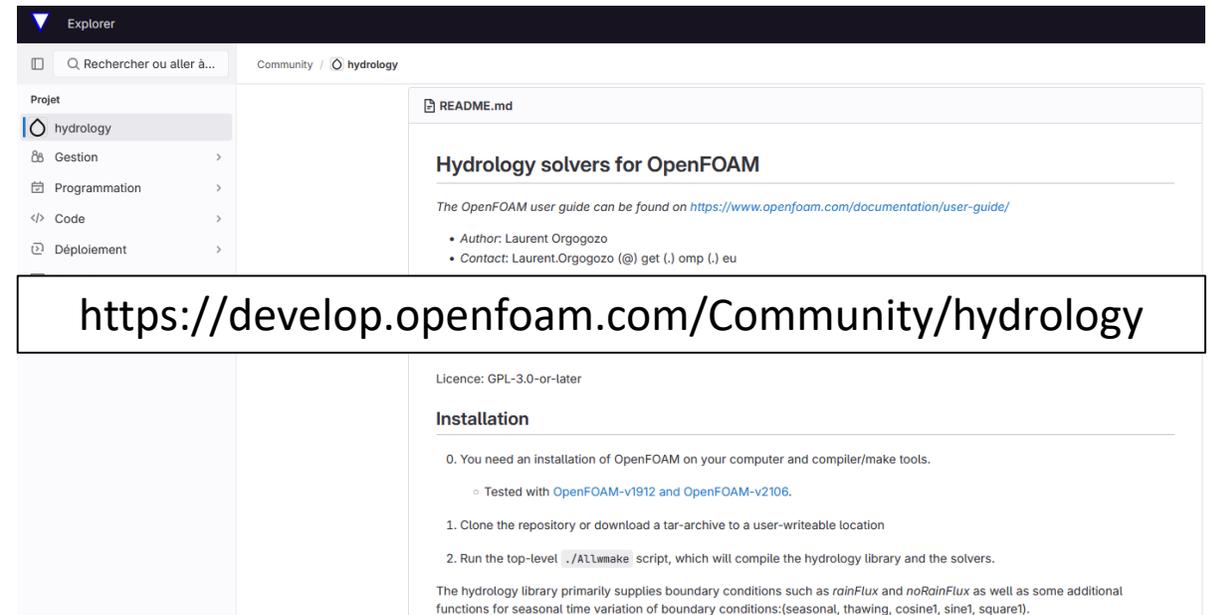
Variably saturated, variably frozen porous media

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'. The README content includes the following information:

- The OpenFOAM user guide can be found on <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/>
- Author: Laurent Orgogozo
- Contact: Laurent.Orgogozo (@) get (.) omp (.) eu

The repository is licensed under 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)`.

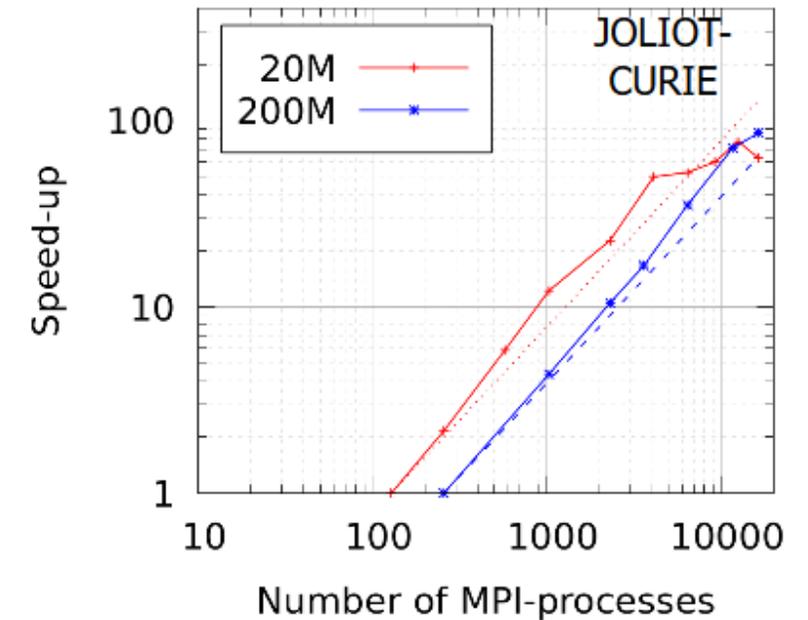
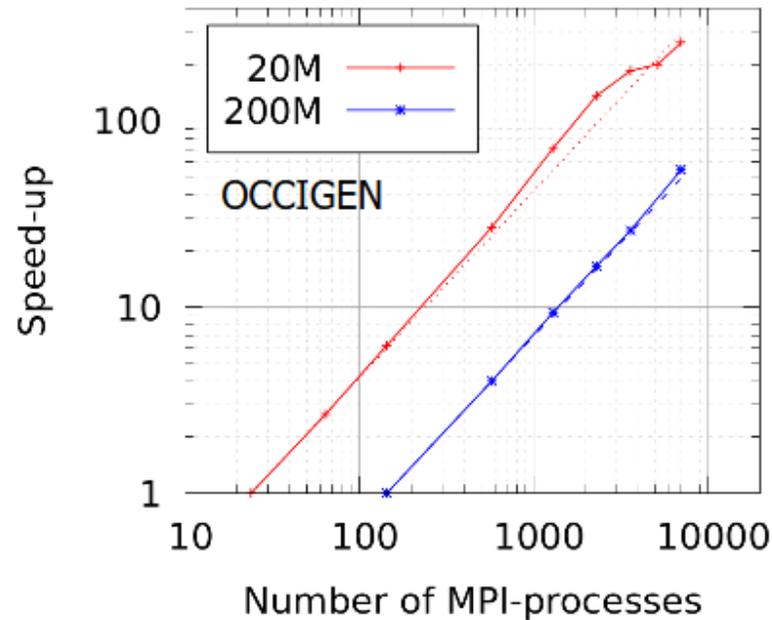
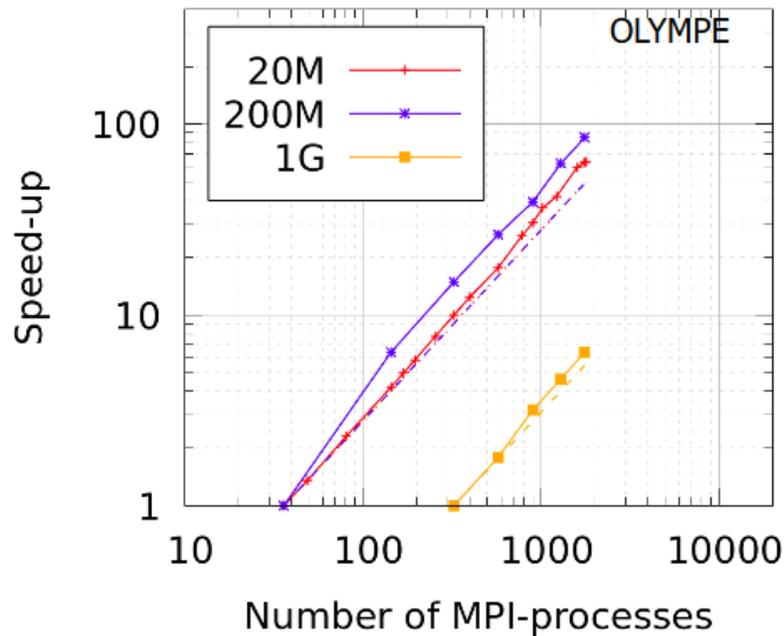
<https://develop.openfoam.com/Community/hydrology>

