

Rendre compte de la neige aux hautes latitude et dans les montagnes

Isabelle GOUTTEVIN (CNRM/CEN)

avec les contributions de Louis Le Toumelin, Marie Dumont, Kevin Fourteau et l'équipe ERC IVORI



La neige, un ingrédient majeur du système climatique



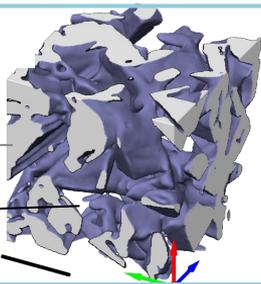
http://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/74000/74268/world_topo.200402.3x5400x2700.jpg

La neige, un ingrédient majeur du système climatique

Conductivités thermiques (Kth)

glace
($K_{th}=2.22 \text{ W/m/K}$ à 0°C)

air
($K_{th}=0.02 \text{ W/m/K}$ à 0°C)



neige : $K_{th} \sim 0.03 - 0.65 \text{ W/m/K}$

- laine de verre : 0.04 W/m/K
- eau liquide : 0.6 W/m/K

(source : www.engineeringtoolbox.com)

Puits de chaleur latente et isolation thermique



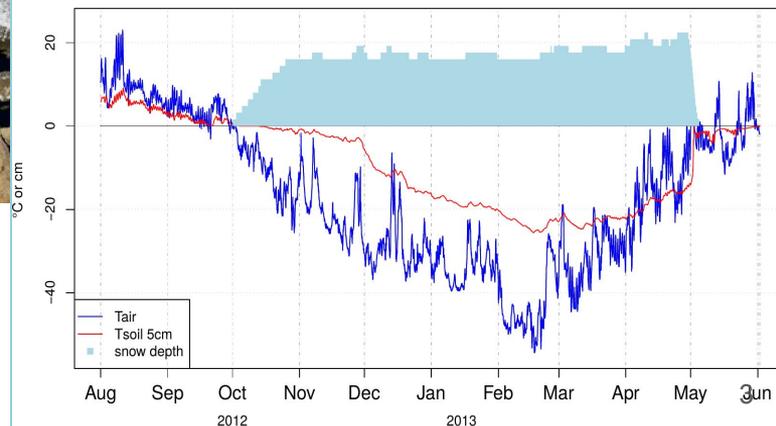
<http://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/74000/74268/world.tpo.200402.3x5400x2700.jpg>

Zhang et al., 2005

Lawrence and Slater, 2010

Gouttevin et al., 2012

Air and Soil temperature at Samoylov

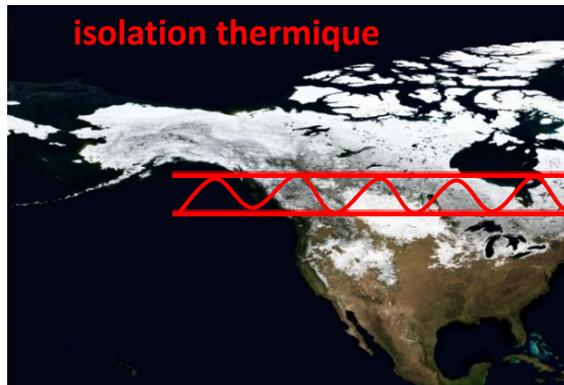


La neige, un ingrédient majeur du système climatique

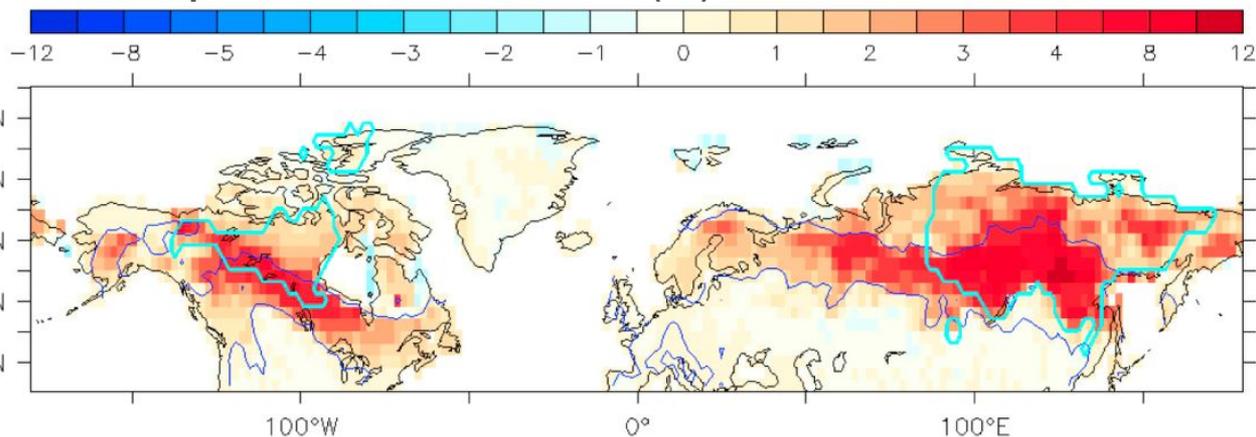


Pergélisol Arctique

**Puits de chaleur latente et
isolation thermique**



Effet d'un changement de conductivité thermique de la neige Arctique,
sur la température hivernale des sols (°C) (Gouttevin et al., 2012)



<http://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/74000/74268/world.tpo.200402.3x5400x2700.jpg>

Zhang et al., 2005

Lawrence and Slater, 2010

Gouttevin et al., 2012

La neige, un ingrédient majeur du système climatique



Pergélisol Arctique



Source : *Frozen Planet II*, BBC

Puits de chaleur latente et isolation thermique



http://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/74000/74268/world_topo.200402.3x5400x2700.jpg

Zhang et al., 2005

Lawrence and Slater, 2010

Gouttevin et al., 2012

La neige, un ingrédient majeur du système climatique



Pergélisol Arctique



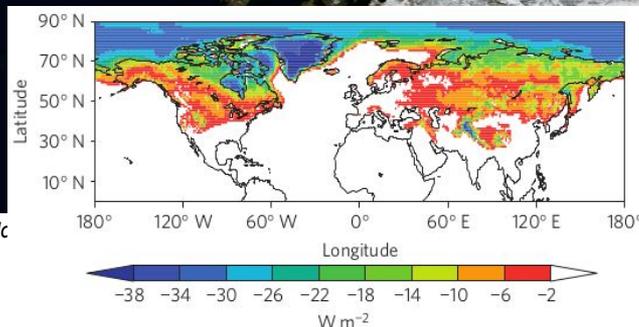
Source : *Frozen Planet II*, BBC

**Puits de chaleur latente et
isolation thermique**

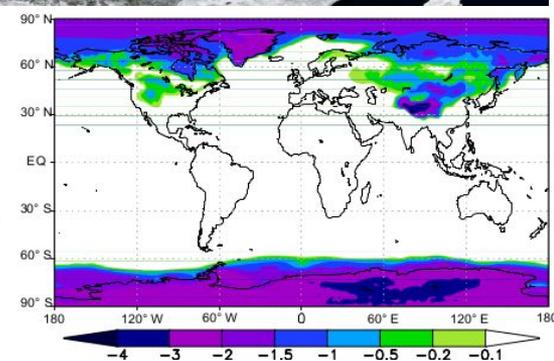


Refroidissement par effet d'albédo

<http://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/74000/74268/world.200402.3x5400x2700.jpg>



**Forçage radiatif moyen lié au
manteau neigeux** (Flanner et al 2011)



**Forçage radiatif lié à la forme des grains
de neige (W/m^2)** (Räisänen et al., 2017)

Zhang et al., 2005

Lawrence and Slater, 2010

Gouttevin et al., 2012

Flanner et al., 2011

La neige, un ingrédient majeur du système climatique



Pergélisol Arctique



Source : Frozen Planet II, BBC

Puits de chaleur latente et isolation thermique



Source d'eau pour l'atmosphère et les hydrosystèmes



Refroidissement par effet d'albédo

<http://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/74000/74268/world.tpo.200402.3x5400x2700.jpg>

Zhang et al., 2005
Lawrence and Slater, 2010
Gouttevin et al., 2012
Flanner et al., 2011

Barnett et al., 2005
Mankin et al., 2015
Viviroli et al., 2007, 2020
Armstrong et al., 2019



Macro-invertébré inféodé aux rivières nivo-glaciaires

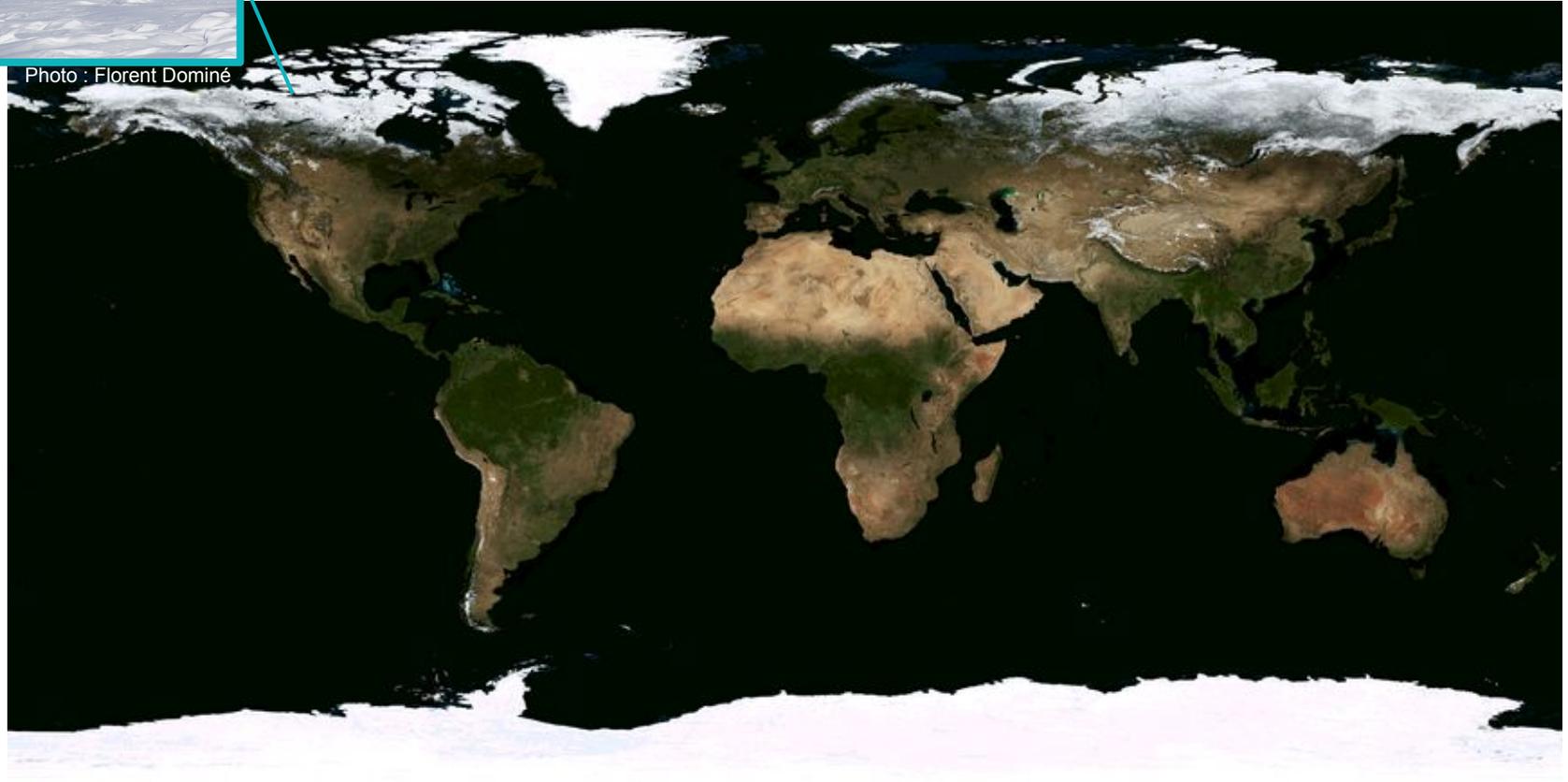
Source: Anthony Lemoine, Cécile Launay.

