



Application d'OpenFOAM® sur supercalculateurs pour la modélisation du permafrost

Orgogozo L.¹, Grenier C.², Quintard M.^{3,4}, Prokushkin A.S.⁵, Pokrovsky O.S.^{1,6}, Viers J.¹, Audry S.¹.

¹ Géosciences Environnement Toulouse (GET), Observatoire Midi-Pyrénées, Université Paul Sabatier, Université de Toulouse, 14 avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, FRANCE

² Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), Université Paris-Saclay, UMR 8212 CNRS-CEA-UVSQ, Orme des merisiers, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, FRANCE

³ Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT) - Université de Toulouse, CNRS-INPT-UPS, Toulouse, FRANCE

⁴ Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS); IMFT, F-31400 Toulouse, FRANCE

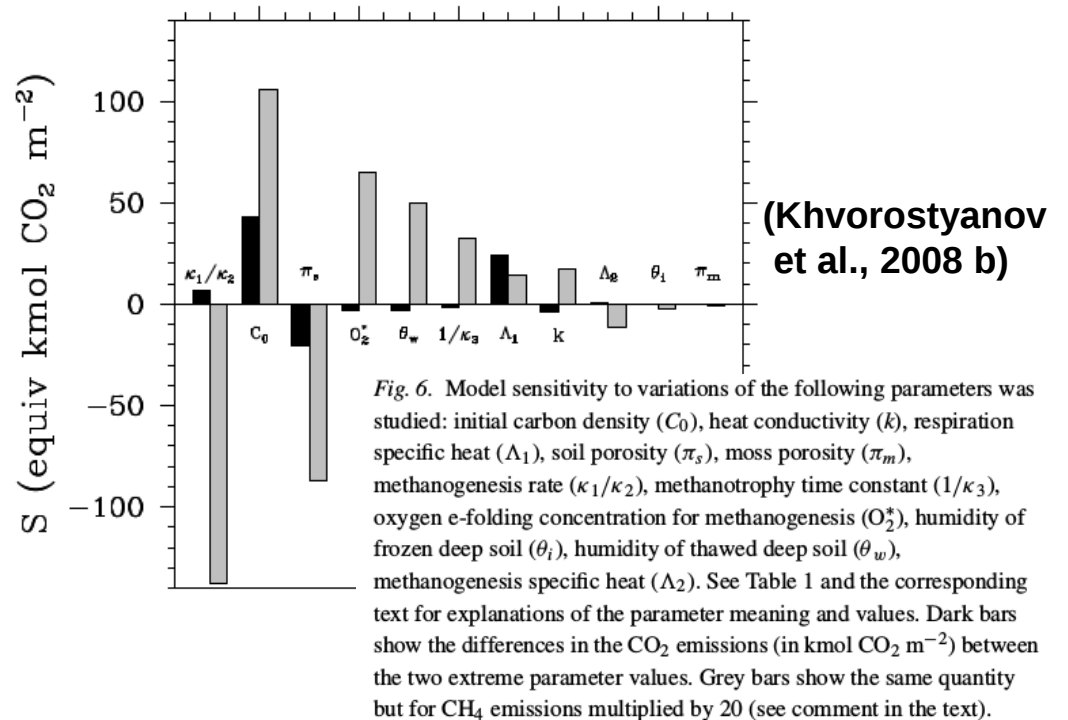
⁵ V.N. Sukachev Institute of Forest, SB RAS, Akademgorodok, RUSSIAN FEDERATION

⁶ BIO-GEO-CLIM Laboratory, Tomsk State University, Lenina 35, Tomsk, RUSSIAN FEDERATION

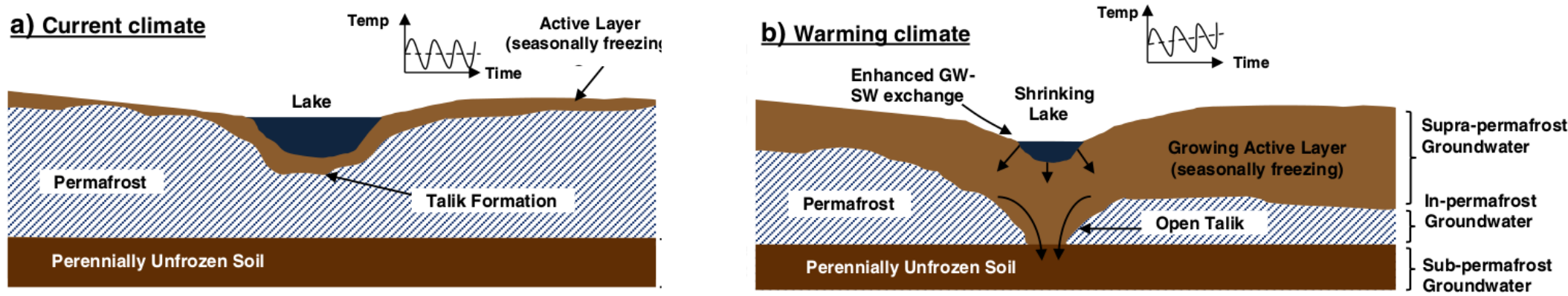
Modélisation du permafrost : impacts du changement climatique sur les régions boréales ?



Permafrost en cours de dégel en Sibérie (Imageo, Guido Grosse)



Modélisation du permafrost : impacts du changement climatique sur les régions boréales ?



(adapted from Kurylyk et al., 2014)

Impacts potentiellement importants sur les ressources en eau souterraine

Impacts sévères sur la stabilité des constructions

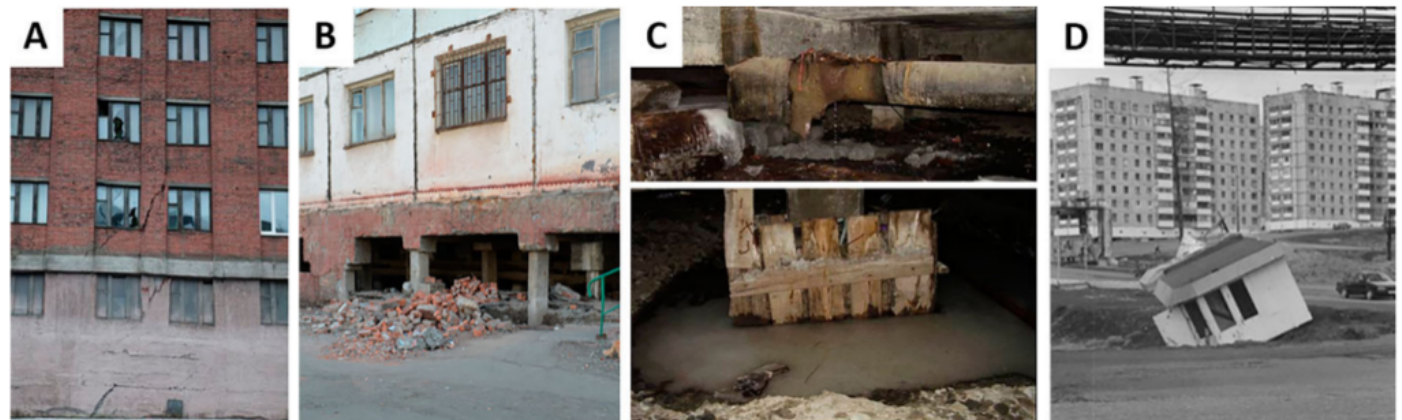


Figure 2. (a) Example of structural deformation of building caused by inadequate structural design exacerbated by permafrost warming. (b) Example of cryogenic weathering of the foundation. (c) Water leakage and accumulation around foundation piles. (d) Ground settlement developed under small heated kiosk due to permafrost degradation (Photographs by V.I. Grebenets and N.I. Shiklomanov). (Shiklomanov et al., 2017)

