

# Prise en compte du flux géothermique de la Terre dans le schéma de sol du modèle de surface ISBA

Bastien CHATELON

Juillet - Août 2022

ISBA est le modèle de surface qui est utilisé dans la plateforme SURFEX de Météo-France. Pour une meilleure représentation du sol, on utilise ISBA dans sa version diffusion, laquelle peut proposer un nombre plus important de couches (ici 14) et permet de résoudre explicitement la loi de Fourier. Jusqu'à présent, le flux géothermique était négligé, or les modèles de refroidissement de la Terre par conduction estiment les pertes thermiques de la Terre à ~46TW, énergie qui est libérée dans l'atmosphère. Cette énergie provient d'une part de la désintégration de certains isotopes radioactifs (majoritairement Thorium 232 et Uranium 238) et d'autre part du refroidissement de la Terre, ainsi que d'autres mécanismes dont la contribution est moindre. Dans ce contexte, il peut donc être intéressant de prendre en compte le flux géothermique pour en mesurer l'influence. Cela revient alors à modifier l'équation de la chaleur, ou, plus simplement, en considérant que toute l'énergie provient d'en-dessous de la dernière couche du modèle (12m), à imposer une condition à la limite inférieure.

Les données fournies à ISBA pour cette condition à la limite inférieure (figure 1) sont issues d'une interpolation réalisée par Lucazeau (2019). Il s'est servi de 51 000 mesures continentales du flux géothermique, réalisées principalement par mesure conjointe de la conductivité thermique et du gradient thermique vertical, reliés au flux thermique par la Loi de Fourier, ainsi que de mesures indirectes obtenues lors d'explorations pétrolières. Il a ensuite interpolé ces observations sur une grille de 0.5° de résolution à l'aide d'une méthode des similarités utilisant 14 proxys géomorphologiques.

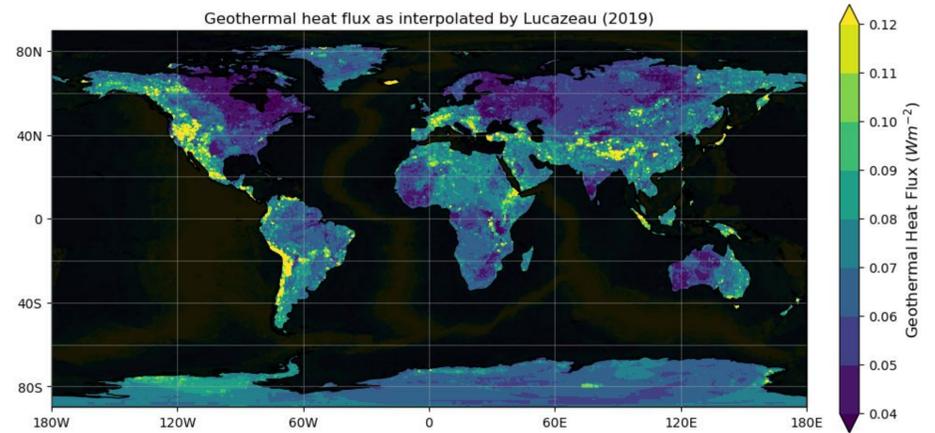


Figure 1 : flux géothermique selon les données de Lucazeau (2019) à résolution 0.5°

## Conséquences de la prise en compte du flux géothermique

L'étape suivante a été de réaliser des simulations avec SURFEX, d'abord 1D avec un forçage froid et un forçage tempéré puis globales. Les simulations 1D ont notamment permis de valider des hypothèses formulées sur la base des simulations globales.

### Types de sol

Comme attendu, introduire une source d'énergie réchauffe le sol, cependant la composition de celui-ci module non seulement l'intensité du réchauffement mais aussi sa distribution sur la verticale. Ainsi, pour un même flux, la température à 10m de profondeur subit une augmentation plus forte pour un sol argileux que pour un sol sableux (fig.2). Cela peut s'expliquer par le fait que le sable contient beaucoup de quartz, or sa conductivité thermique est forte pour une capacité thermique modérée. Dès lors, l'énergie est plus facilement transmise vers les couches supérieures, les couches profondes ont donc moins tendance à se réchauffer. Cependant, l'influence proche de la surface est sensiblement la même pour tous les sols.