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

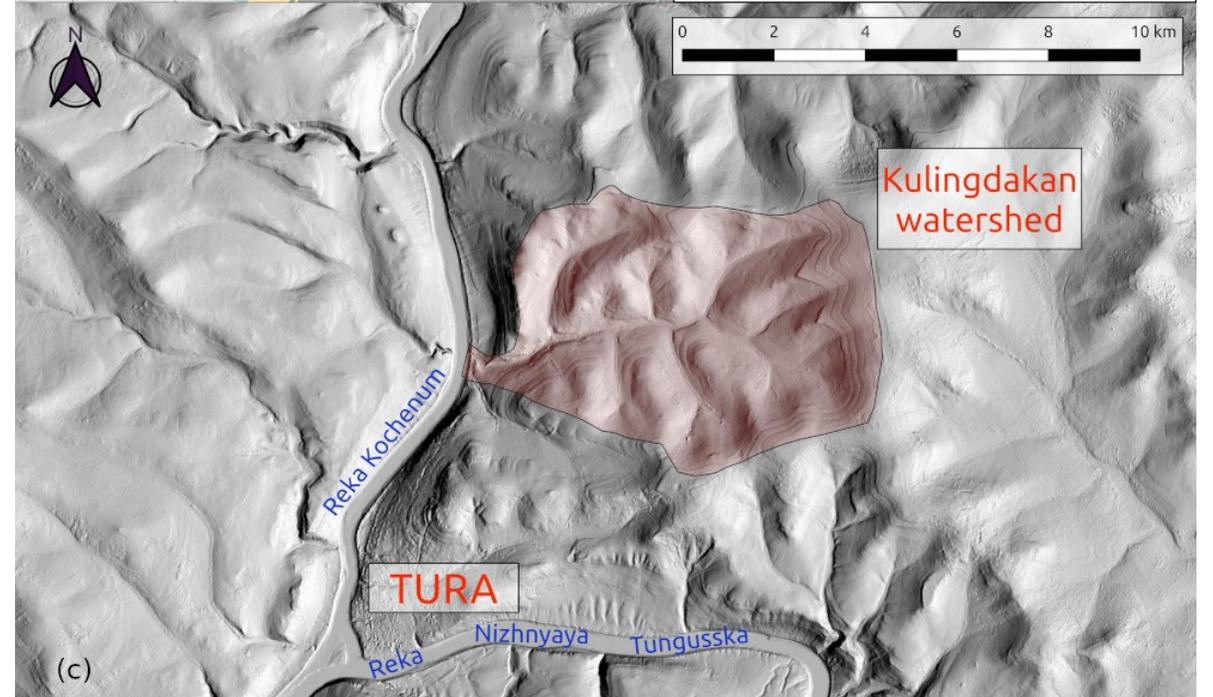
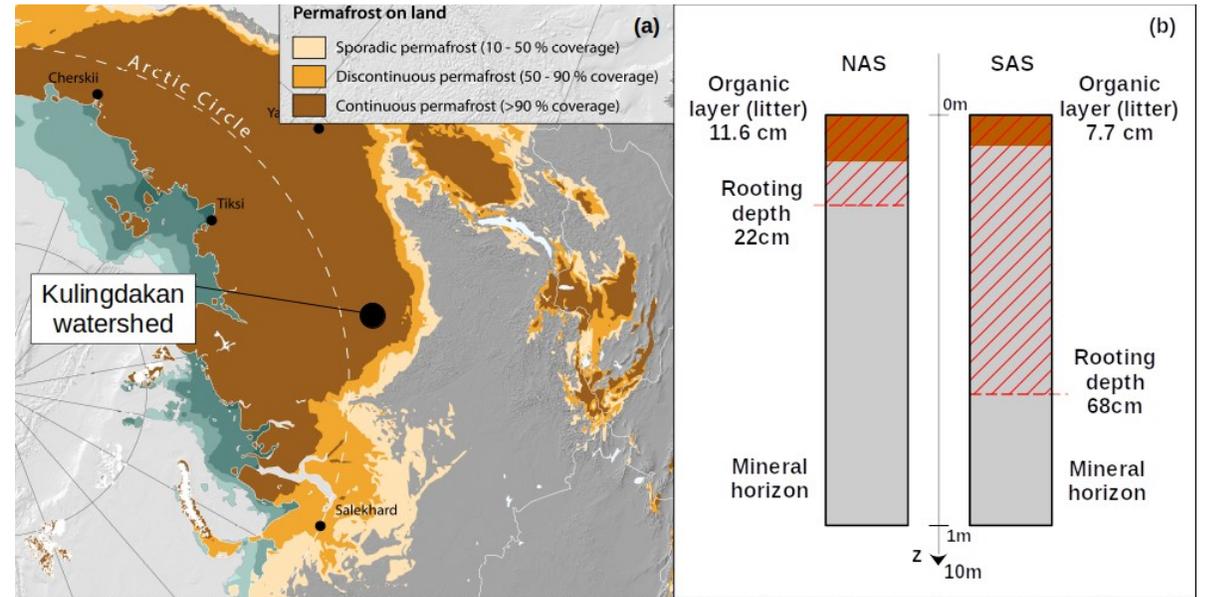
Surface : 41 km² divisée en deux versants