Applications potentielles en ingénierie : les mur de glaces autour de Fukushima

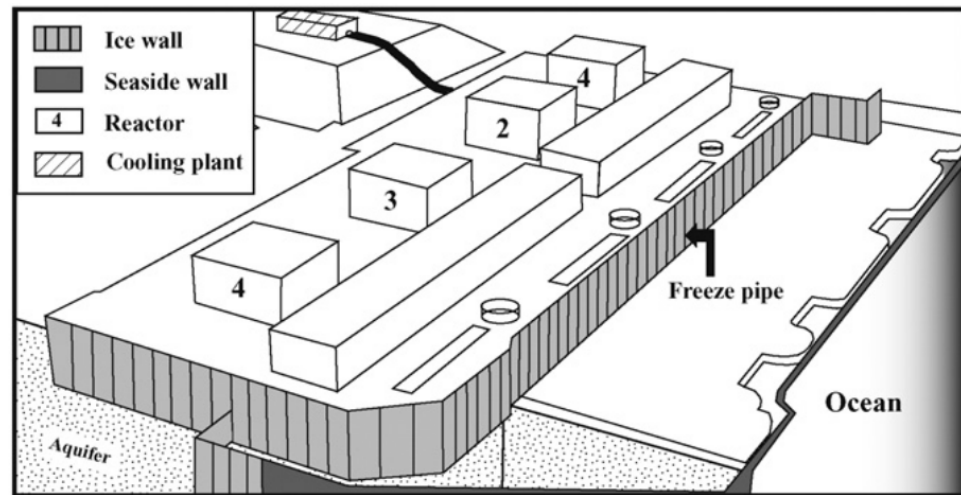
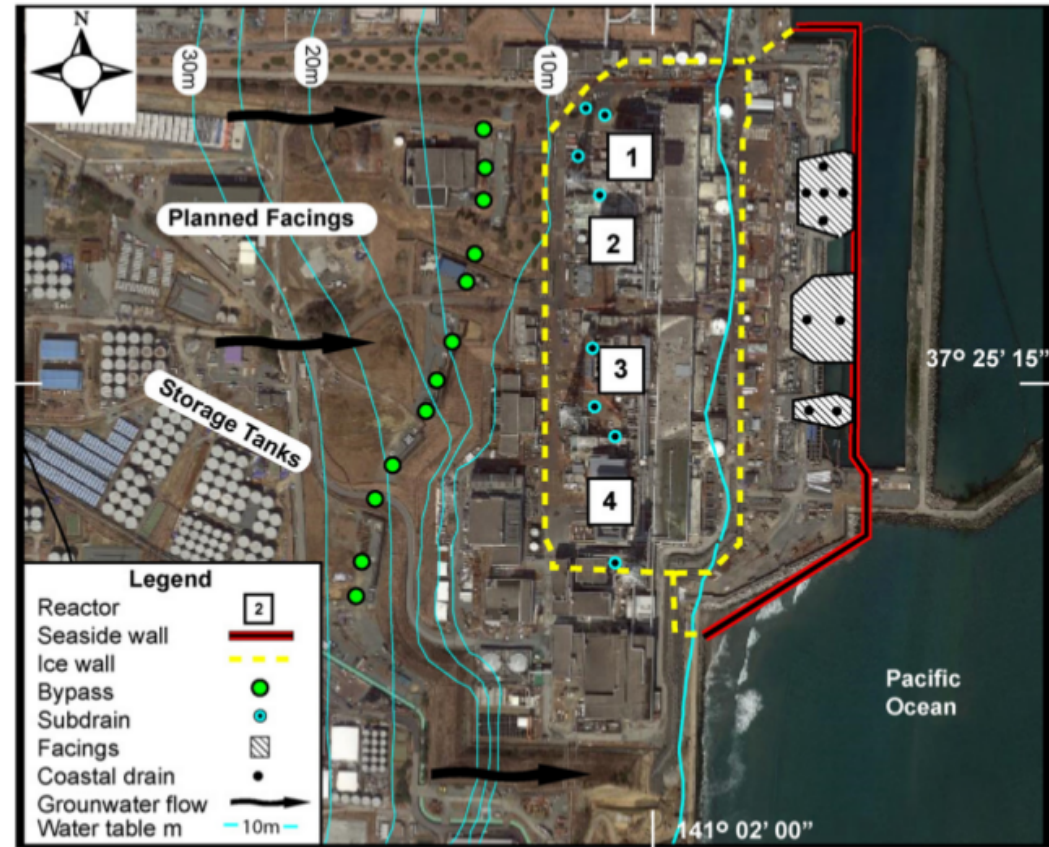
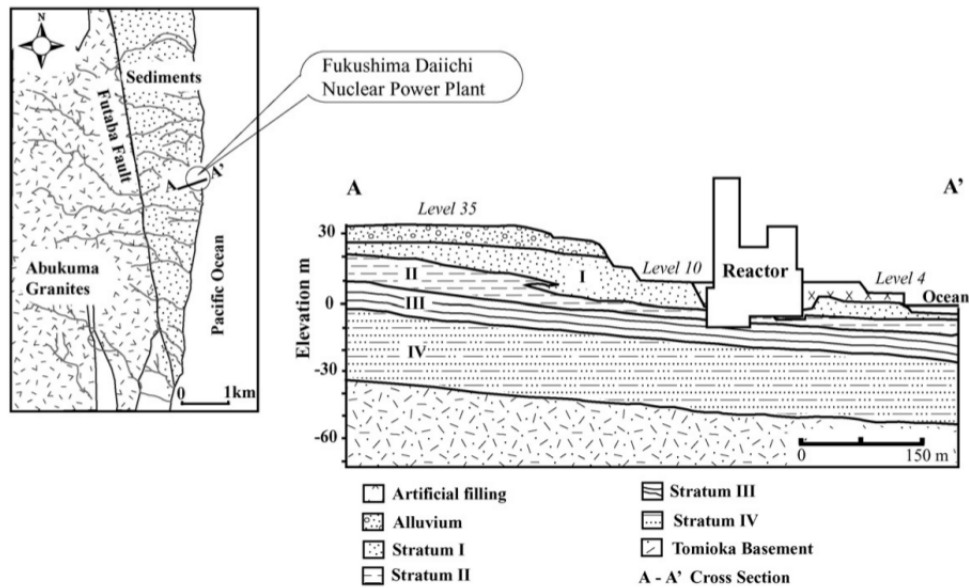


Fig. 6. Overview of the wall barriers around the nuclear reactors.

(d'après Gallardo and Marui, 2016)

Applications potentielles en ingénierie : gel artificiel de sols

There are numerous ways and technique of soil stabilization for deep excavation or tunneling. Some of them are grouting, heat treatment method and many more. One of the common and popular method used in the recent times is ground freezing technique.



Ground freezing is a process of converting pore water or pores into ice by continuously

(extrait de <https://theconstructor.org/geotechnical/ground-freezing-technique/16944/>)

Applications potentielles en ingénierie : stabilité des infrastructures



DOMAINES EXPERTISES INNOVATIONS RESPONSABILITÉS CONGRÈS



Search



Les fondations de l'usine Yamal LNG font appel à une ingénierie particulière et dédiée aux sols de type permafrost.



(exemple tiré de <https://www.ep.total.com/fr/domaines/gaz-naturel-liquefie/yamal-lng-decouvrir-notre-projet-en-russie/fondations-sur-permafrost>)

Modélisation thermo-hydrologique du permafrost

Modélisation numérique des transferts couplés d'eau et d'énergie avec changement de phase dans les sols : **problème complexe, vaste littérature associée** (e.g.: Guymon and Luthin, 1974, Yu et al., 2018).

Long temps de calculs nécessaires : besoin de méthodes de calculs intensifs. L'utilisation du calcul massivement parallèle est requise (e.g.: Painter *et al.*, 2013, Walvoord and Kurylyk, 2016).