Plan

1 - Focus la neige des hautes latitudes et son rôle isolant



Photo : Florent Dominé



Plan

1 - Focus la neige des hautes latitudes et son rôle isolant



Photo : Florent Dominé



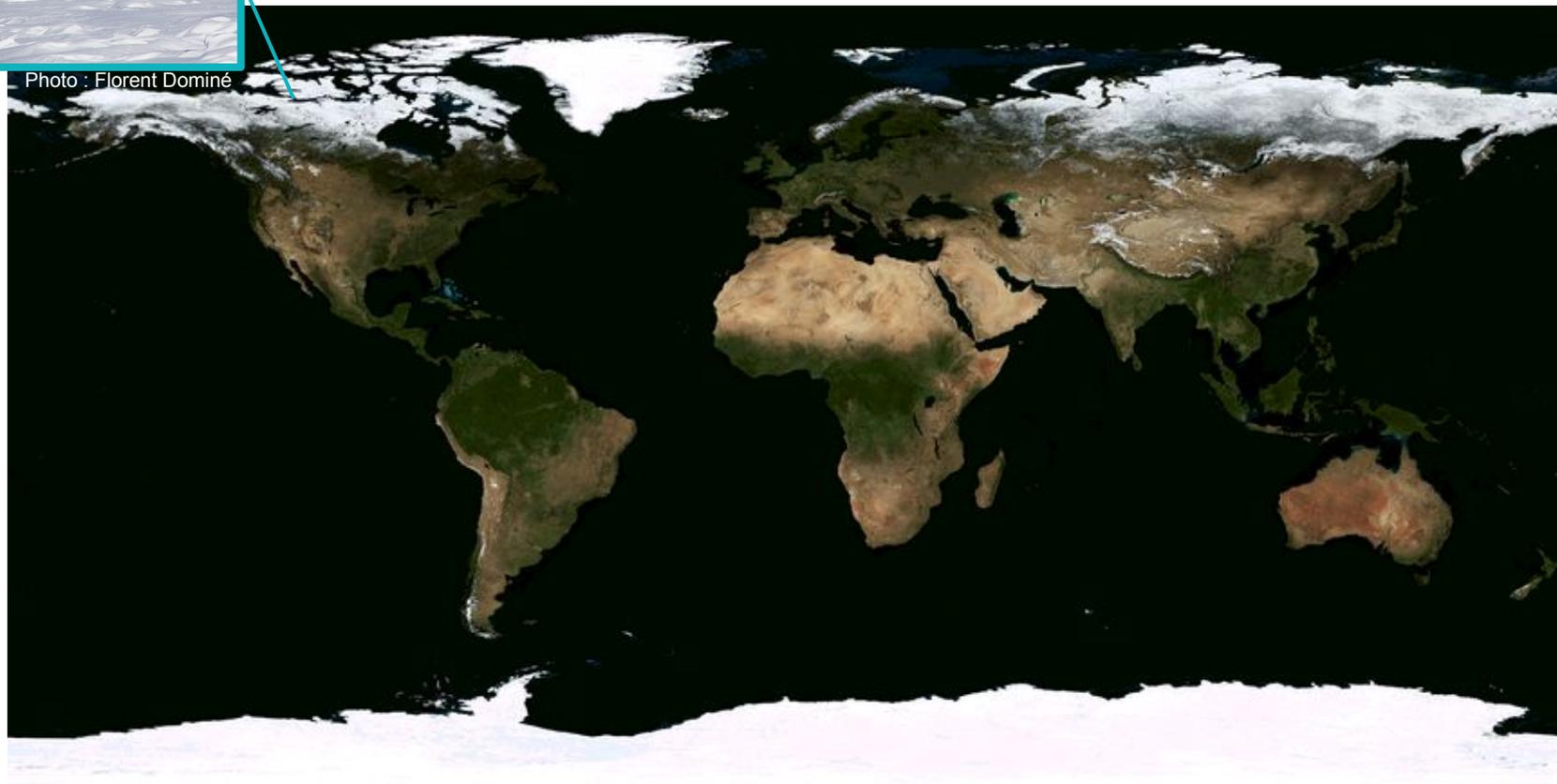
2 - Focus sur la neige de montagne et ses conditions aux limites atmosphériques



1 - Focus la neige des hautes latitudes et son rôle isolant



Photo : Florent Dominé



La neige → les neiges : Précipitations

~150cm

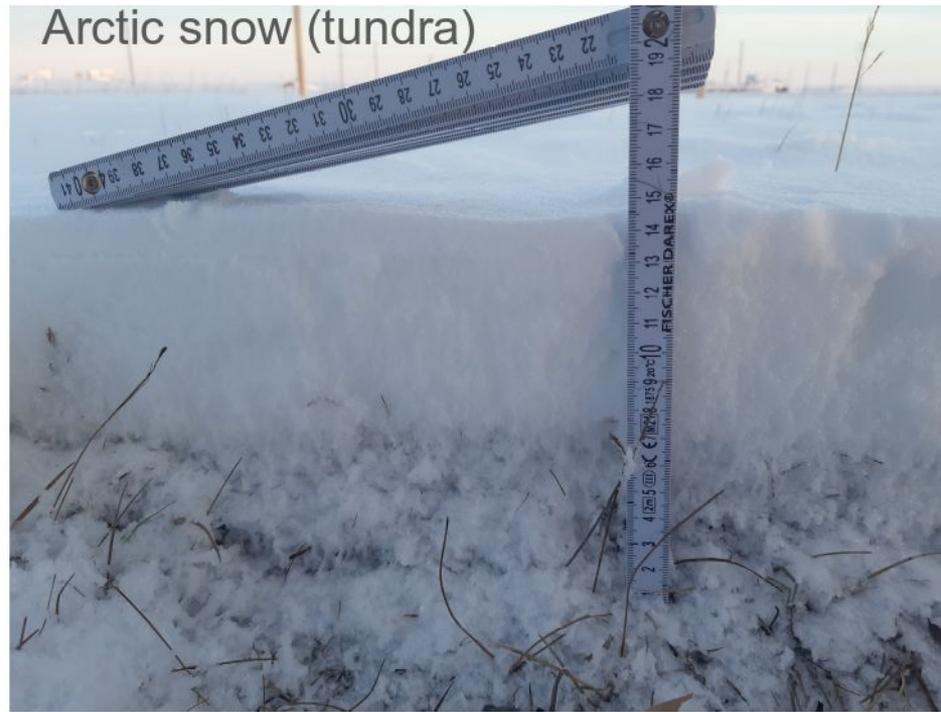
Alpine snow



Col de Porte, Yves
Lejeune

~15cm

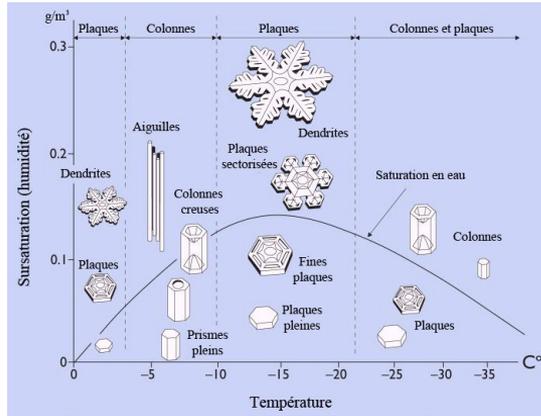
Arctic snow (tundra)



Cambridge Bay, IVORI

La neige → les neiges : Métamorphisme

En surface....
transport par le vent



isothermie :
arrondissement



grains fins
(rounded grains)

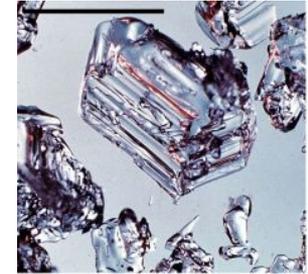


(neige sèche)

gradient
thermique :
cristaux
anguleux/facettes



cristaux facettés



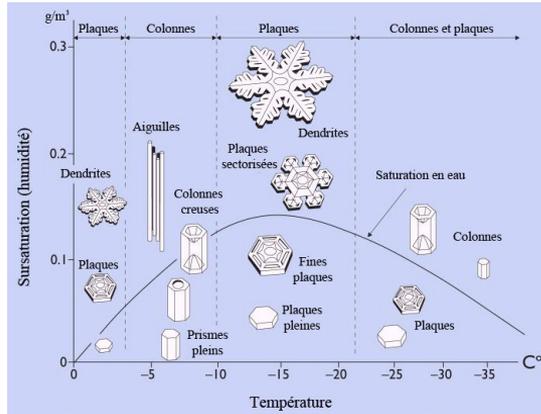
givre de profondeur
(gobelets)
(depth hoar)

Dans les nuages....

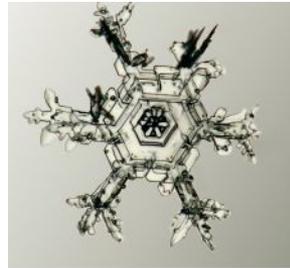
Dans le manteau neigeux....