Altitude : 132m - 630m

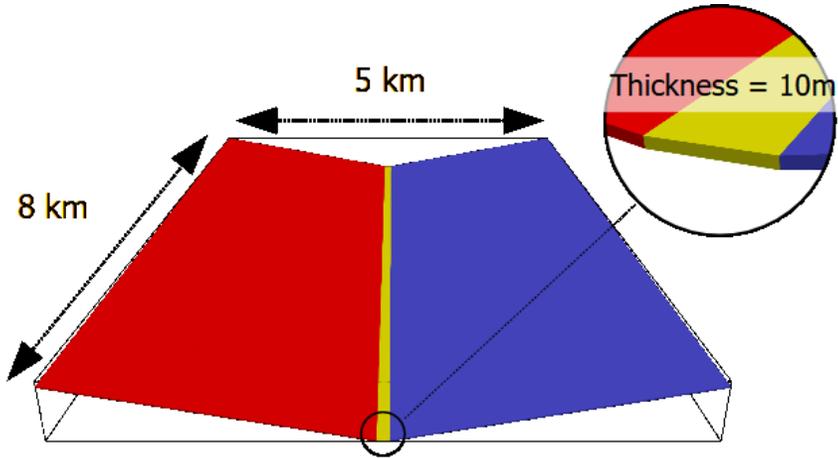
Température moyenne annuelle : -8°C

Précipitations annuelles : 400mm/an

Végétation : forêt de mélèze, buissons, mousses, lichens



Calculs à Kulingdakan en conditions actuelles

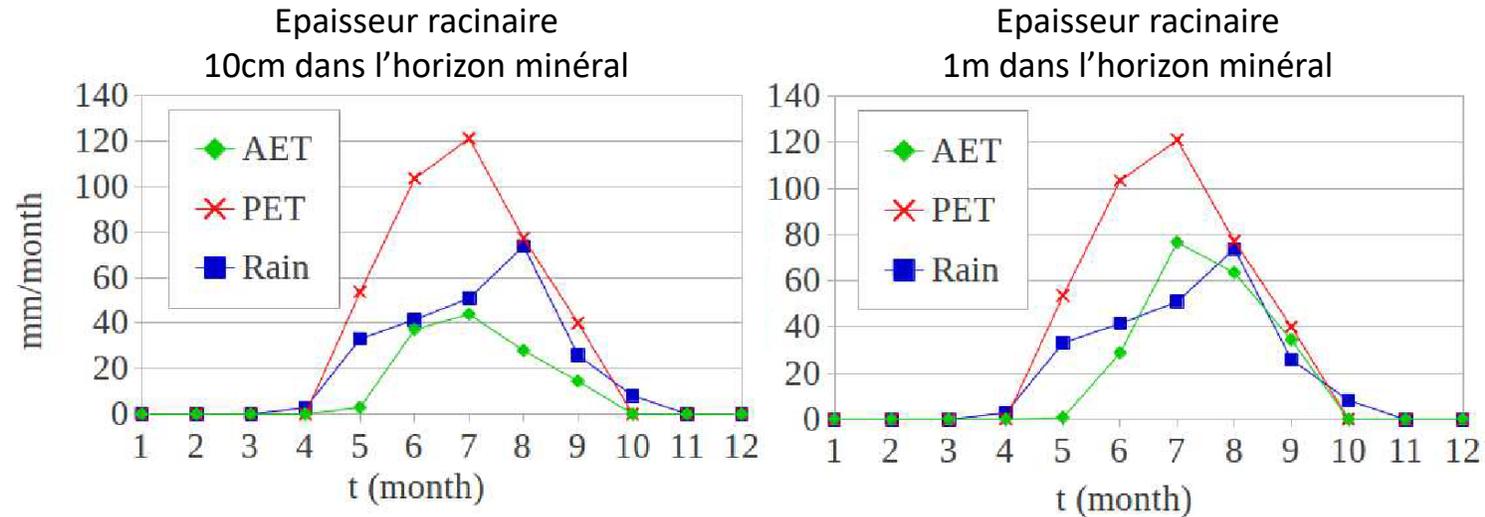


South Aspected Slope River North Aspected Slope

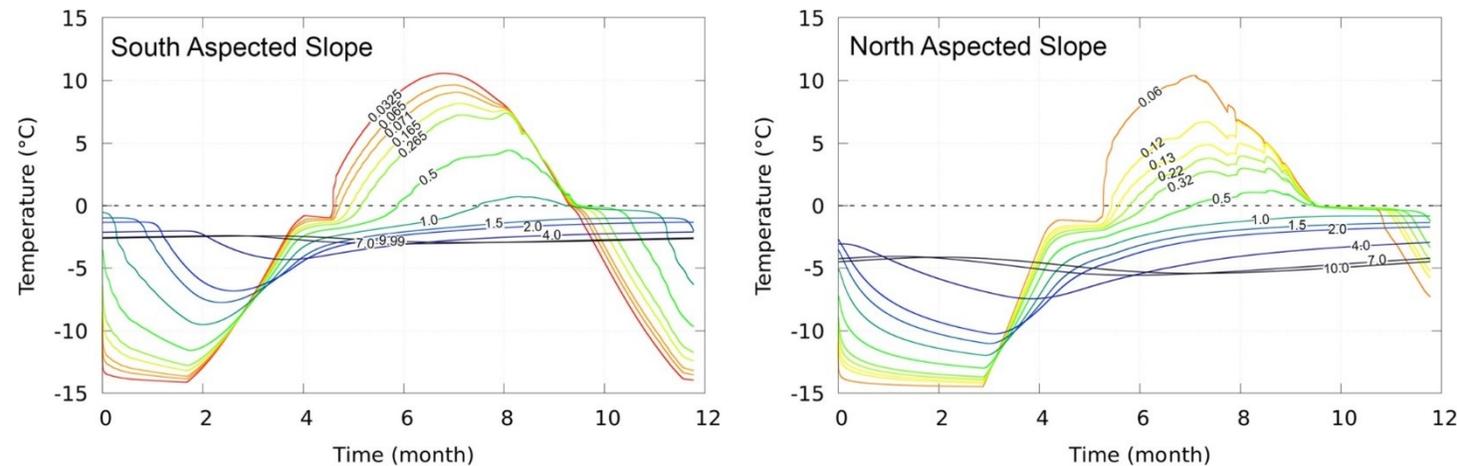
- 3 Patches : Nord / Sud / Rivière
- Conditions aux limites instationnaires
- Maillage non uniforme (raffiné en surface)
- Grilles jusqu'à 500M de points pour le 3D
- Δt adaptatif (~1s-10s)
- Plusieurs années à simuler (cyclage)
- Quelques semaines de simulation...