=> un solveur dédié développé avec **l'outil de mécanique des fluides numérique généraliste open source OpenFOAM®**:
PermaFoam (Orgogozo et al., 2019)

permaFoam: considered conservation equations

Transferts 3D couplés d'eau et de chaleur en milieux poreux variablement saturés avec prise en compte de l'évapotranspiration et du gel/dégel de l'eau porale (Orgogozo *et al.*, 2019)

couplages, non-linéarités

Equation de Richards avec evapotranspiration:

$$C_H(h) \frac{\partial h}{\partial t} - \nabla \cdot [K_H(h, T) \nabla (h + z)] + Q_{AET}(h, T)$$

Transfert thermique avec gel/dégel:

$$\frac{\partial [C_{T,eq}(h, T) T]}{\partial t} + \nabla \cdot [v(h, T) C_{T,eq}(h, T) T] - \nabla \cdot [K_{T,eq}(h, T) \nabla T] + L \frac{\partial \theta_{ice}(h, T)}{\partial t}$$

Problèmes raides, non-linéarités, couplages, peu de solutions de références :benchmark InterFrost (Grenier *et al.*, 2018)

permaFoam: implémentation numérique

Couplages : - Séparation d'opérateurs séquentielle

- facteur d'impédance pour l'estimation de la conductivité hydraulique en conditions gelées

Non-linéarités : - une boucle de Picard pour chaque équation

- décalage temporel du terme de chaleur latente

- pas de temps adaptatifs basés sur les convergences des boucles de Picard

Equation de Richards avec evapotranspiration:

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

Transfert thermique avec gel/dégel:

$$\frac{\partial (C_{T_{eq}}(h, T) T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}(h, T) C_{T_{eq}}(h, T) T) - \nabla \cdot (K_{T_{eq}}(h, T) \nabla T) + L \frac{\partial \theta_{ice}(h, T)}{\partial t}$$

Problèmes raides, non-linéarités, couplages, peu de solutions de références :benchmark InterFrost (Grenier et al., 2018)

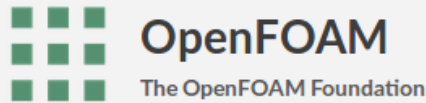
openfoam.com:

Open  FOAM

The open source CFD toolbox



openfoam.org:

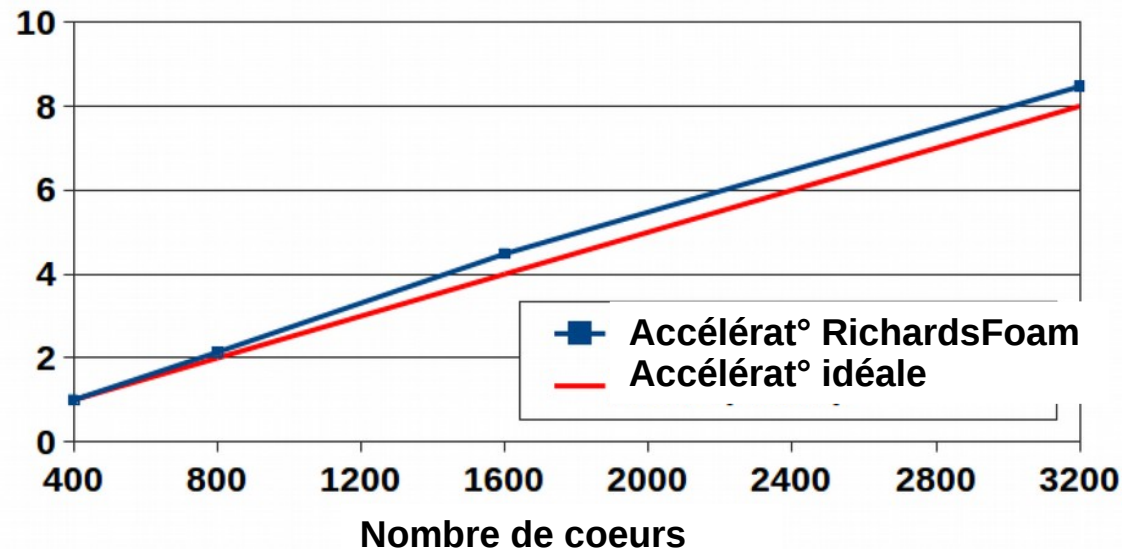


Home Download Development Resources Contact Us

OpenFOAM®: une boîte à outils réputée de **mécanique des fluides numériques généraliste en open source** (C++, Volumes finis, Multi-physique, Massivement parallèle)

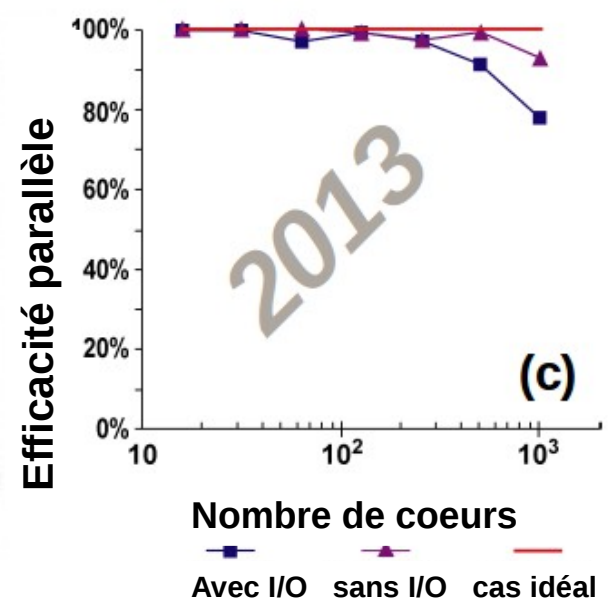
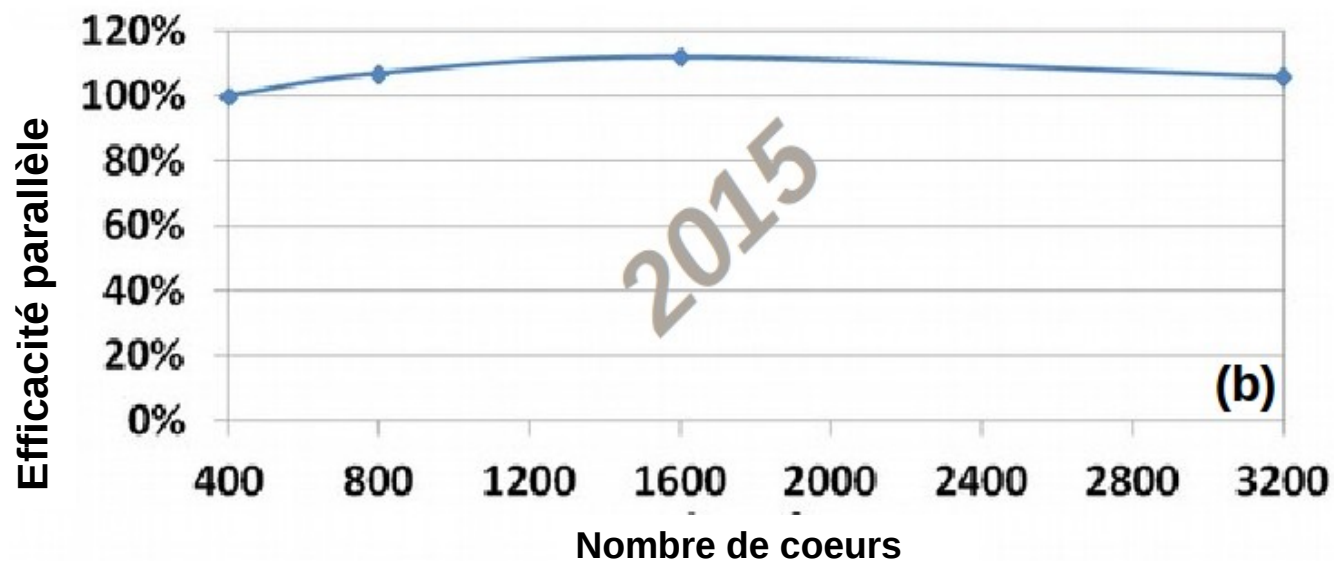
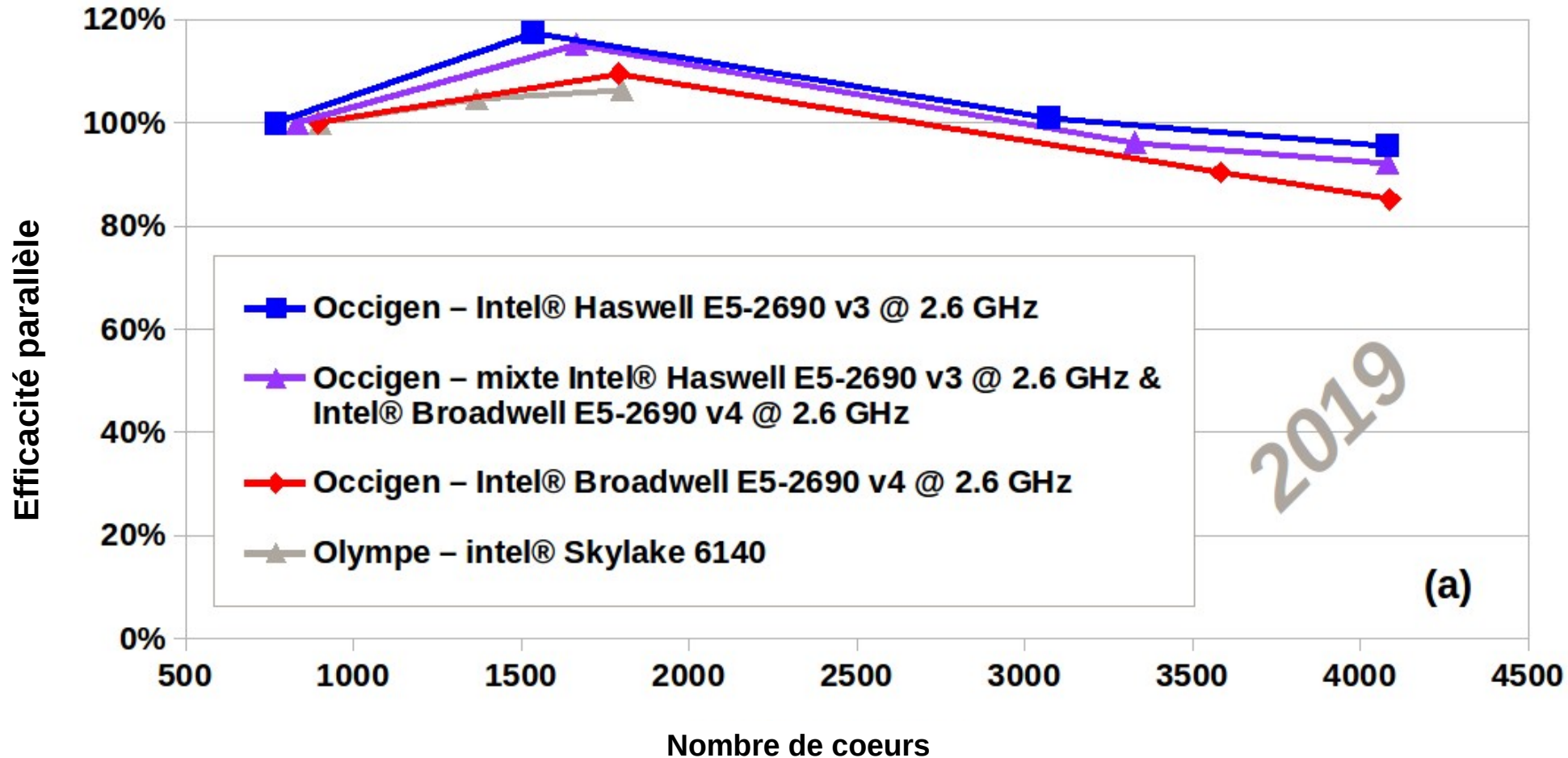
Dévelop^t collaboratifs: communauté importante et diverse, incluant des **académiques** (e.g.: CINECA, IHPC, HLRS) et des **industriels** (e.g.: Volkswagen, Huawei, FM Global)