La neige → les neiges

En surface....
transport par le vent



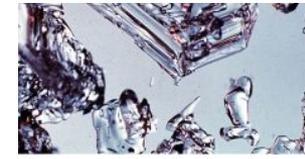
isothermie
arrondissement



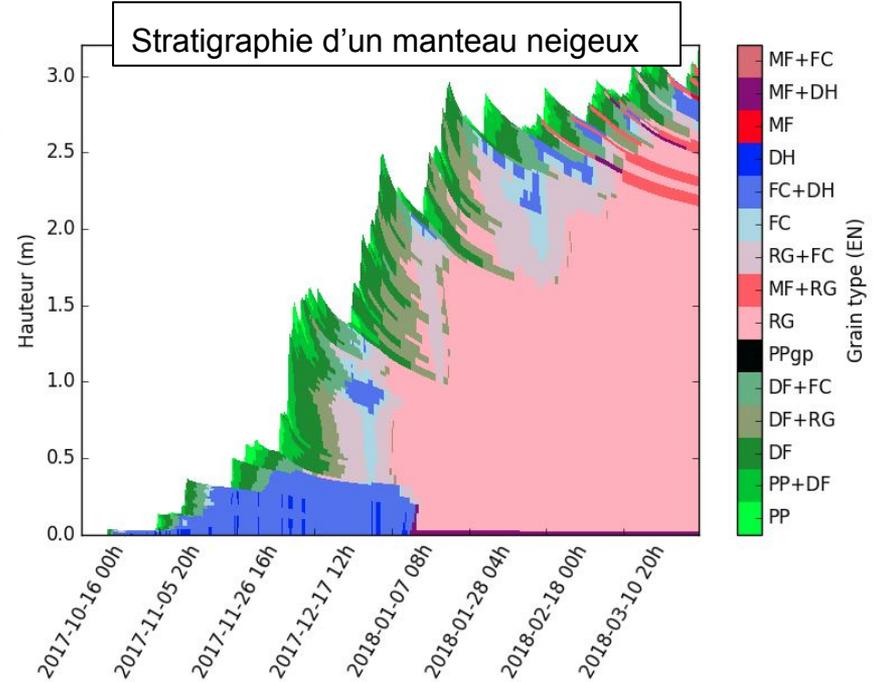
gradient
thermique .
cristaux
anguleux/facettes



cristaux facettés



givre de profondeur
(gobelets)
(depth hoar)

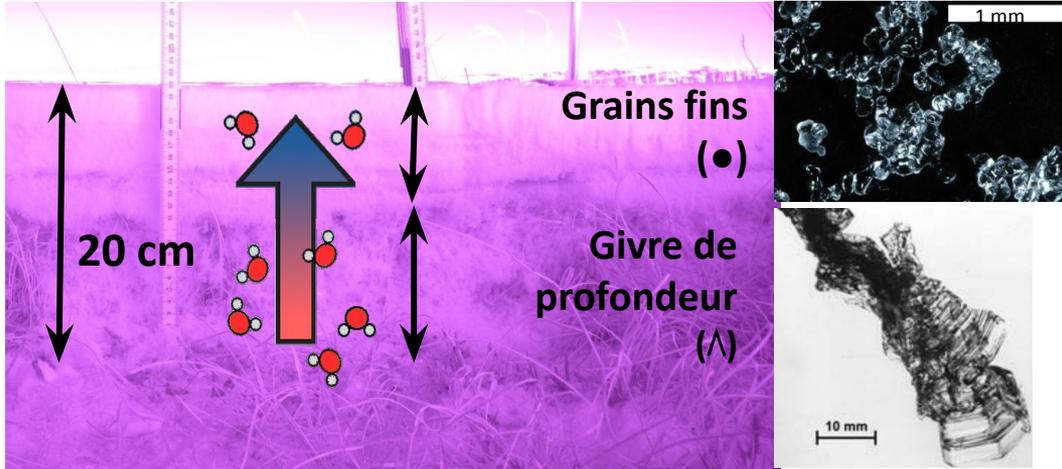


Dans les nuages....

Dans le manteau neigeux....



Neige arctique



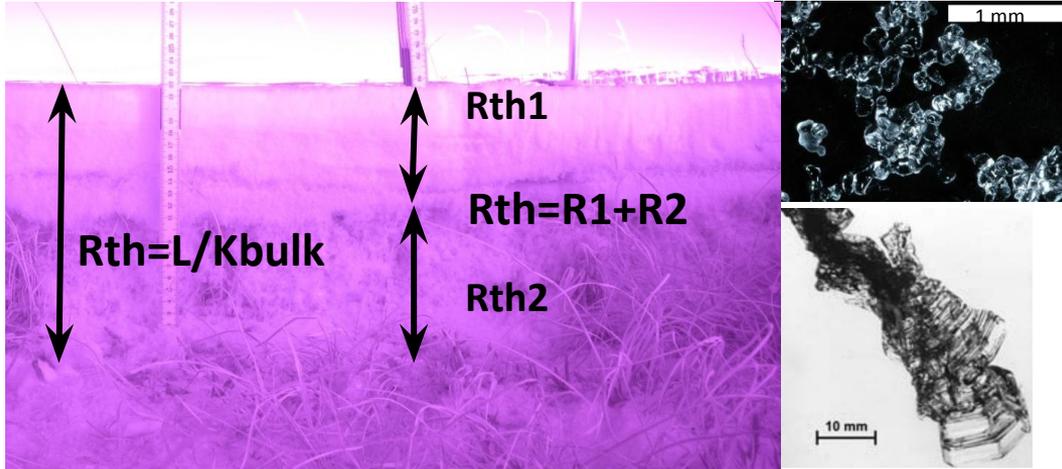
Rôles de la végétation basale :

- ★ Protège de l'érosion et limite la compaction ;
- ★ Favorise les poches d'air, les gradients de température, et la croissance du givre de profondeur ;

Liston & Elder, 2006 ; Hutchison, 1965 ;
Pomeroy et al., 2006 ; Sturm and Benson, 1997 ;
Sturm et al., 2005 ; Domine et al., 2022.



Neige arctique : Propriétés thermiques



Une conductivité thermique mal connue

- ★ **Peu d'observations :**
 - Mesures rares et ponctuelles, surtout dans l'Arctique Nord Américain
 - Mesures surtout en fin de saison

(e.g. Sturm et al., 1997 ; Dominé et al., 2016a, 2016b ; Barrere et al., 2017)

- ★ Principalement par **aiguille chauffante** ou *needle probe*, inadapté au givre de profondeur

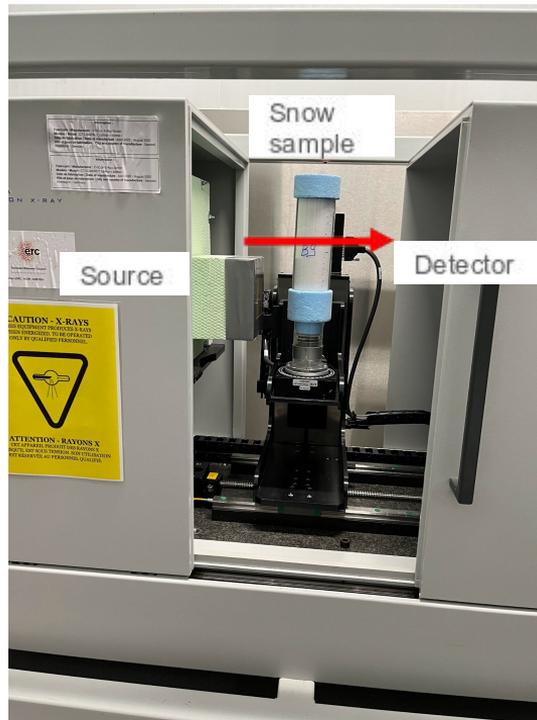
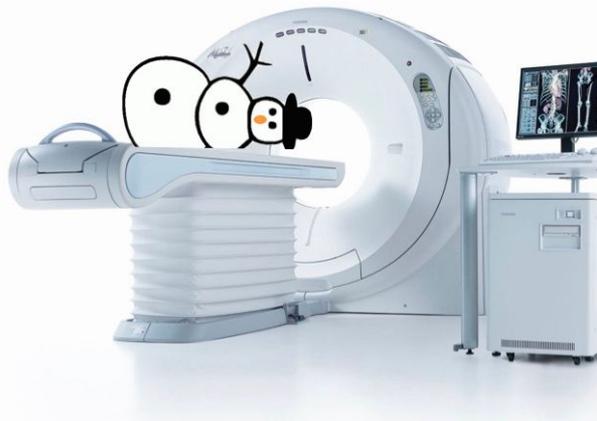


Source : Domine et al., 2016

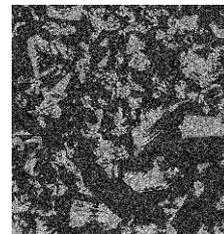


Conductivité thermique du givre de profondeur : $K \sim .03-0.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

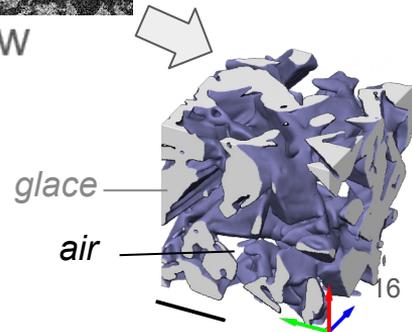
Nouveau moyen d'observation : Tomographie par rayons X



hands

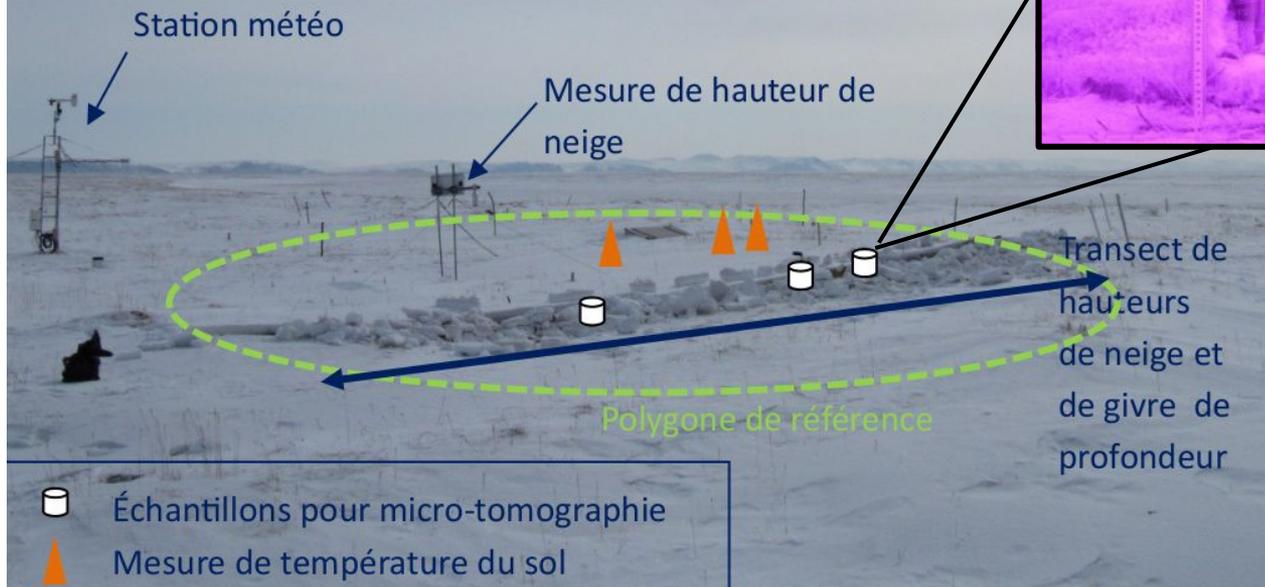
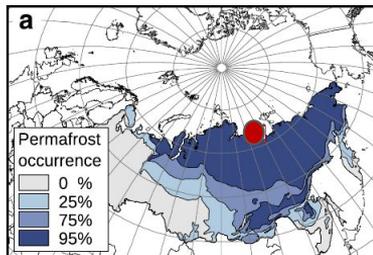