➔ 2D représentatif

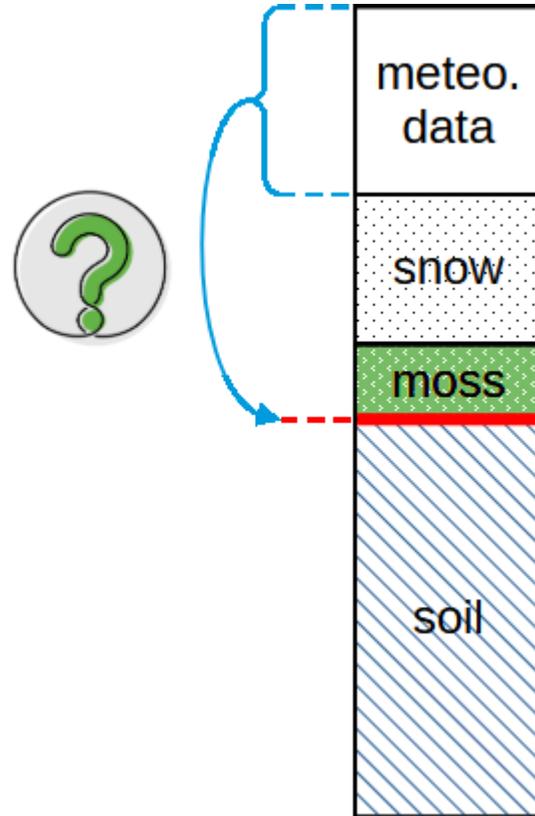
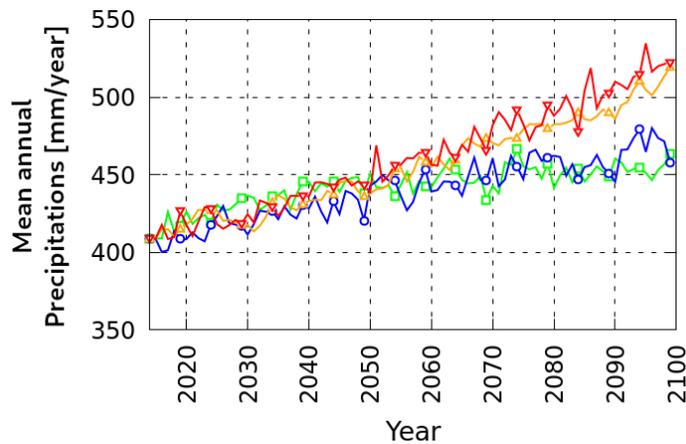
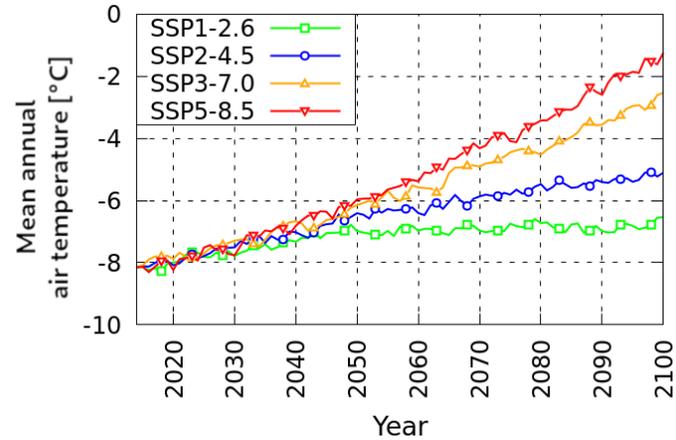
Impact de l'épaisseur racinaire sur le bilan hydrique sur le versant orienté Nord Orgogozo et al. (2019)



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

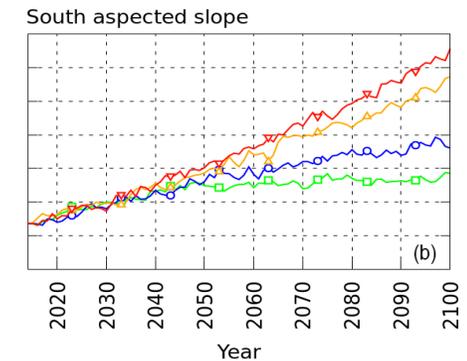
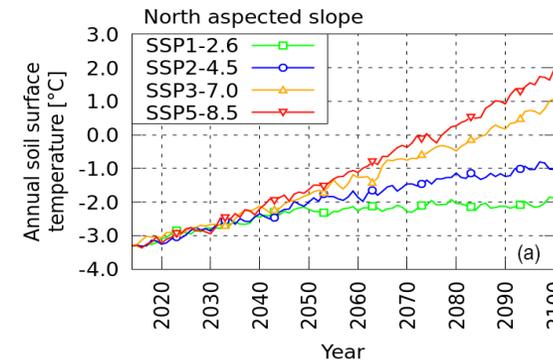