Une capacité continuellement maintenue à utiliser efficacement les architectures de calculs modernes (Orgogozo et al., 2014, Bricteux et al., 2017)



Courbe de scalabilité extraite de Orgogozo et al., 2015

- **1.2 milliard de mailles**
- **De 400 à 3200 coeurs**
- **Obtenue sur EOS (www.calmip.univ-toulouse.fr)**



RESEARCH ARTICLE

Orgogozo et al., Permafrost and Periglacial Processes 2019

Water and energy transfer modeling in a permafrost-dominated, forested catchment of Central Siberia: The key role of rooting depth

Laurent Orgogozo¹  | Anatoly S. Prokushkin²  | Oleg S. Pokrovsky^{1,3}  |
Christophe Grenier⁴  | Michel Quintard^{5,6}  | Jérôme Viers¹  | Stéphane Audry¹ 

¹GET (Géosciences Environnement Toulouse), UMR 5563 CNRS/UR 234 IRD/UPS, Observatoire Midi-Pyrénées, Université de Toulouse, Toulouse, France

²V.N. Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

³BIO-GEO-CLIM laboratory, Tomsk State University, Tomsk, Russia

⁴Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Université Paris-Saclay, IPSL/LSCE, UMR 8212 CNRS-CEA-UVSQ, Orme des Merisiers, Gif-sur-Yvette Cedex, France

⁵Université de Toulouse, INPT, UPS, IMFT (Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse), Toulouse, France

⁶CNRS, IMFT, Toulouse, France

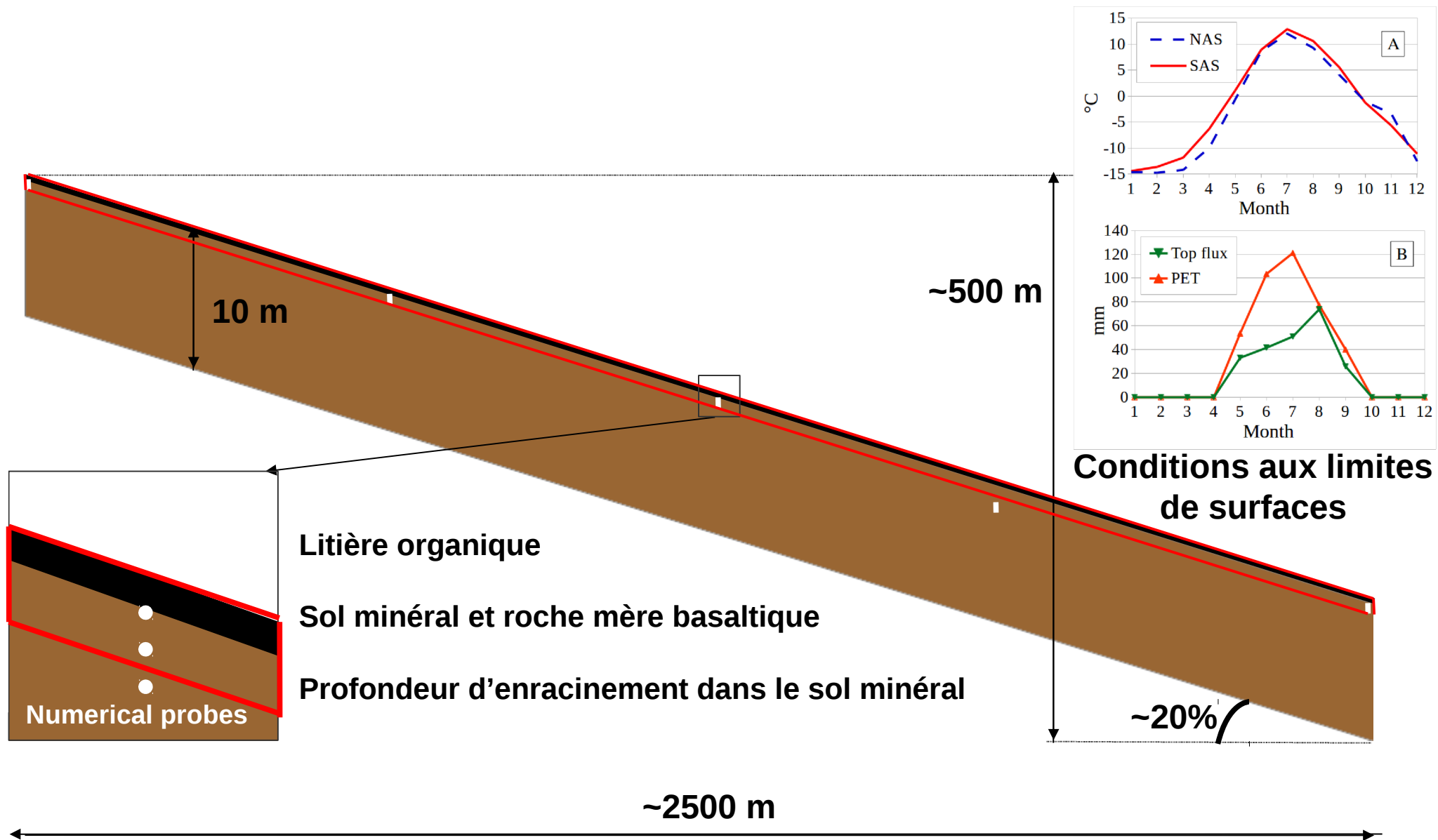
Correspondence

L. Orgogozo, GET (Géosciences Environnement Toulouse), UMR 5563

Abstract

To quantify the impact of evapotranspiration phenomena on active layer dynamics in a permafrost-dominated forested watershed in Central Siberia, we performed a numerical cryohydrological study of water and energy transfer using a new open source cryohydrogeology simulator, with two innovative features: spatially distributed, mechanistic handling of evapotranspiration and inclusion of a numerical tool in a high-performance computing toolbox for numerical simulation of fluid dynamics, OpenFOAM. In this region, the heterogeneity of solar exposure leads to strong contrasts in vegetation cover, which constitutes the main source of variability in hydrological conditions at the landscape scale. The uncalibrated numerical results reproduce reasonably well the measured soil temperature profiles and the dynamics of infiltrated waters revealed by previous biogeochemical studies. The impacts of thermo-hydrological processes on water fluxes from the soils to the stream are discussed through a comparison between numerical results and field data. The impact of evapotranspiration on water fluxes is studied numerically, and highlights a strong