snow

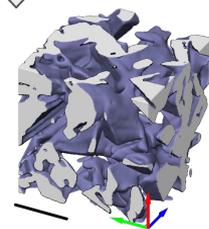


Les observations de Samoylov

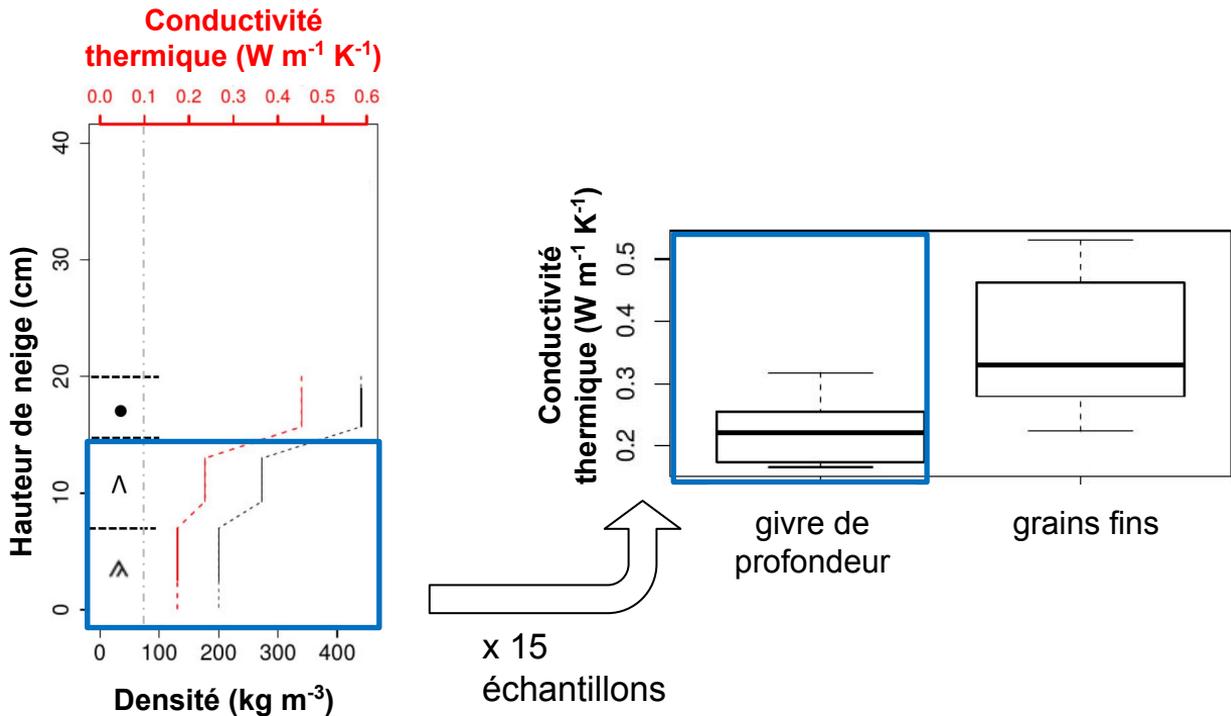
Avril 2013, 72°N



Analyse d'échantillons prélevés par micro-tomographie



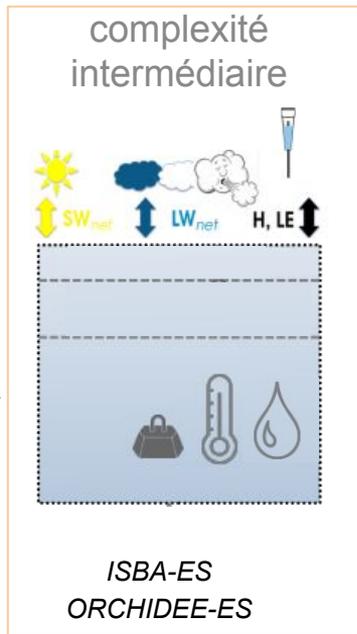
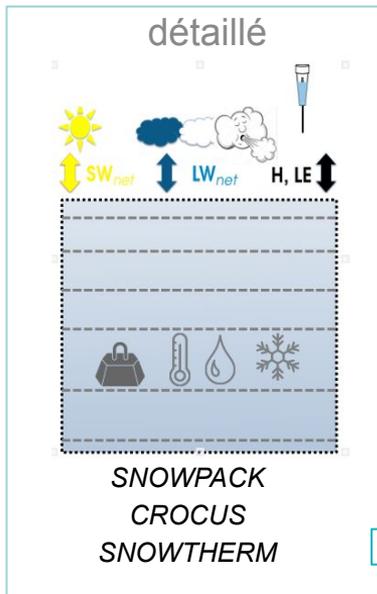
Conductivité thermique du givre de profondeur arctique



Source : Gouttevin et al., 2018

- ★ Des conductivités thermiques du givre de profondeur arctique plus importantes que mesurées par aiguilles chauffantes

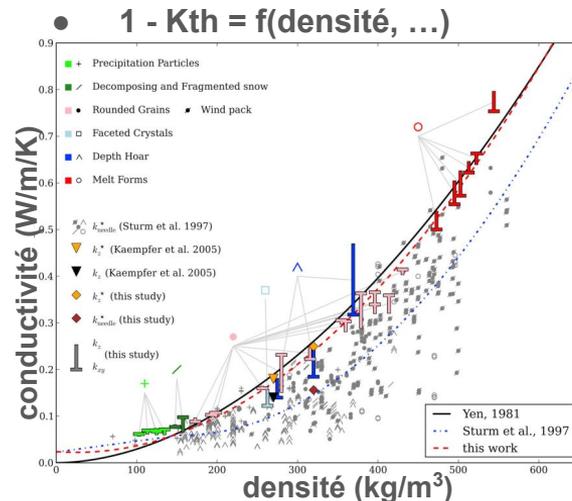
(Tentative de) Simulation d'un manteau neigeux arctique



AVALANCHES
(alpin)

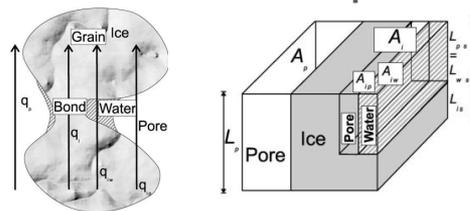
CLIMAT
(global)

Conductivité thermique

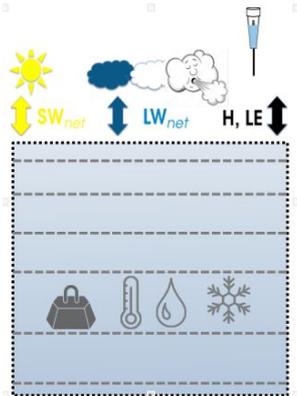


- mesures hétérogènes
- anisotropie non prise en compte
- peu d'observations Arctiques

● 2 - Formulation conceptuelle :



(Tentative de) Simulation d'un manteau neigeux arctique

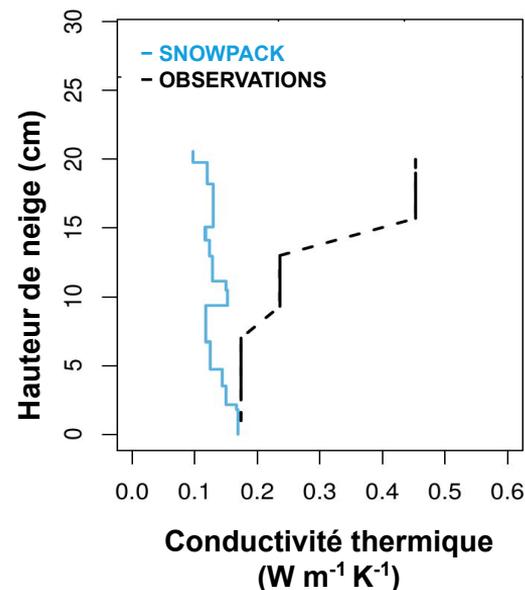
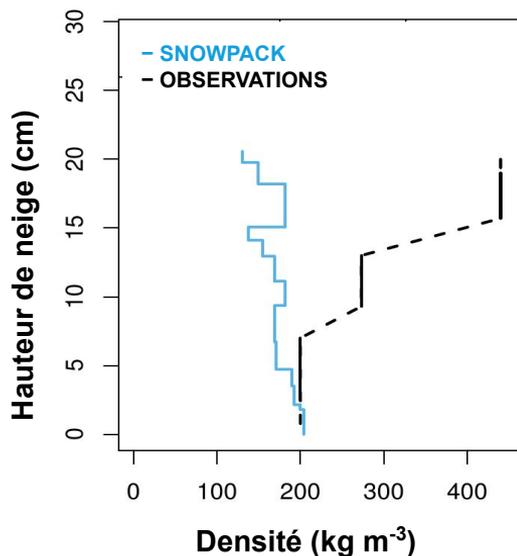


Modèle de neige détaillé SNOWPACK (ou Crocus)

Hypothèses

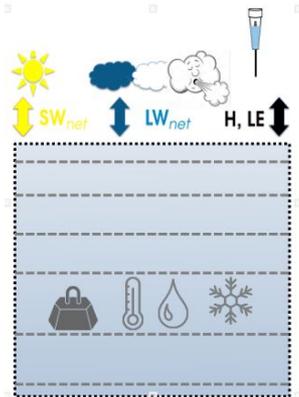
- ★ sous-estimation de la compaction par le vent
- ★ rôle de la végétation basale et du flux de vapeur au sein du manteau neigeux

*Domine et al., 2019 ; Barrere et al., 2016 ;
Dominé et al., 2016 ; Ménard et al., 2024*



Conductivité thermique agrégée : $K_{\text{bulk}} = 0.23 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
 $0.11 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$

(Tentative de) Simulation d'un manteau neigeux arctique



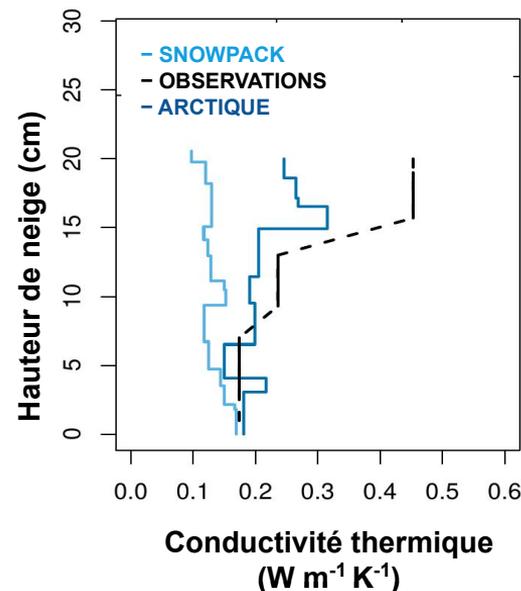
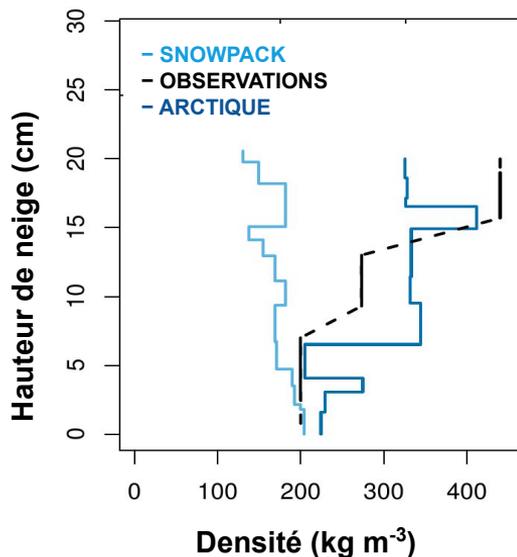
Modèle de neige détaillé SNOWPACK (ou Crocus)