Construire des scénarios climatiques - prérequis 1 : des données



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

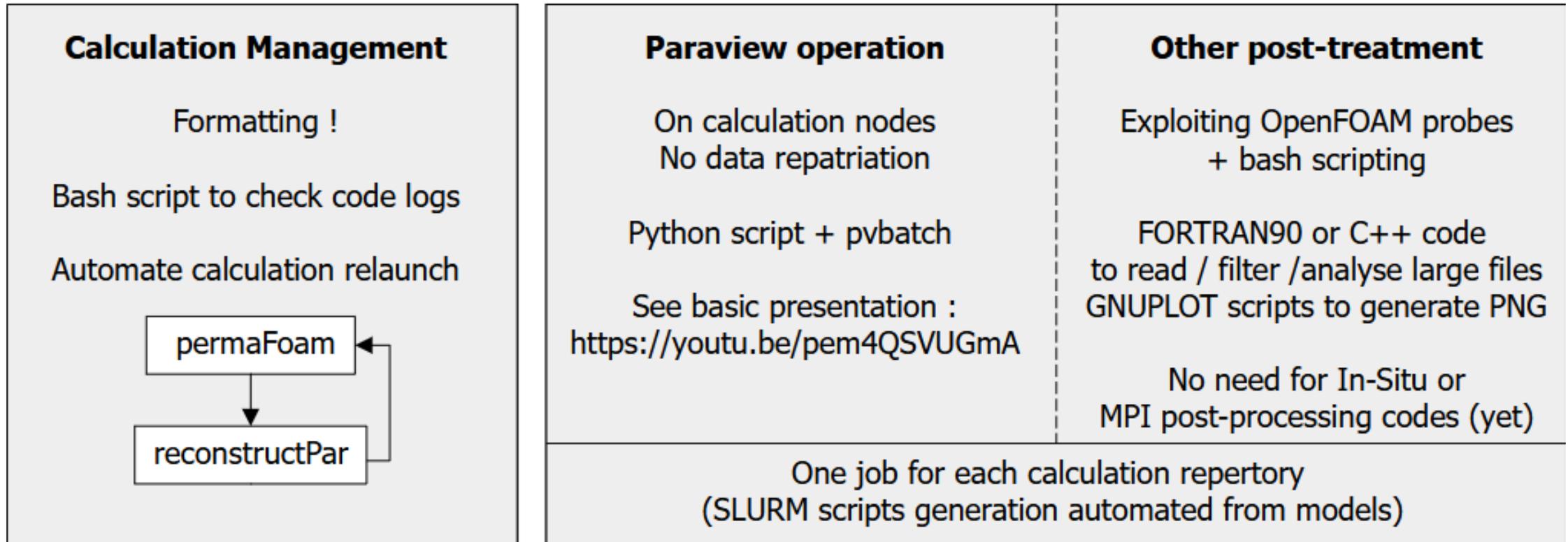
Comment construire, exécuter (sans erreur) et analyser 4 scénarios CMIP6 x 2 versants x 87 ans (2014-2100)

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

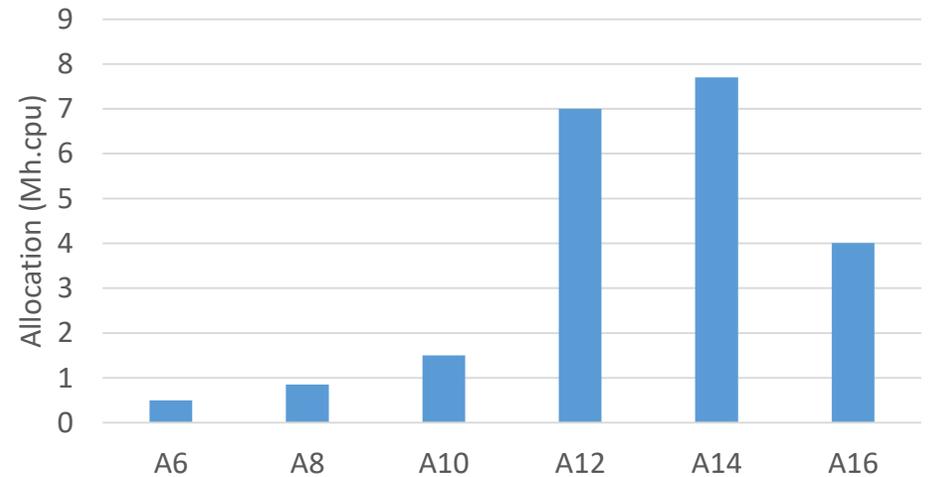
Passage à l'échelle : transition du mésocentre vers le centre national

Soutien continu du mésocentre : environnement de développement

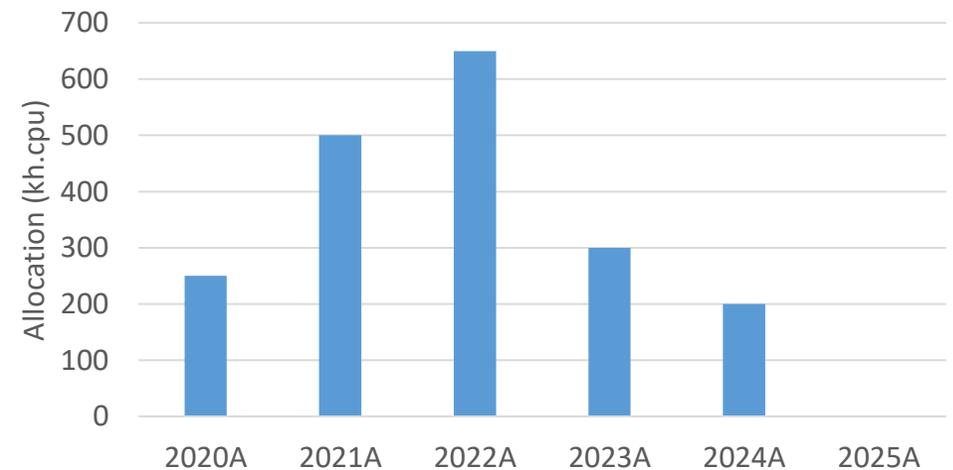
Soutien des équipes techniques précieux: au labo (IR calcul), dans les mésocentres et aux centres nationaux.