Application 2D : comparaison entre résultats numériques et observations dans un bassin versant expérimental sibérien



Maillages: 2.5 millions de cellules, épaisseurs : $5 \cdot 10^{-3} \text{m}$ (haut) - 0.2m (bas), largeur : 0.2m

Application 2D : comparaison entre résultats numériques et observations dans un bassin versant expérimental sibérien

Accord raisonnable entre observations et modélisations

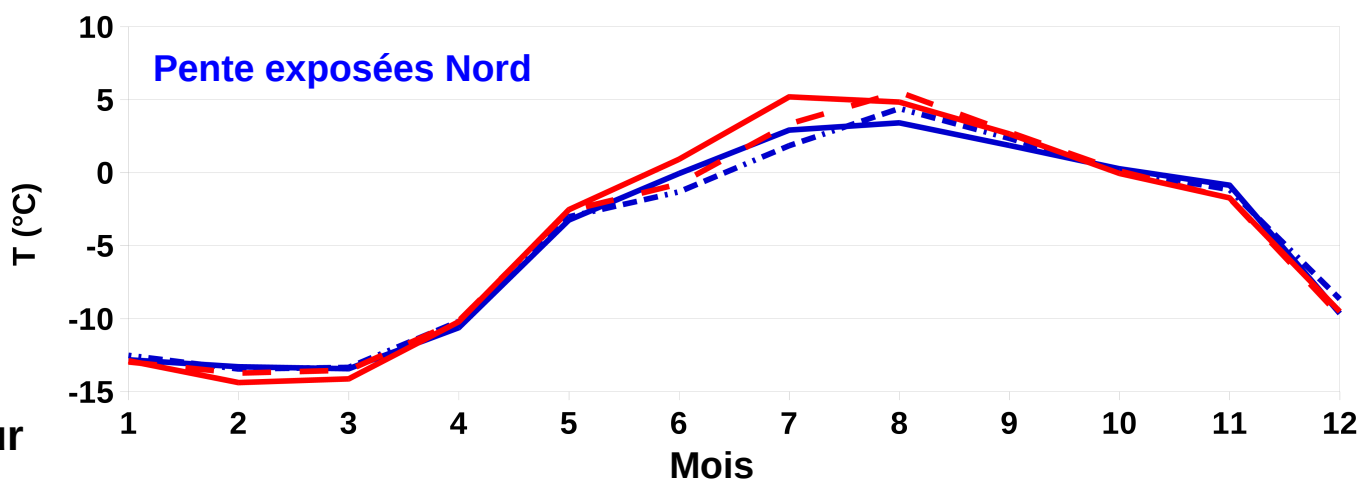
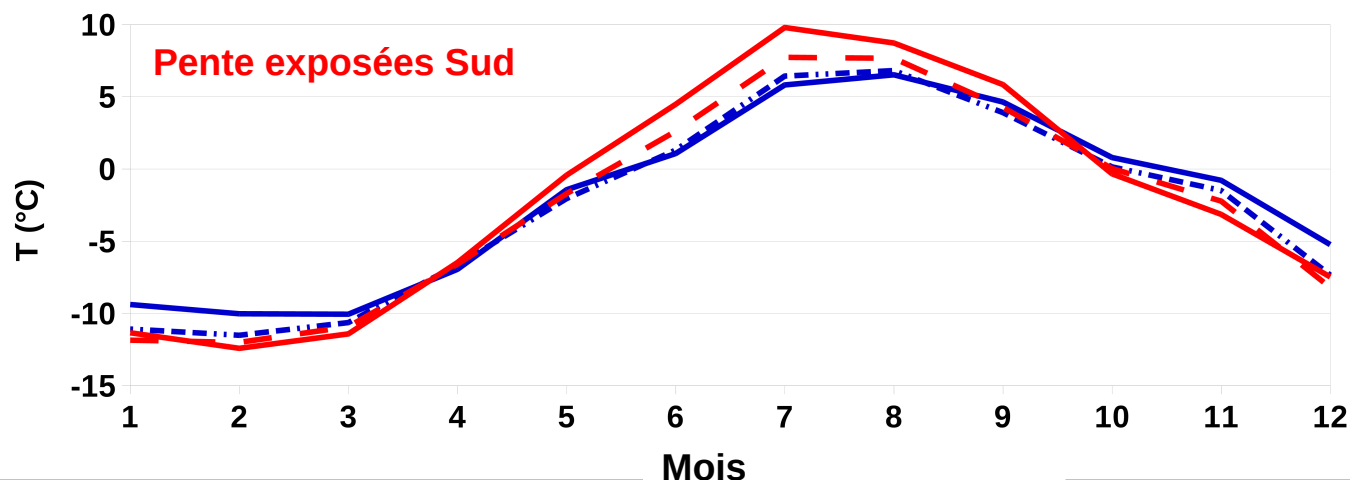
Ecart types entre mesures et résultats numériques

Pentes exposées Sud : 1.07 °C

Pentes exposées Nord : 0.74 °C

Elements computationnels:

- Maillage: ~ 2 400 000 de cellules
- Pas de temps max : 5s à 1h
- Ressources computationnelles : Requêtes de 20 coeurs à 500 coeurs (processeurs: Intel(r) IVYBRIDGE 2,8 Ghz 10-cores) sur le supercalculateur EOS de [CALMIP](http://www.calmip.univ-toulouse.fr) (www.calmip.univ-toulouse.fr)



— Sol minéral – 10 cm - observat° - - - Sol minéral – 10 cm - modèle
— Sol minéral – 20 cm - observat° - - - Sol minéral – 20 cm - modèle

Le Système de Calcul OLYMPE

(méso-centre CALMIP – tier 2)

- Cluster de calcul SEQUANA (ATOS-BULL) 1,365 Pflop/s
- 374 nœuds de calcul (36 cœurs/nœud) soit un total de **13 464 cœurs + 48 cartes GPU nvidia**
- Processeurs Intel® Skylake 6140 à 2.3 Ghz 18-cores
- Cartes GPU Nvidia V100 « Volta » 7.8 TF DP
- RAM : 192, 384 et 1536 Go/nœud soit un total de 76 To de RAM
- Réseau d'interconnexion rapide (Infiniband EDR 100 Gb/s)
- Espace de stockage permanent de 60 To (NFS)
- Espace de stockage temporaire de **1 500 To** (Lustre) - 40 Go/s