Hypothèses :

- ★ sous-estimation de la compaction par le vent
- ★ rôle de la végétation basale et du flux de vapeur au sein du manteau neigeux

ARCTIQUE

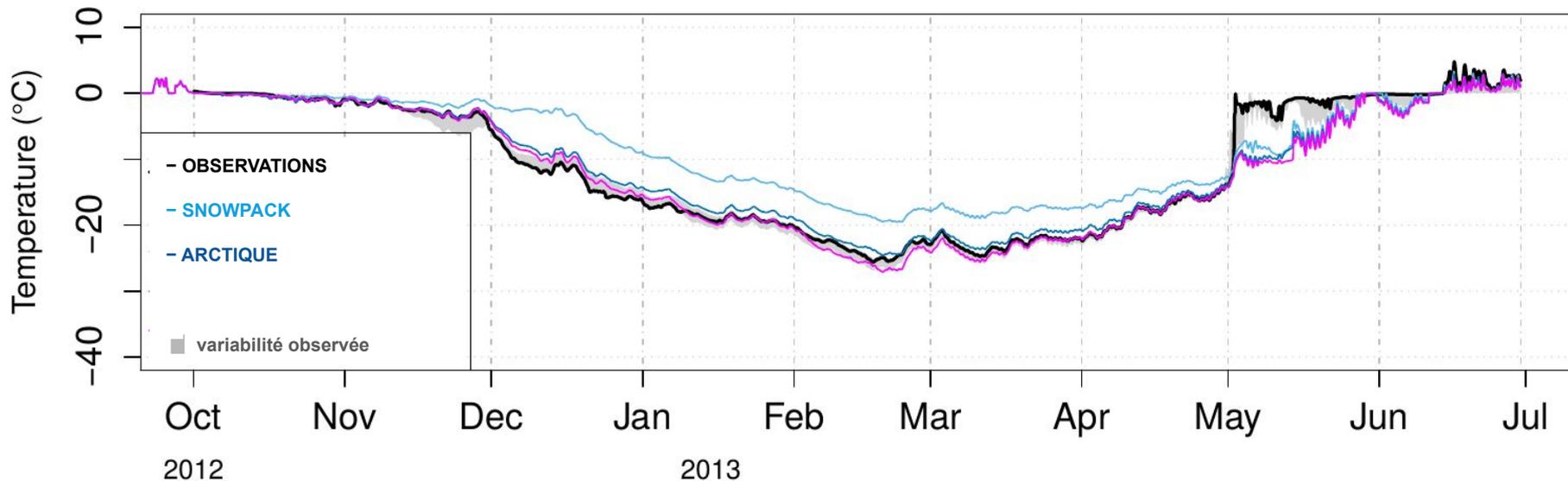
*Domine et al., 2019 ; Barrere et al., 2016 ;
Dominé et al., 2016 ; Ménard et al., 2024*



Conductivité thermique agrégée : $K_{bulk} = 0.23 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
 $0.11 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
 $0.21 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Cohérence avec la dynamique thermique des sols ?

Température du sol à Samoylov, à 5 cm de profondeur (hiver 2012-2013)

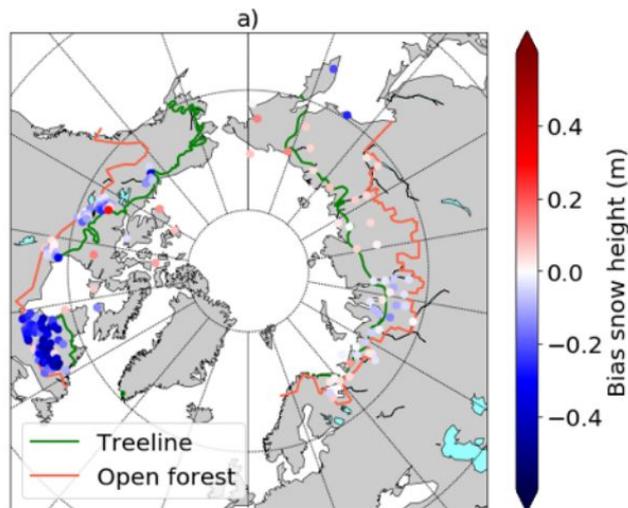


Source : Gouttevin et al., 2018

★ Potentiel de ces modifications empiriques pour la simulation du régime thermique des sols

Implications à grande échelle

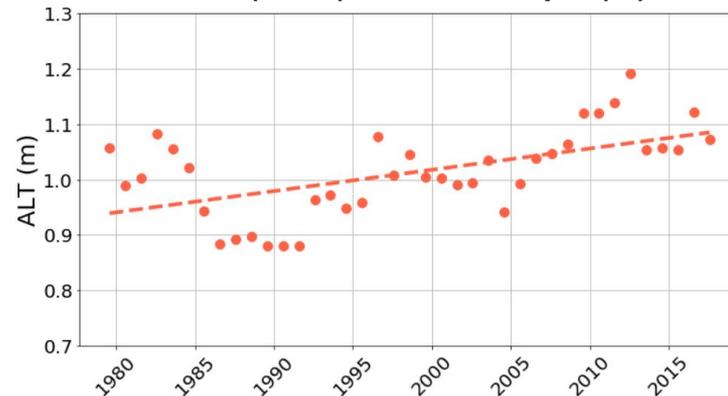
- Réduction de certains biais de simulation des manteaux neigeux Arctiques (densité, hauteur de neige)



Source : Royer et al 2021

- Impact sur la modélisation des pergélisols

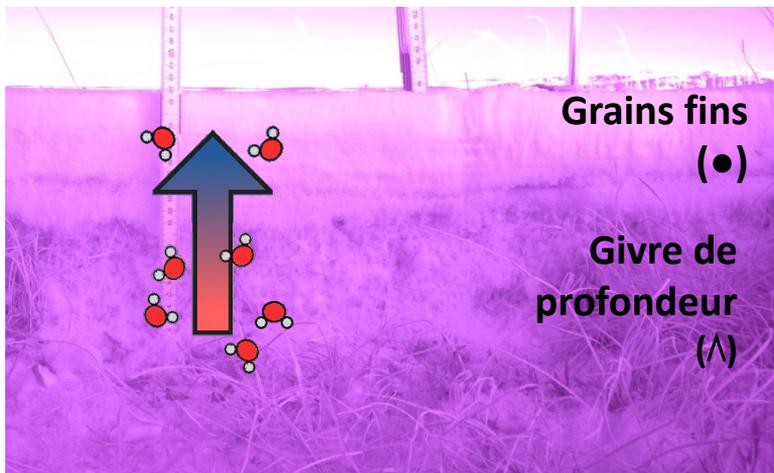
Evolution simulée de l'épaisseur de la couche active (=ALT) dans l'Arctique (m)



Source : Royer et al 2021

Limitations majeures :

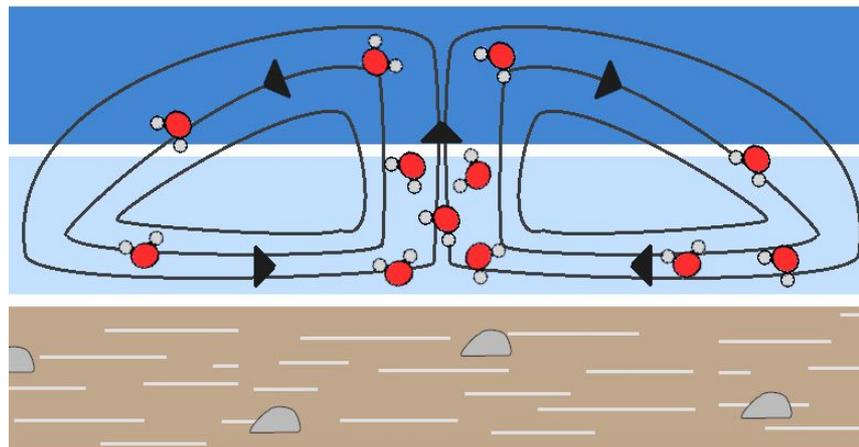
- Des processus mal contraints et mal décrits dans les modèles, en raison d'un déficit d'observations



Flux de vapeur

(micro-physique des interfaces)

Touzeau et al., 2018 ; Jafari et al., 2020 ; Brondex et al., 2023



Convection

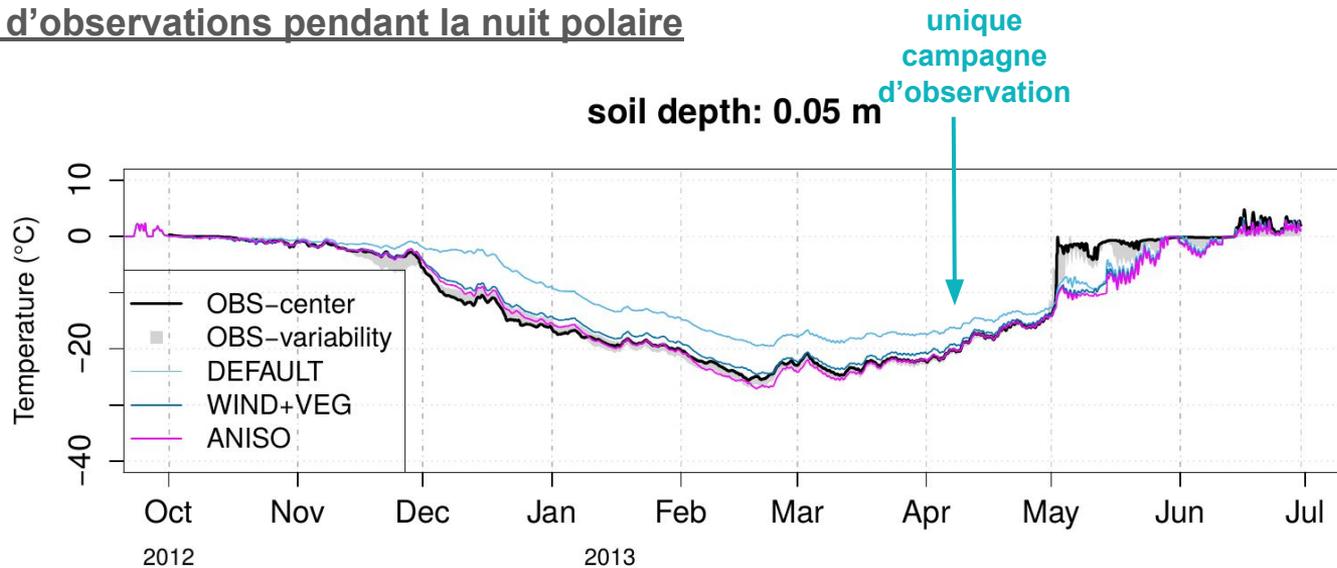
(Combien ? Quand ? Où ?)