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

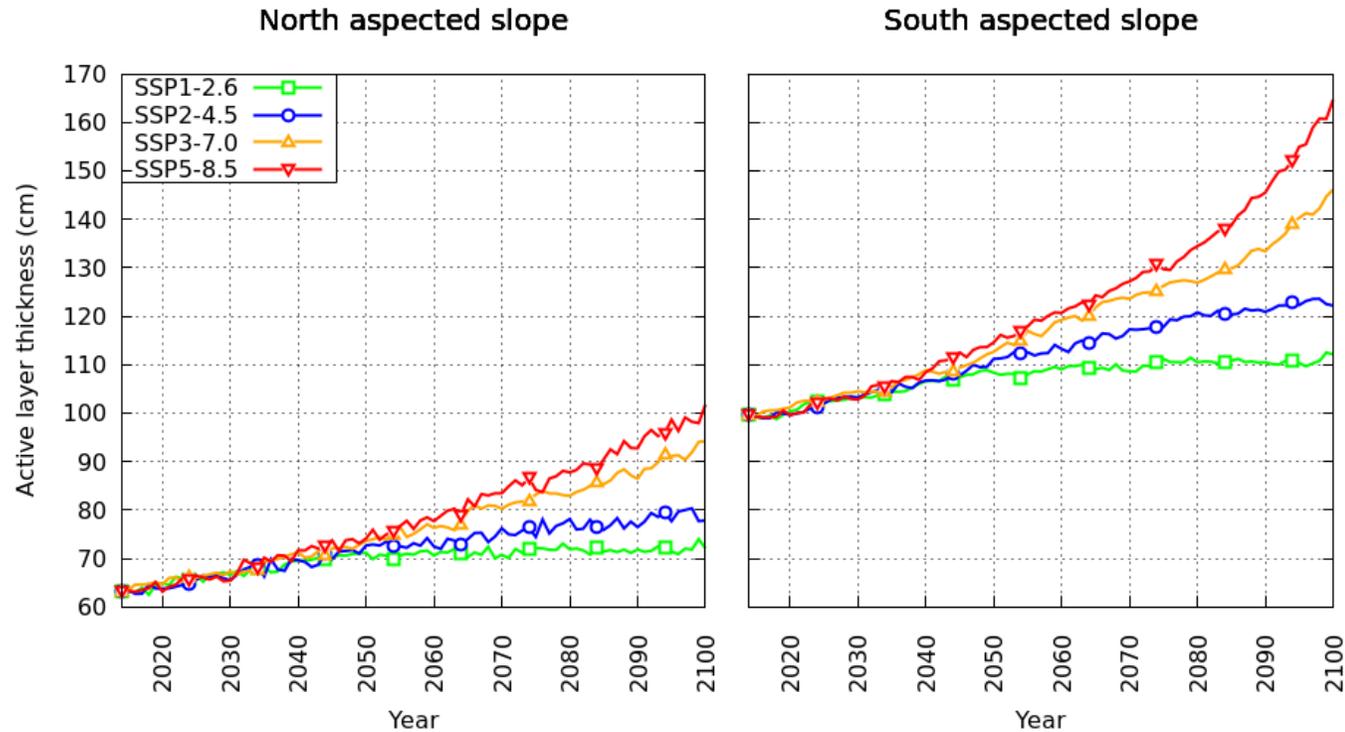
Allocation sur les centres nationaux (CINES/TGCC)



Allocation sur le mésocentre (CALMIP)