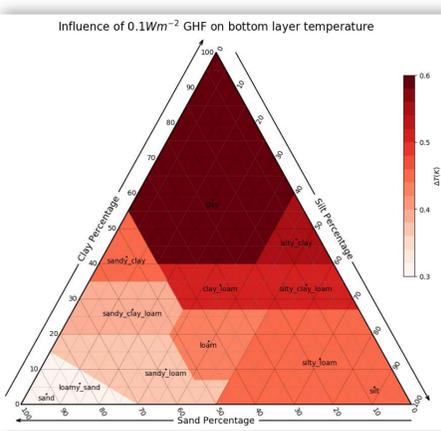


Figure 2 : influence d'un flux de 0.1 W/m² sur la température de la couche la plus profonde, en fonction de 12 compositions de sol différentes

### Influence de l'enneigement

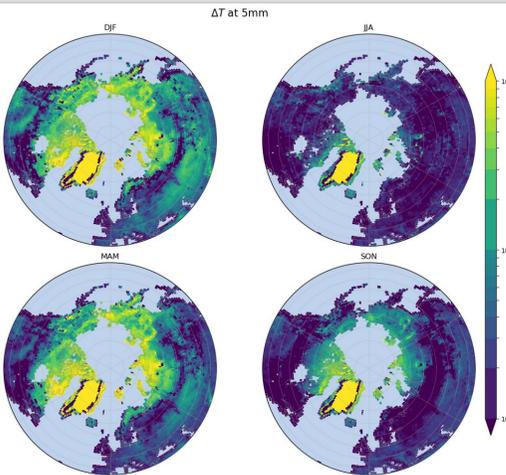


Figure 3 : influence du flux géothermique sur la température à 5mm de profondeur en fonction de la saison

Les simulations globales ont laissé apparaître un cycle saisonnier de l'influence sur la température à 5mm du flux géothermique. En effet, comme le montre la figure 3, l'influence est beaucoup plus forte en saison froide dans les zones soumises à de la neige au sol. Cette différence peut même atteindre 10°C dans les secteurs où la neige est permanente. L'hypothèse est alors émise que la neige au sol est responsable de l'hétérogénéité horizontale de l'influence du flux géothermique. En effet, la neige a une faible conductivité thermique et joue un rôle d'isolant entre le sol et

l'atmosphère : elle n'est donc pas capable de transférer l'ensemble de l'excédent d'énergie qu'elle reçoit à la base. Par conséquent, l'équilibre thermique est déplacé et la température du sol augmente sous la surface par accumulation d'énergie. De plus, le gradient thermique au sein du manteau neigeux s'en trouve accentué.

Cette hypothèse a pu être confirmée par une simulation 1D avec un forçage froid. En effet, comme le montre la figure 4, deux profils de température du sol ont été réalisés, ils correspondent aux profils moyens de l'ensemble des jours avec neige au sol (jaune) et sans (bleu) auxquels on a retiré le profil moyen de la simulation de référence (sans flux géothermique). On remarque alors que l'influence sous la surface est nulle lorsqu'il n'y a pas de neige au sol. De plus, on observe que la différence entre les

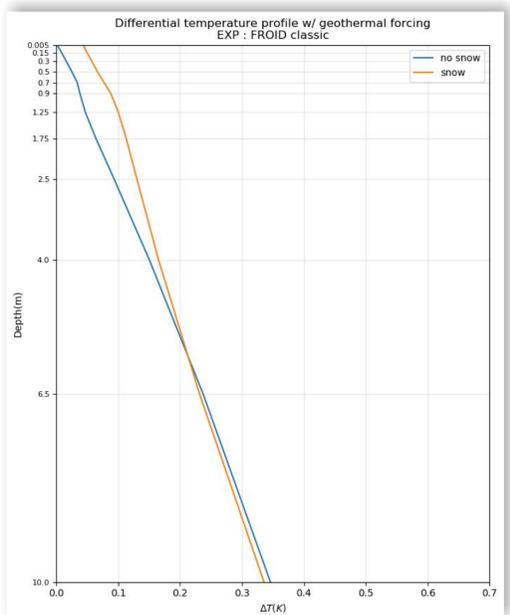


Figure 4 : contribution de l'enneigement à l'influence du flux géothermique sur le profil de température