Sturm et al., 1991 ; Jafari et al., 2022

+ difficultés de couplage numérique, effets d'échelle spatiale

Limitations majeures :

- Des processus mal contraints et mal décrits dans les modèles, en raison d'un déficit d'observations
- Absence d'observations pendant la nuit polaire



←—→
Quelques lois physiques et beaucoup d'empirisme

- développement de la couche de givre de profondeur
- évolution temporelle des propriétés thermiques

Campagne de mesure hivernale continue à Cambridge Bay, Oct 2023- Mai 2024

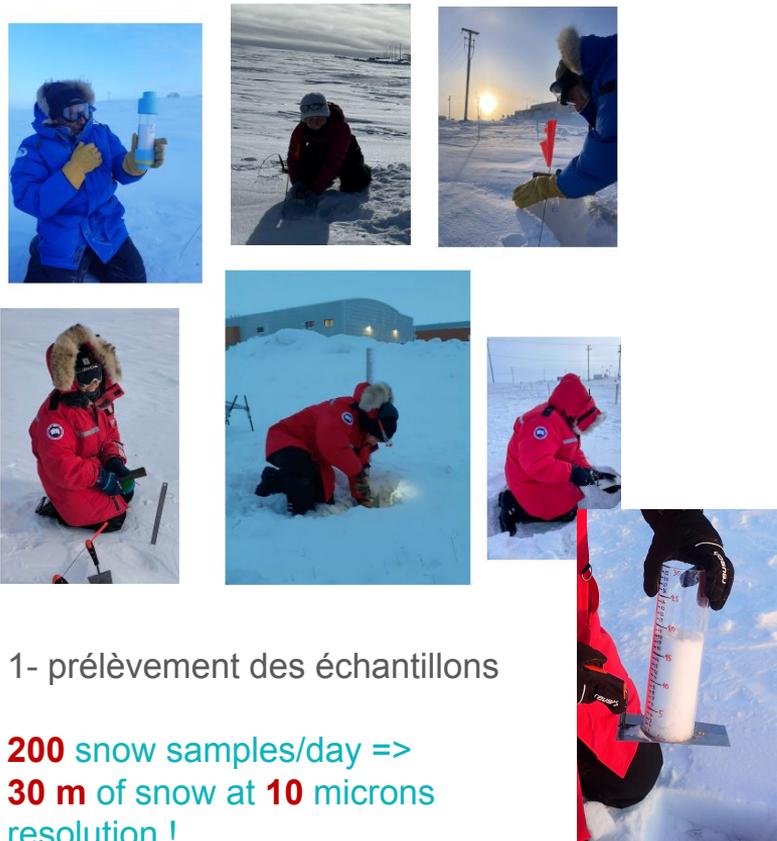


Objectif : observer la formation, transformation et fonte du manteau neigeux

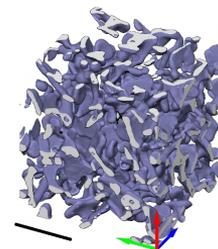
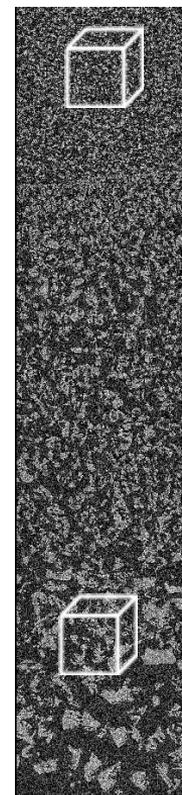
- **Observations météo**
- Mesures conventionnelles du manteau neigeux :
 - hauteurs de neige
 - stratigraphie
 - résistance à la pénétration
 - densité
 - profils de température en continu dans la neige
- **Tomographie aux rayons X**



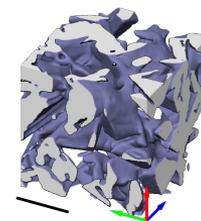
Campagne de mesure hivernale continue à Cambridge Bay, Oct 2023- Mai 2024



2 - scan tomographique



- Evolution temporelle de la microstructure
- Calcul des propriétés physiques
- Amélioration des modèles



2 - post-traitement et analyse des résultats

Focus sur la neige de montagne des régions alpines



Photo : Florent Dominé

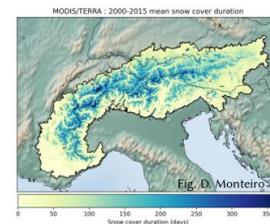
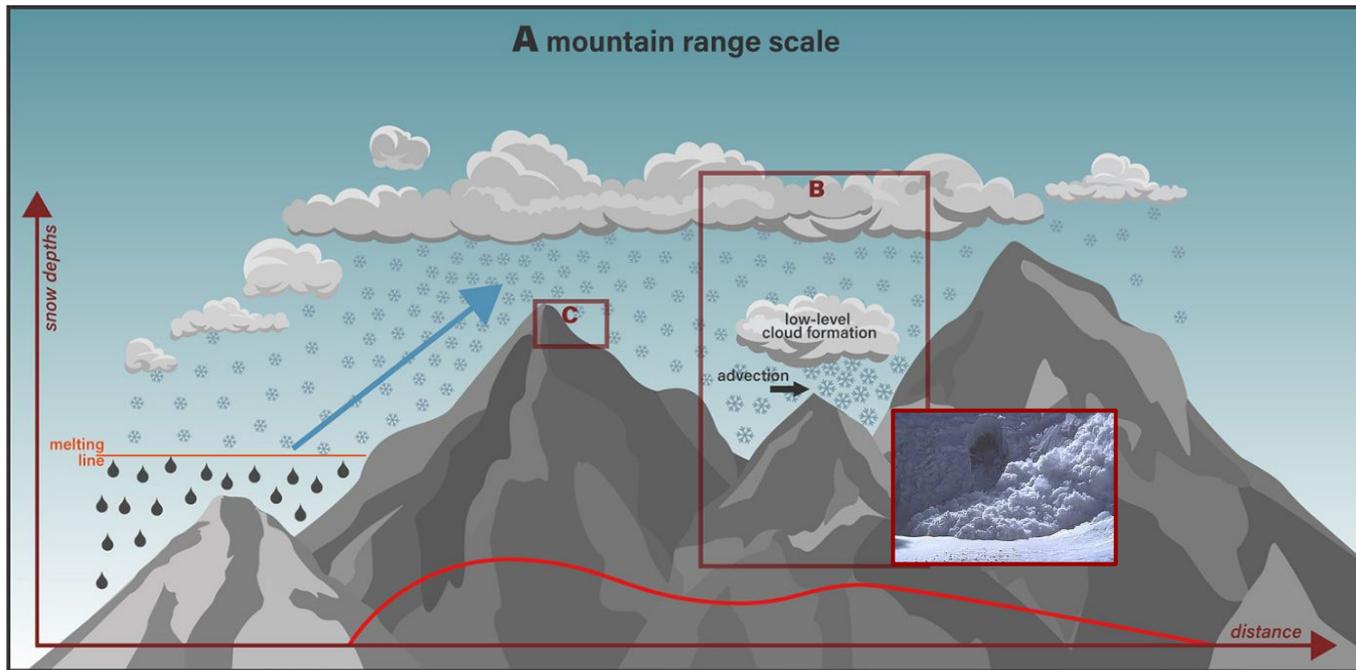




Neige de montagne

variabilité à toutes les échelles

ACCUMULATION

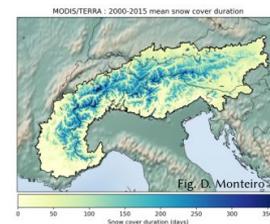
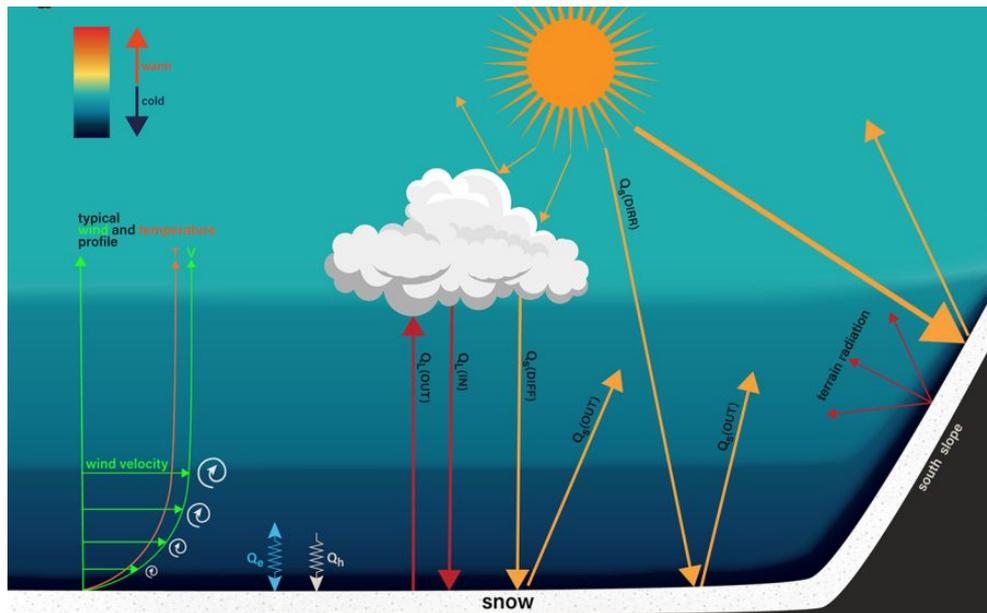