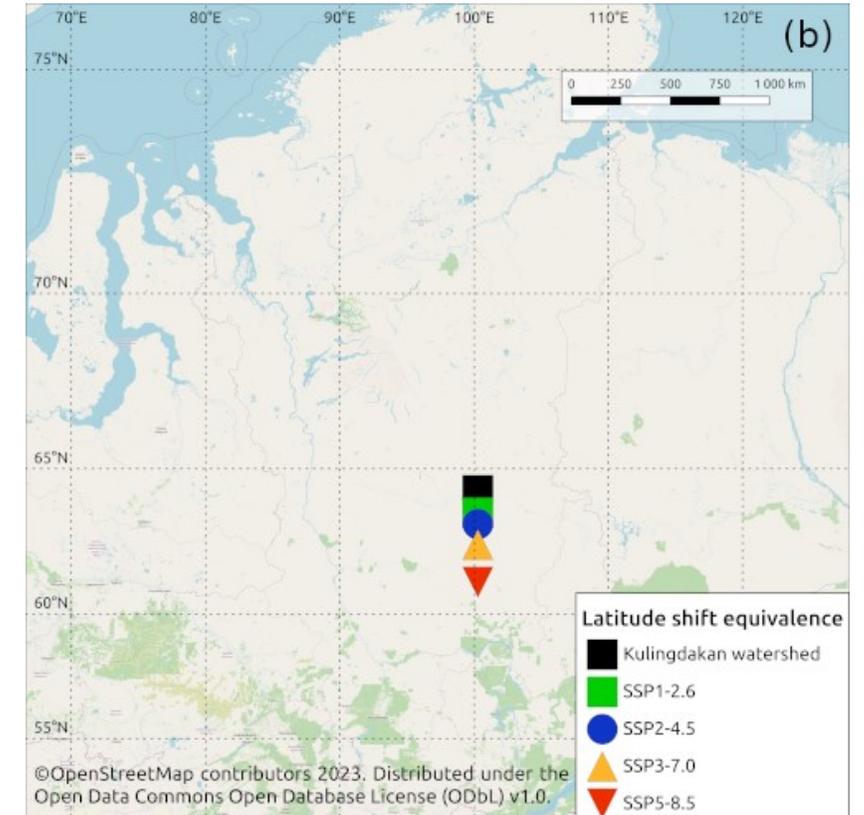


Projections climatiques jusqu'à 2100 - Résultats



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

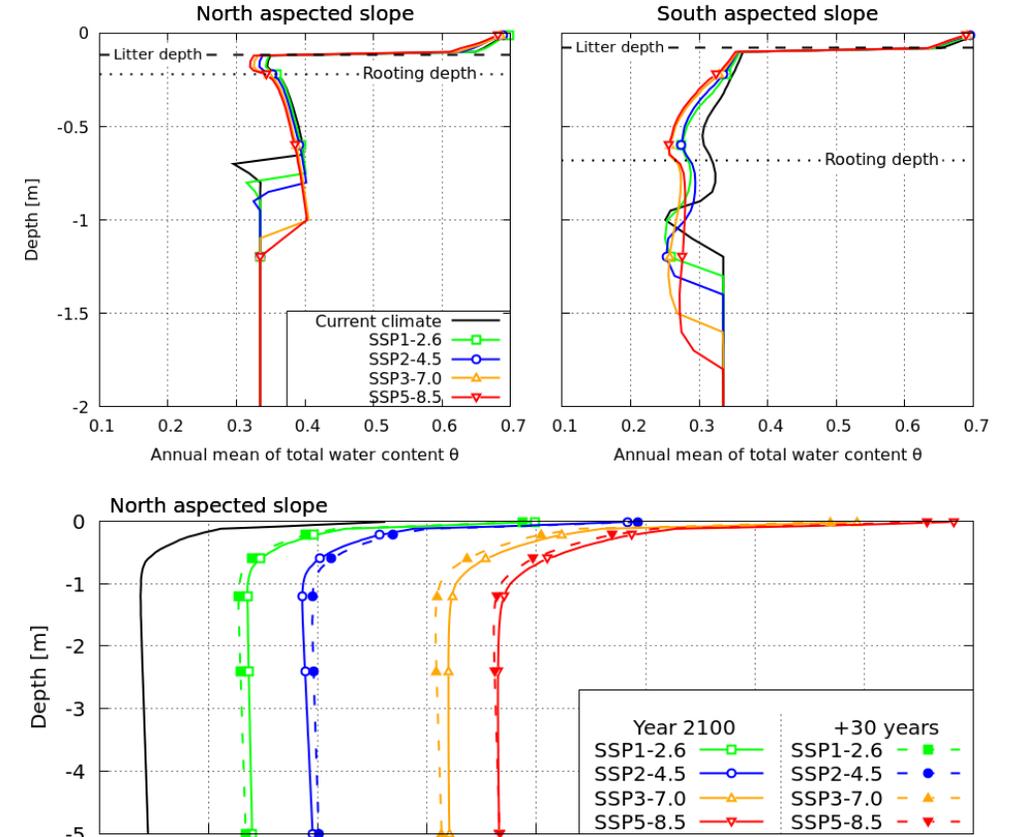
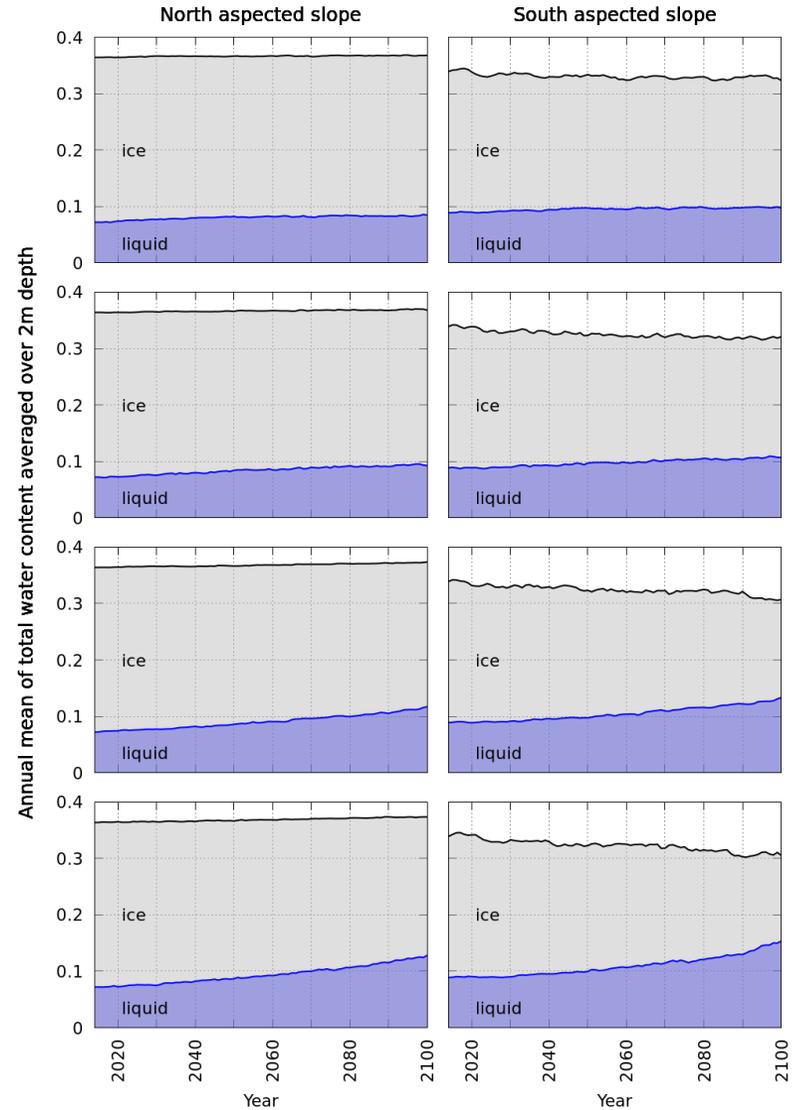
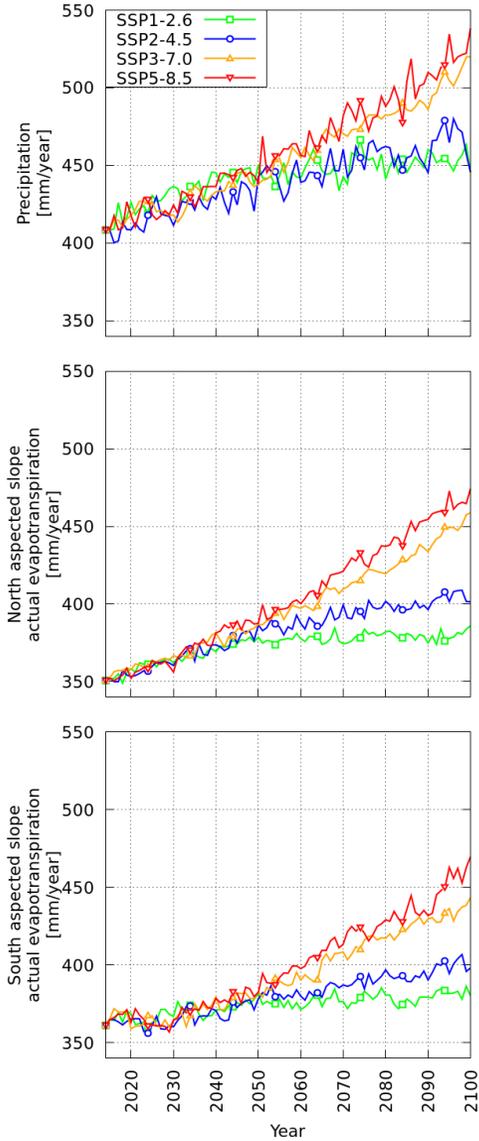
Sur SSP5-8.5, en 2100, la face Nord atteint l'état de la face Sud aujourd'hui