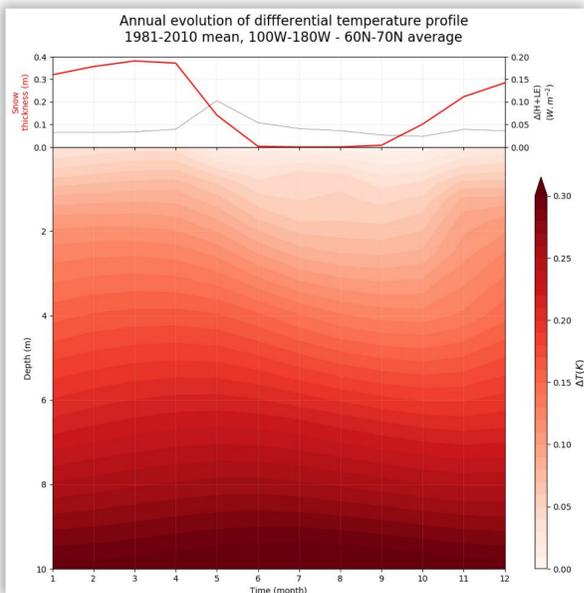


Figure 5 : diagramme de Hovmöller présentant le cycle annuel de l'influence du flux géothermique sur le profil vertical de température et évolution annuelle de l'enneigement et de l'influence du flux géothermique sur le flux de chaleur en surface, en moyenne sur la Sibérie

deux profils moyens s'amortit et s'inverse même légèrement en profondeur. On peut l'expliquer grâce à la figure 5 : la neige au sol (courbe rouge) joue le rôle de forçage, dès qu'elle disparaît l'excédent d'énergie des premières couches est libéré vers l'atmosphère, ce qui permet aux couches profondes de progressivement libérer leur énergie vers le haut, la perturbation se propage vers le bas, mais ce processus est lent. Les couches profondes et superficielles sont alors quasiment en opposition de phase dans leur cycle annuel. Enfin, on peut visualiser la libération de cet excédent d'énergie lors de la fonte par le maximum de la courbe noire. Elle représente l'excédent de flux de chaleur (latente et sensible) par rapport à la simulation sans flux géothermique.

## Conclusion & Bilan personnel

- La prise en compte du flux géothermique n'aboutit dans la majorité des cas qu'à de très faibles différences si non nulles. Cependant ce travail a mis en exergue des différences parfois fortes dans les zones enneigées, particulièrement lorsque l'enneigement est permanent. Par ailleurs, cela peut-être une piste pour corriger la surestimation de l'extension du pergélisol modélisé, en effet la prise en compte du flux géothermique semble induire une réduction de la surface d'environ 500 000 km².
- Ce stage aura donc été l'occasion de refaire de la physique, grande absente de ce semestre à l'ENM. J'ai aussi pu retrouver des concepts que je n'avais pu qu'effleurer lors de ma formation antérieure, notamment autour de l'équation de la chaleur.

- Ensuite, d'un point de vue purement technique, j'ai eu l'occasion de me familiariser avec le monde de la modélisation, de continuer mon apprentissage de bash via un script automatisant le lancement des simulations mais surtout d'approfondir ma connaissance de python pour visualiser les données issues des simulations. Il m'a également fallu apprendre à utiliser différents protocoles de communications réseau tels que ftp, ssh ou telnet.
- Au travers de discussions avec mon encadrant Bertrand Decharme ainsi qu'avec Christine Delire, chercheuse avec qui j'ai partagé un bureau, et que je remercie pour son aide, j'ai également dû faire l'effort de me faire comprendre clairement, ce qui a grandement contribué à ma compréhension du sujet.