Neige de montagne

variabilité à toutes les échelles

BILAN d'ÉNERGIE et FONTE



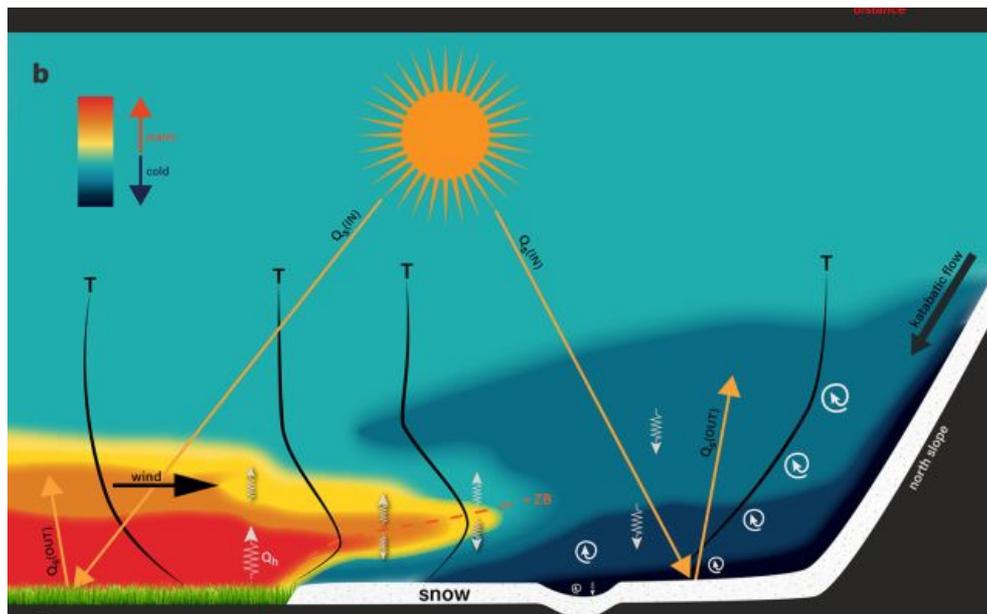
Source : Mott et al., 2019



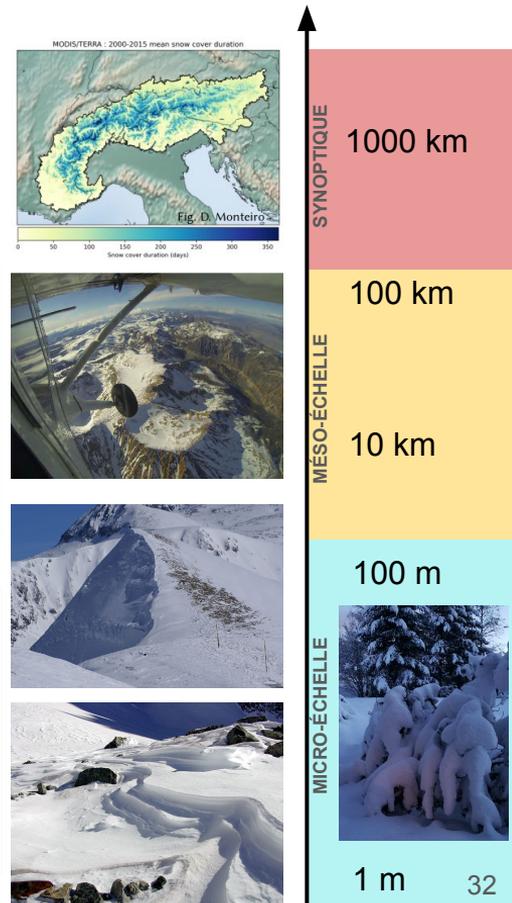
Neige de montagne

variabilité à toutes les échelles

BILAN d'ÉNERGIE et FONTE



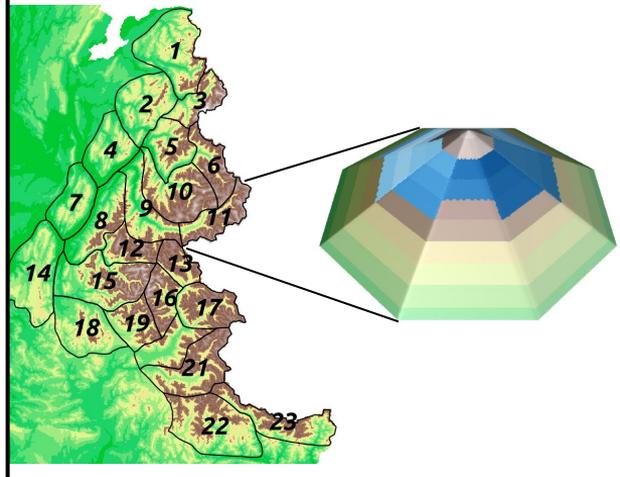
Source : Mott et al., 2019



Représenter la météorologie de montagne pour la neige

- **Potentiel des modèles d'atmosphère à haute résolution spatiale pour la nivologie** (RCM et prévision numérique du temps)

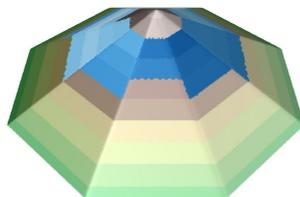
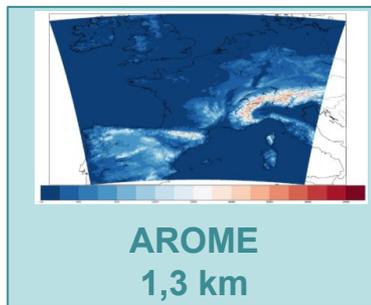
S2M: Météo SAFRAN + neige Crocus



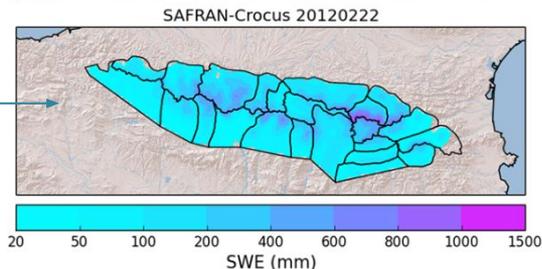
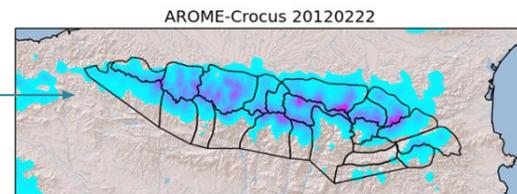
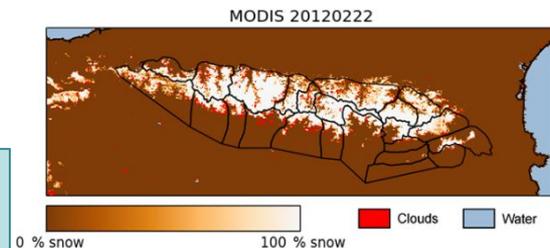
Brun et al., 1992 ; Durand et al., 2009 ; Vionnet et al., 2012 ; Vernay et al., 2021

- ébauche : modèle de méso-échelle (ARPEGE)
- échelle des massifs pour avoir suffisamment d'observations à assimiler
- réanalyse de référence pour débiaisage des RCM EURO-Cordex (ADAMONT)

*Vionnet et al., 2016
Quéno et al., 2016
Vionnet et al., 2019
Mott et al., 2015
Monteiro et al., 2022*



Fraction d'enneigement



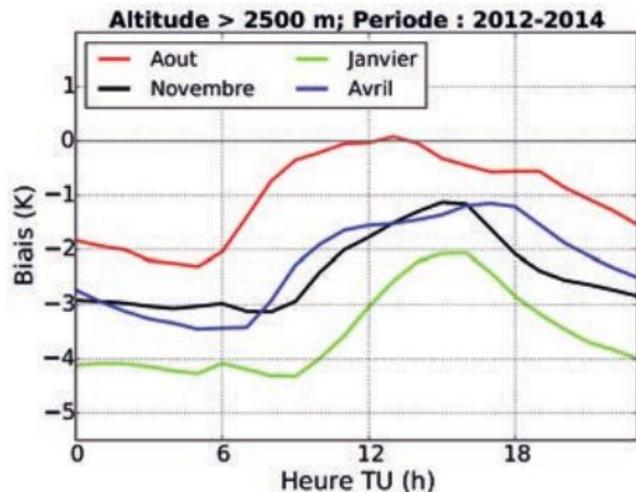
Source : Quéno et al., 2016

Le potentiel des modèles de prévision numérique du temps

➤ Biais forts impactant pour la nivologie :

- ★ En température : biais froid altitudinal et chaud en vallée (e.g. Vionnet et al., 2016)

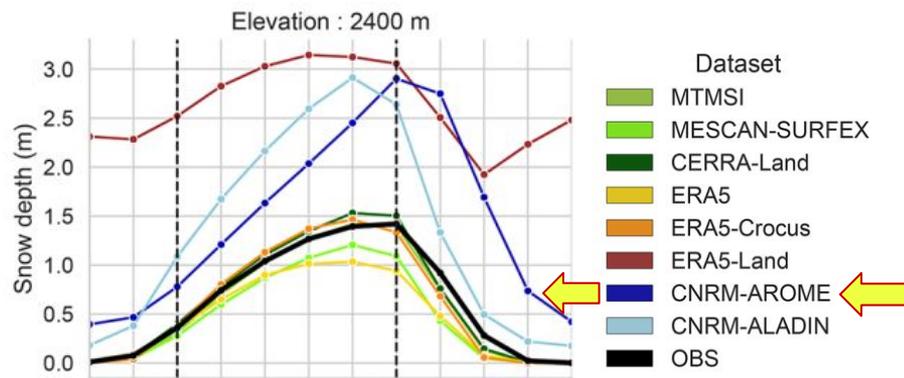
Biais de température à 2 m dans AROME



conséquences :



- limite pluie-neige et de la pluie-sur-neige
- accumulation et fonte
- métamorphisme



Suraccumulation de neige en moyenne et haute altitude, fonte retardée (1985-2005)

(Monteiro et al., 2023)

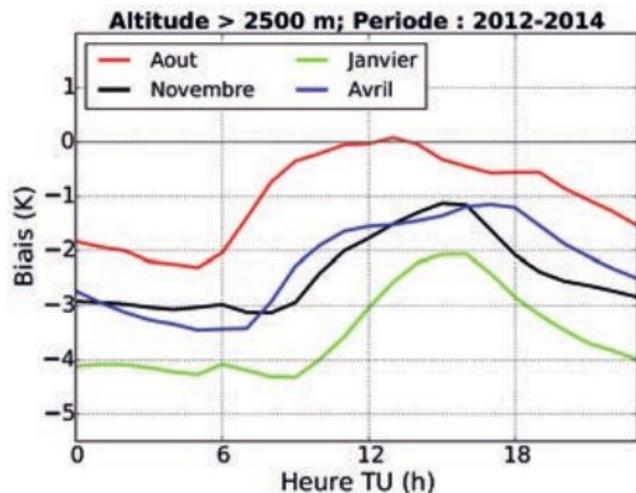
- ★ En précipitations et en rayonnement (liés).

Le potentiel des modèles à échelle kilométrique (RCM/PNT)

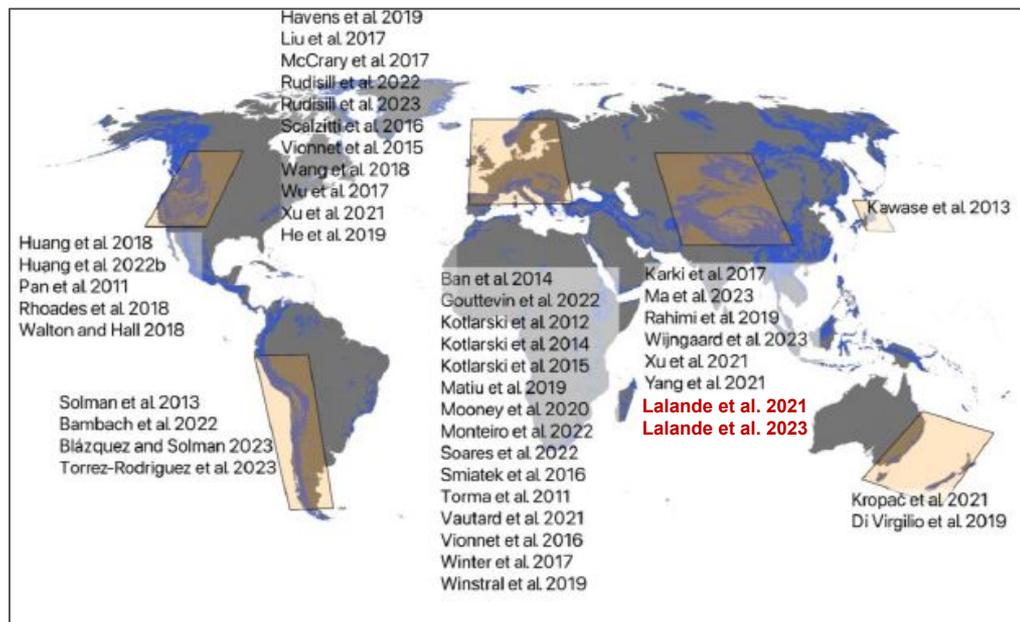
➤ Biais forts impactant pour la nivologie :

★ En température : biais froid altitudinal et chaud en vallée (e.g. Vionnet et al., 2016)

Biais de température à 2 m dans AROME



➤ Ces biais sont généralisés !!!!!