OCCIGEN : Bullx DLC - 3.5 Pflops

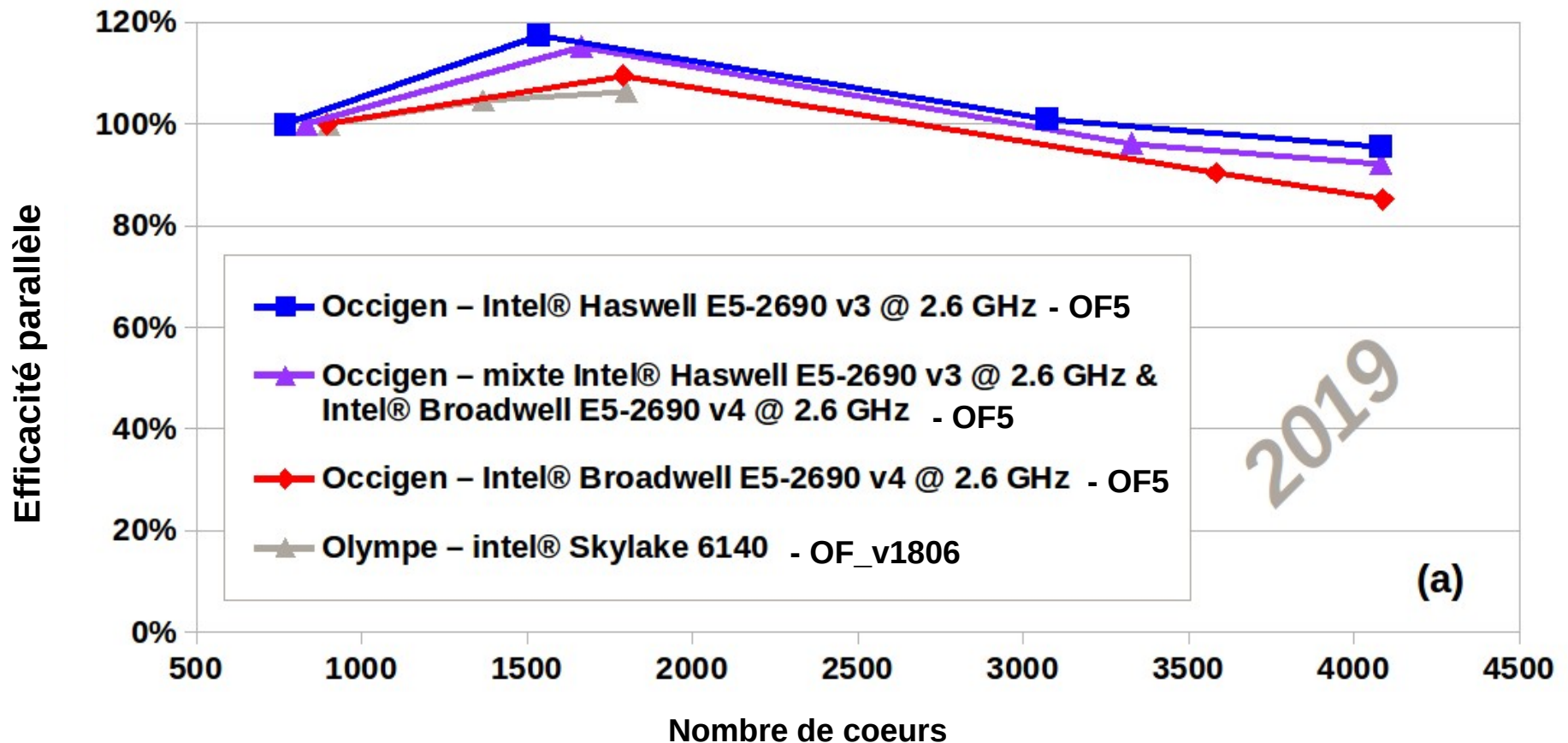
3366 x B720 nodes

- 50544 cores: Intel Haswell E5-2690 v3 @ 2.6 GHz
- 35280 cores: Intel Broadwell E5-2690 v4 @ 2.6 GHz
- 75% of compute nodes with 2,6 GB/core, 25% with 5,3 GB/core
- Infiniband FDR
- /scratch : Lustre, 5,2 PB @ 100 GB/s
- /home : Panasas, 400 TB @ 5 GB/s

(CINES – tier 1)

Pré-Post & Visualisation

- Nœud large « Mesca »: 8 processeurs Skylake 8176 / 3 TB mémoire / 2 GPU P100
- 4 nœuds de visualisation distante :
 - 2 Broadwell E5-2690 v4 @ 2,6 GHz
 - 1 carte NVIDIA P100



Application 3D : une représentation bi-parallélélépipédique inclinée du bassin versant de la Kulingdakan (travail en cours)

Représentation simplifiée 3D:
blockMesh, raffinement graduel

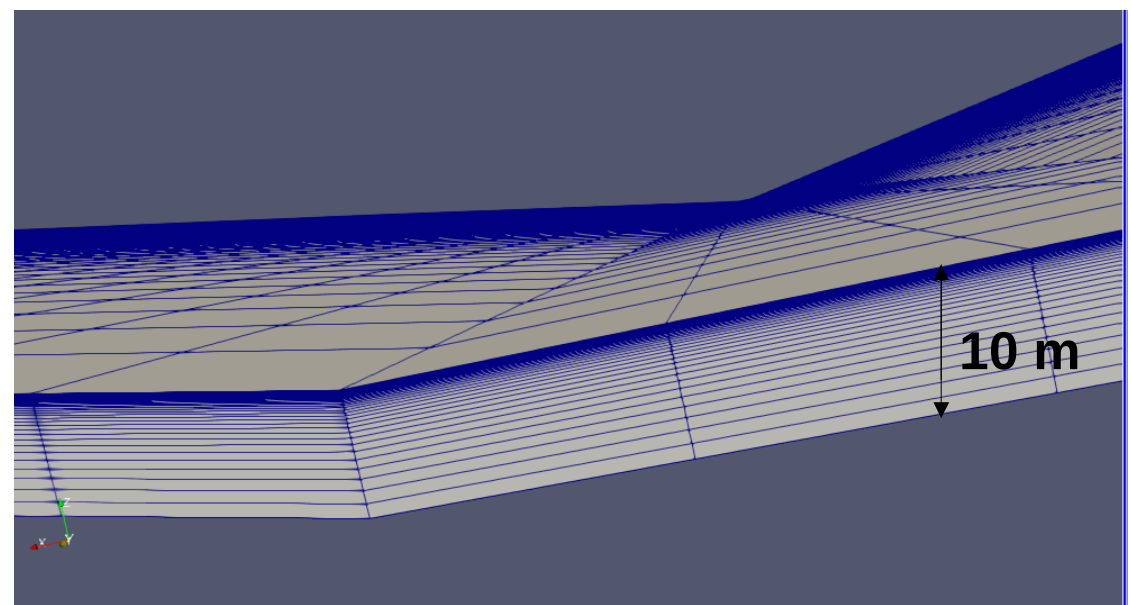
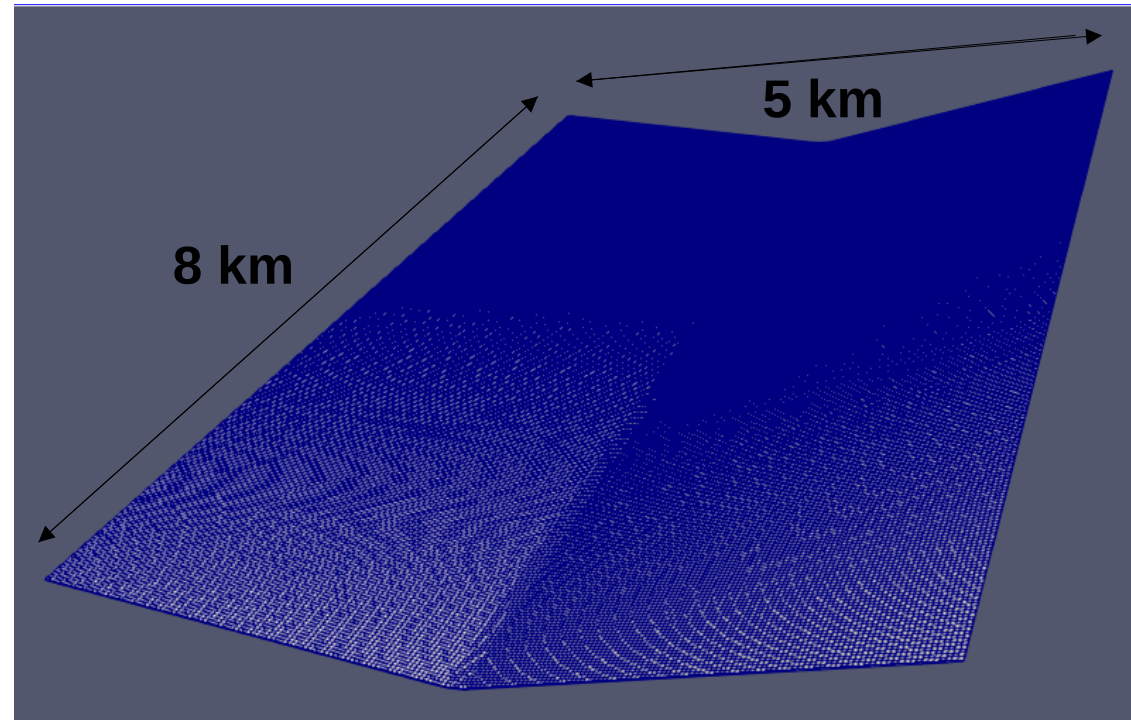
Taille du maillage: 260 millions
de cellules, 50 GB