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 catalog entry for a permafrost simulation. The title is "Permafrost mechanical simulation with the permaFoam solver in the Kulingdakan watershed (Central Siberia) based on CMIP6 scenarios (2014-2100)". The entry includes an abstract, a list of references, and a spatial extent map. The map shows a watershed area in Central Siberia, with a red rectangle indicating the simulation domain. The entry is part of a search result for "HIPERBOREA".

The screenshot shows a "Data Download" interface. It includes a checkbox for "I agree to the Data Policy" and a "Total size: 3.8 GB" indicator. There are two buttons: "DOWNLOAD ALL IN BROWSER" and "DOWNLOAD ALL WITH SCRIPT". Below the buttons, there is a list of data directories under the path "/SSP_Scenarios/". The list includes "PARENT DIRECTORY" and four sub-directories: "SSP1-2.6", "SSP2-4.5", "SSP3-7.0", and "SSP5-8.5". Each sub-directory has a timestamp and a three-dot menu icon.

Directory	Timestamp
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

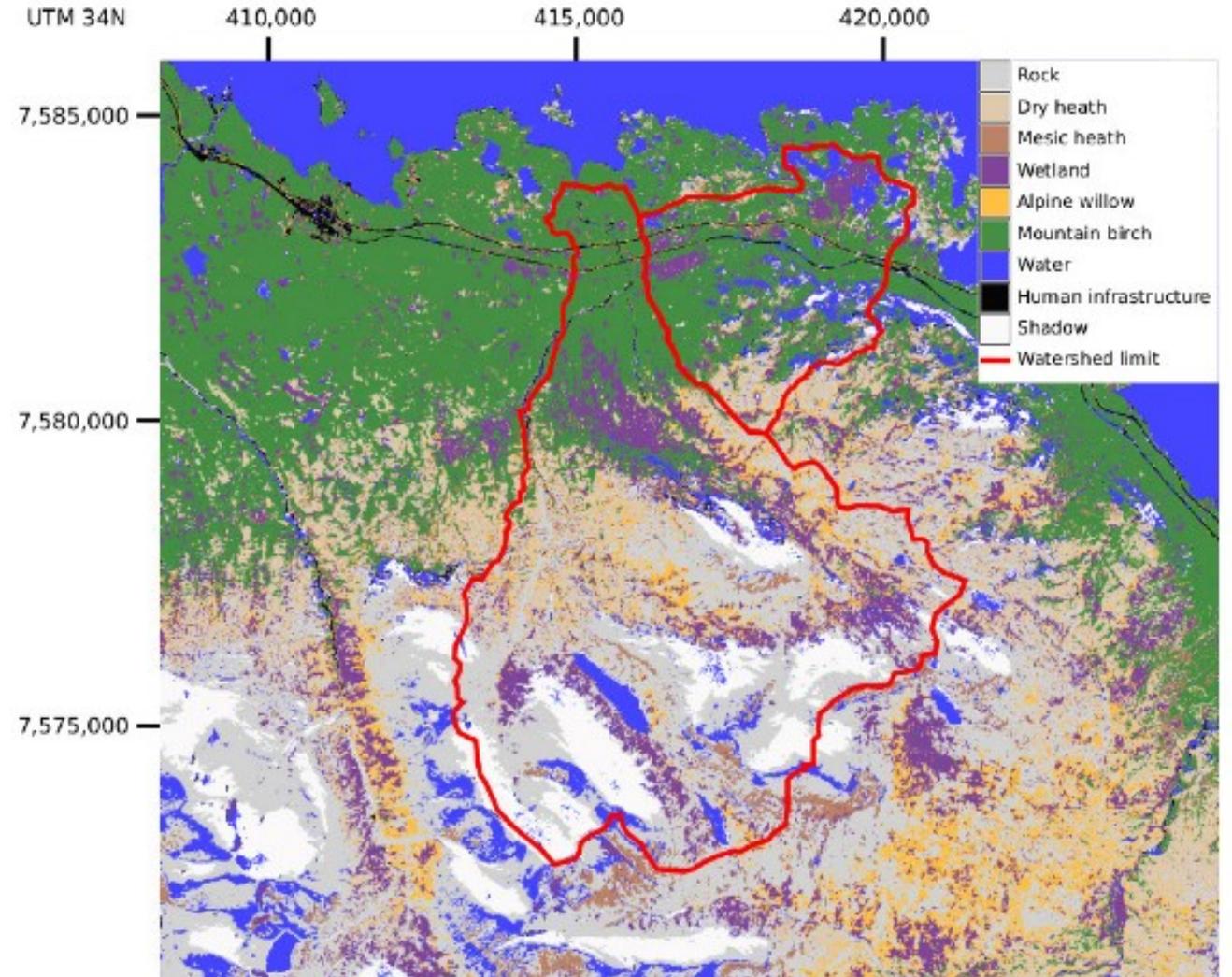
Vers d'autres sites... et de nouveaux enjeux pour le calcul et les données !

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 XAVIER¹, Laurent ORGOGOZO²

1 – CNES (Centre National des Etudes Spatiales)

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