La décomposition avec
decomposePar est longue !
(> 24 heures pour + de 1800
coeurs sur Occigen)

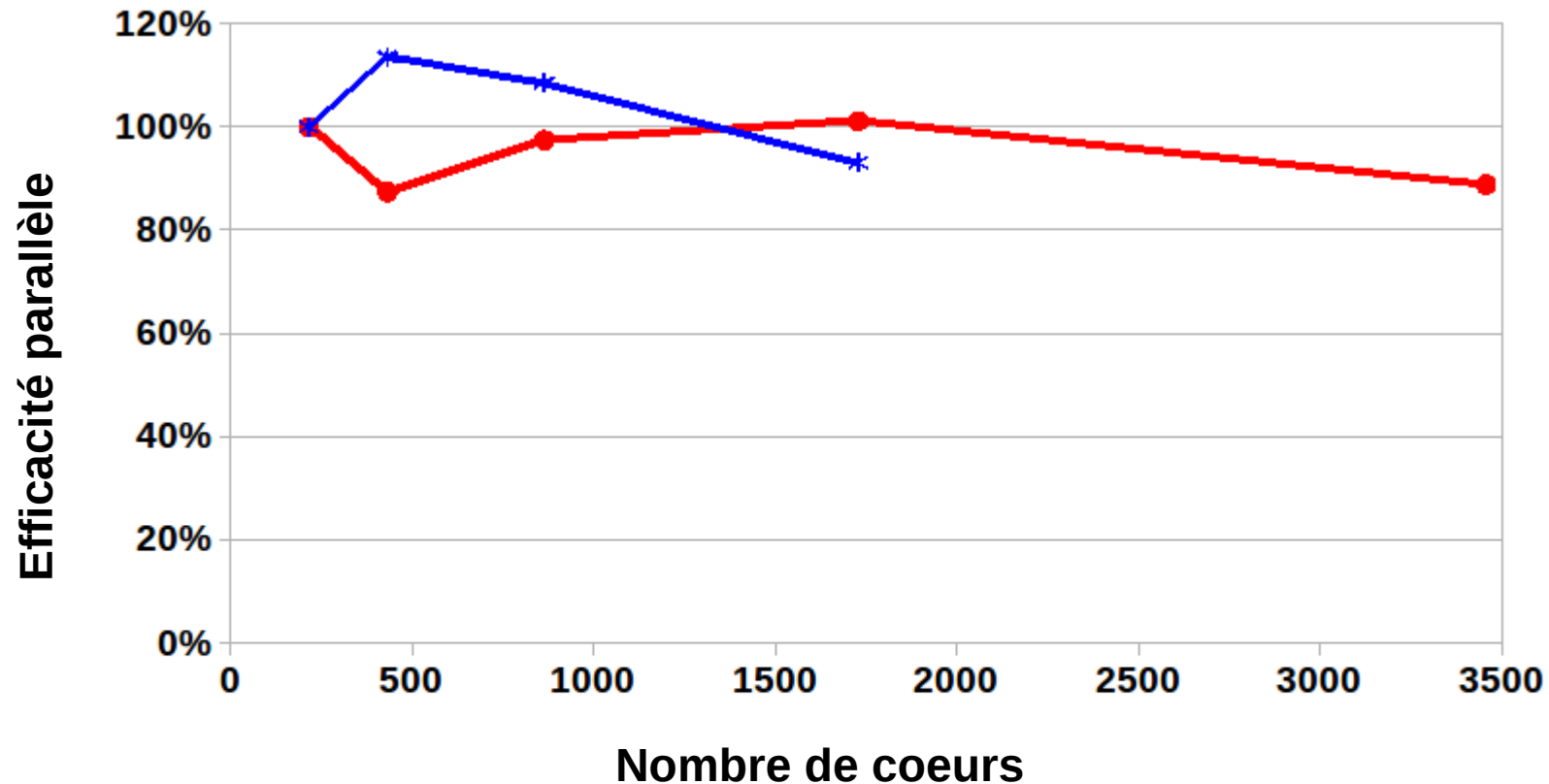
→ snappyHexMesh pour raffiner
le maillage après la
décomposition ?

Grand nombre de fichiers
associés au calculs
massivement parallèle!

→ utilisation du mode collated ?



Application 3D : une représentation bi-parallélélépipédique inclinée du bassin versant de la Kulingdakan (travail en cours)

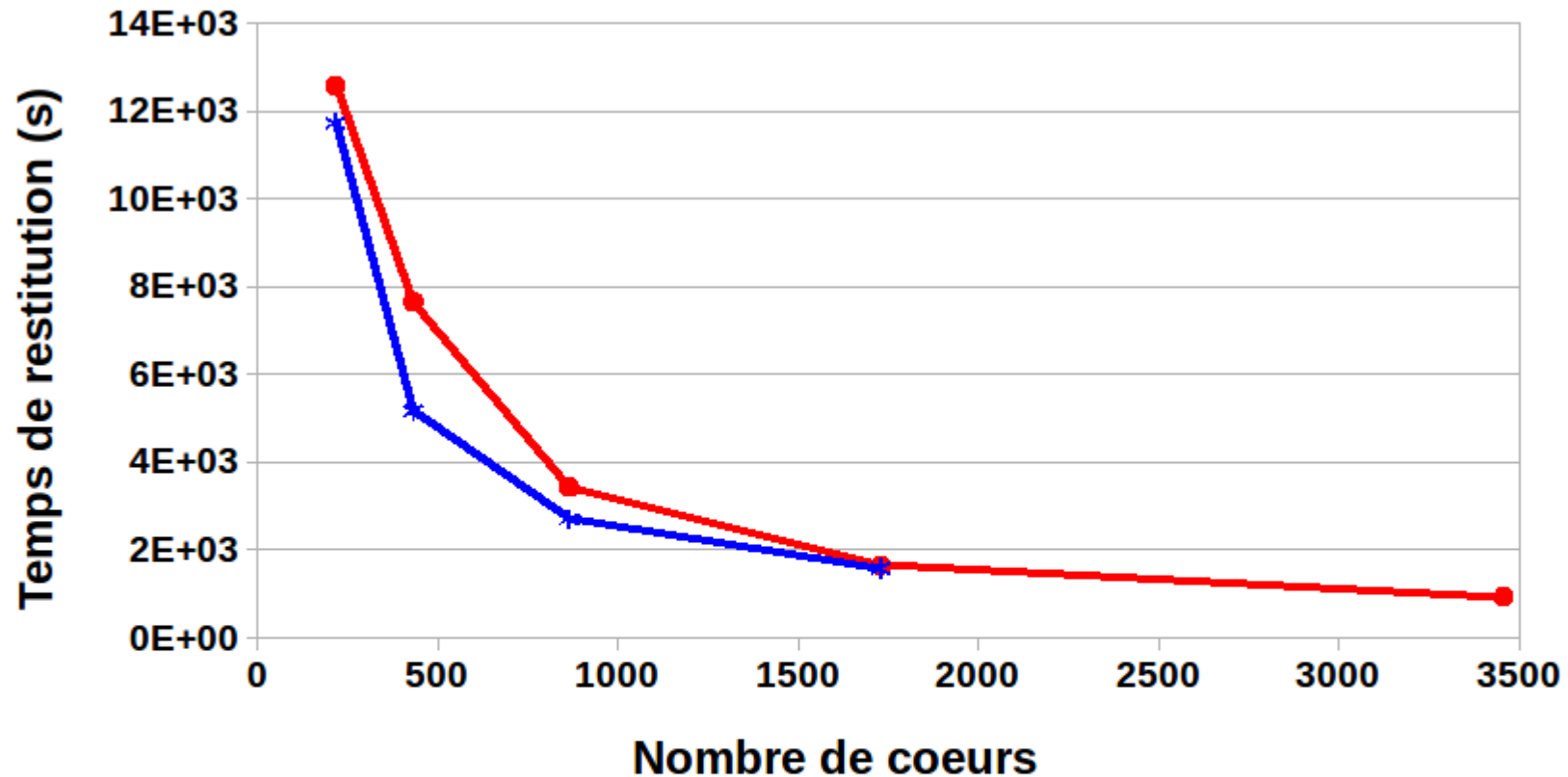


* Olympe (Intel® Skylake 6140) - OpenFOAM 6

● Occigen (Intel® Haswell E5-2690 v3 @ 2.6 GHz) - OpenFOAM 5

Tests préliminaires sur Olympe et Occigen

Application 3D : une représentation bi-parallélélépipédique inclinée du bassin versant de la Kulingdakan (travail en cours)

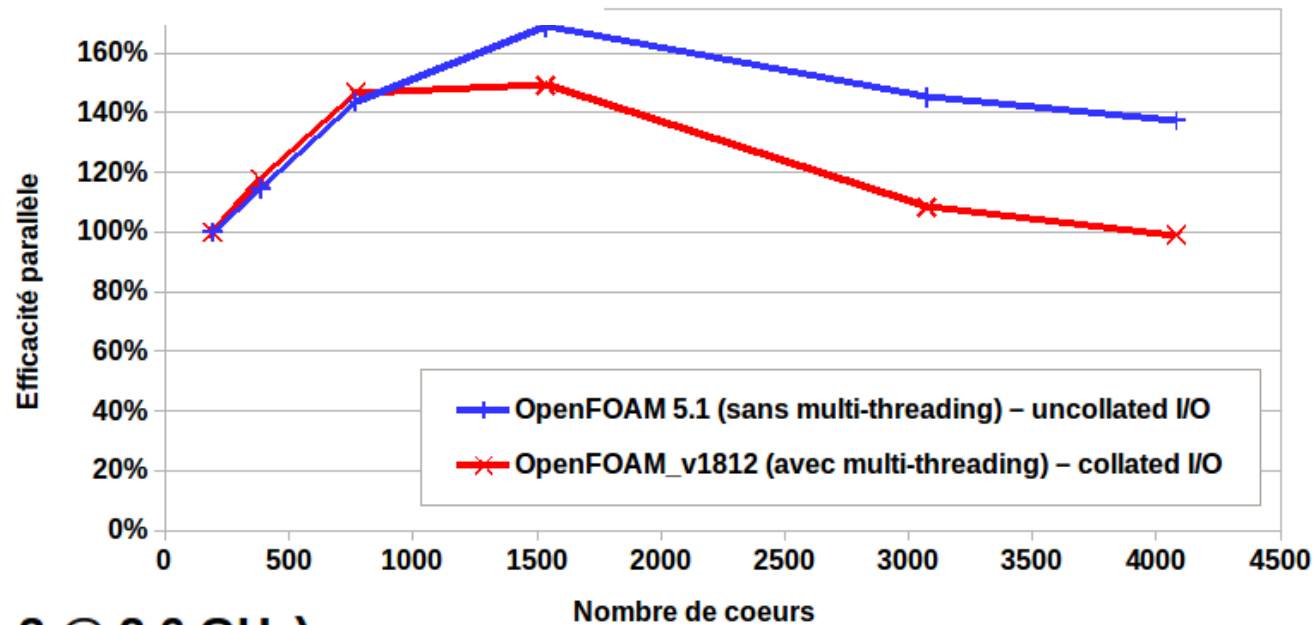
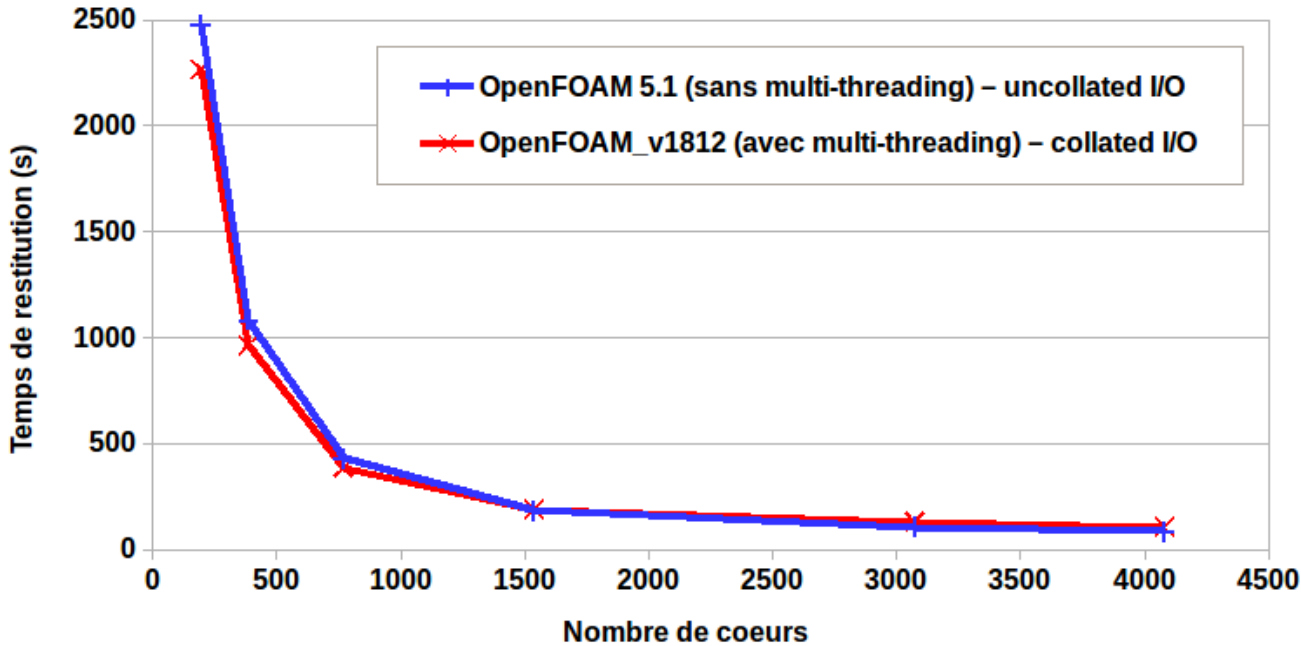


* Olympe (Intel® Skylake 6140) - OpenFOAM 6

● Occigen (Intel® Haswell E5-2690 v3 @ 2.6 GHz) - OpenFOAM 5

Tests préliminaires sur Olympe et Occigen

Application 3D : une représentation bi-parallélélépipédique inclinée du bassin versant de la Kulingdakan (travail en cours)



Projet ANR HIPERBOREA: High Performance computing for quantifying climate change impacts on Boreal Areas

Coordinateur scientifique : Orgogozo L., Geosciences Environment Toulouse

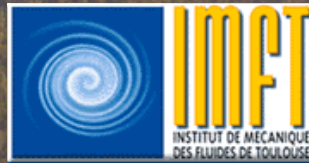
4 laboratoires partenaires : 3 à Toulouse, 1 à Paris (+ part. Internationaux de Russie et Suède):

- Geosciences Environment Toulouse (Pokrovsky O., Shirokova L., Audry S., Auda Y., Gondet E.)
- Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (Marcoux M, Quintard M., Davit Y.)
- Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (Grenier C., Mouche M., Mügler C.)
- Centre d'Etude Spatiale de la Biosphère (Gascoin S.)

Objectif : utiliser OpenFOAM® pour permettre des simulations de la dynamique des milieux froids sans précédents en terme d'échelles et de résolutions

Budget attribué : 630 kEuros (1 post-doc, 1 PhD, students - budget consolidé de 1,7 mEuros)

Durée : 4 ans, 2020 - 2023



Objectifs techniques du projet HiPerBorea

Modéliser des évolutions centennales de bassins versants expérimentaux de quelques dizaines de km² sous changements climatiques :

- **Utiliser des maillages de plusieurs dizaines de milliards de mailles**
- **Utiliser des dizaines de milliers de coeurs simultanément**
- **Faire des simulations de plusieurs centaines de milliers d'heures à plusieurs millions d'heures CPU**
- **Ressources computationnelles:
Tier-2 (CALMIP), Tier-1 (CINES), Tier-0 (PRACE)**



JCAD 2019
JOURNÉES CALCUL ET DONNÉES
Rencontres scientifiques et techniques du calcul et des données
Du mercredi 9 au vendredi 11 octobre 2019
Maison de la Recherche et de la Valorisation
Campus de Rangueil - Toulouse



Merci pour votre attention.

Contact: laurent.orgogozo@get.omp.eu