44 -> 46 études entre 2011 et 2023, montrant dans leur immense majorité des biais froids dans les montagnes du monde, et chauds en vallée ; Rudisill et al. 2024

★ En précipitations et en rayonnement (liés).

Aux origines du biais froid en altitude / modèle AROME

Caractérisation du biais en t2m d'AROME, liens avec les composantes du bilan d'énergie de surface

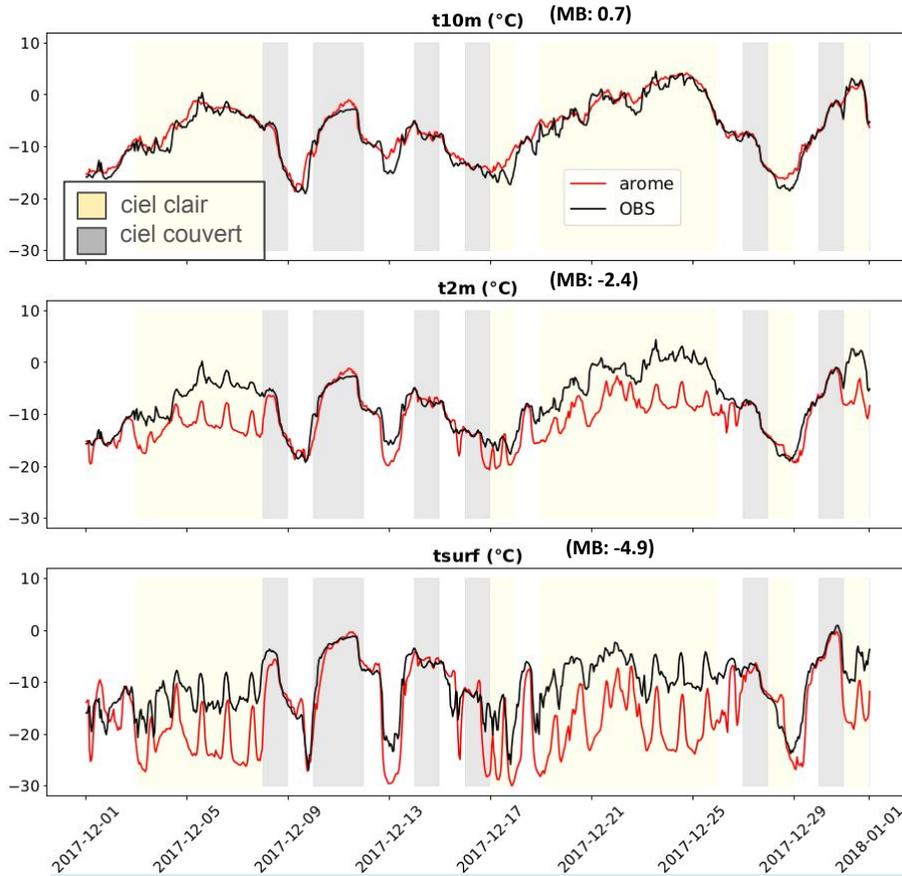
Col du Lac Blanc (2720m a.s.l.)



Col du Lautaret (2050m a.s.l.)

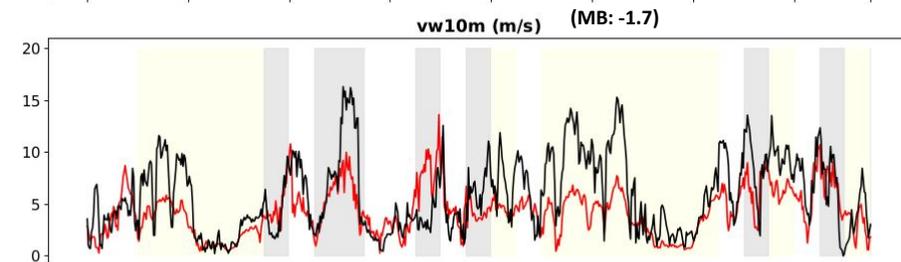
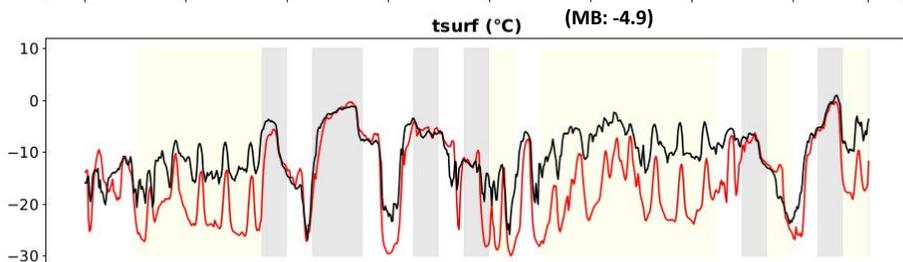
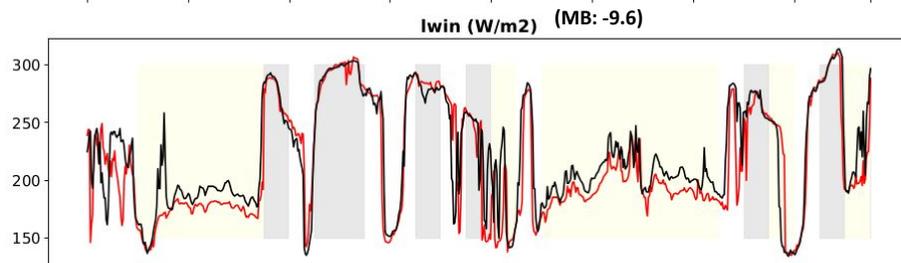
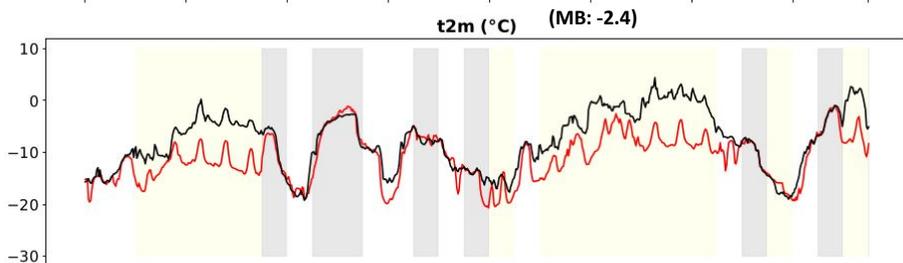
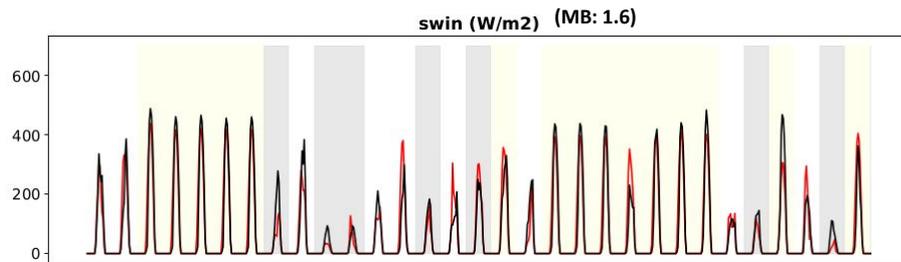
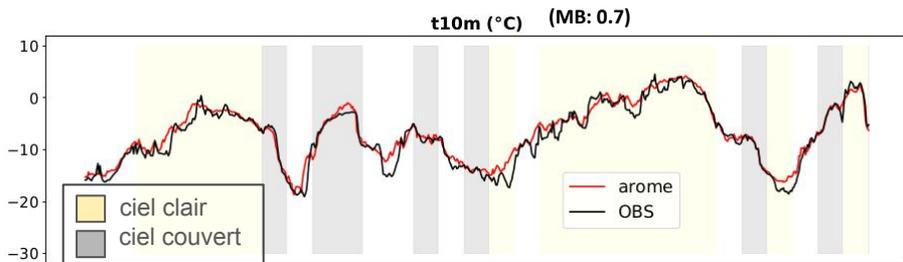


Aux origines du biais froid en altitude / modèle AROME



→ Le biais est absent à 10m, il procède du couplage entre la surface et d'atmosphère

Aux origines du biais froid en altitude / modèle AROME



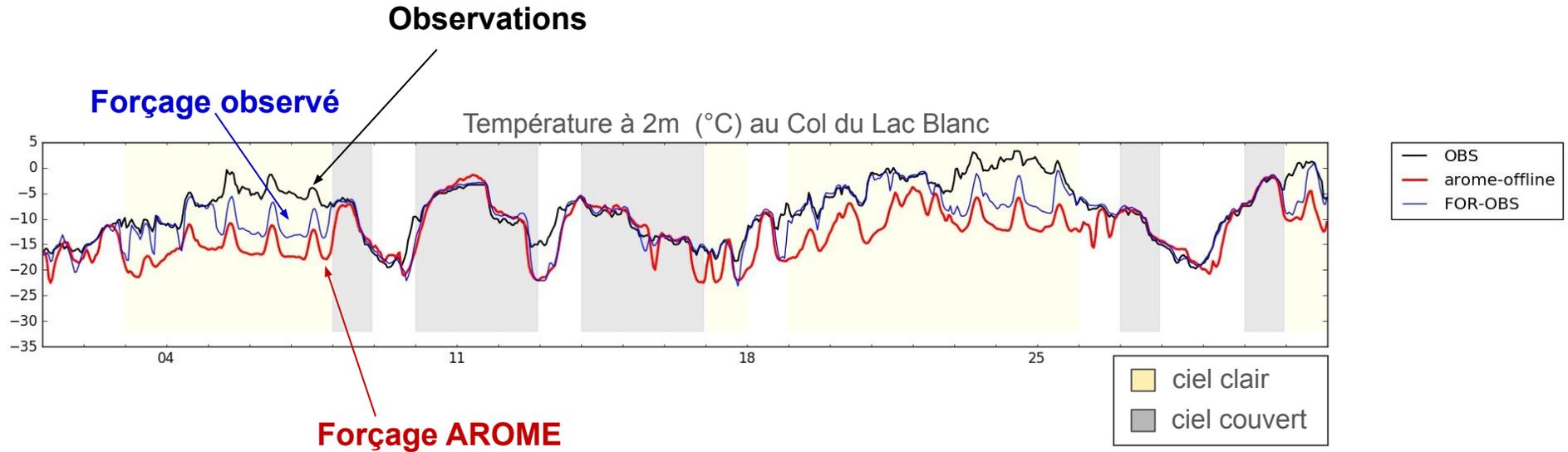
2017-12-01 2017-12-05 2017-12-09 2017-12-13 2017-12-17 2017-12-21 2017-12-25 2017-12-29 2018-01-01

2017-12-01 2017-12-05 2017-12-09 2017-12-13 2017-12-17 2017-12-21 2017-12-25 2017-12-29 2018-01-01

Le biais est absent à 10m, il procède du couplage entre la surface et d'atmosphère

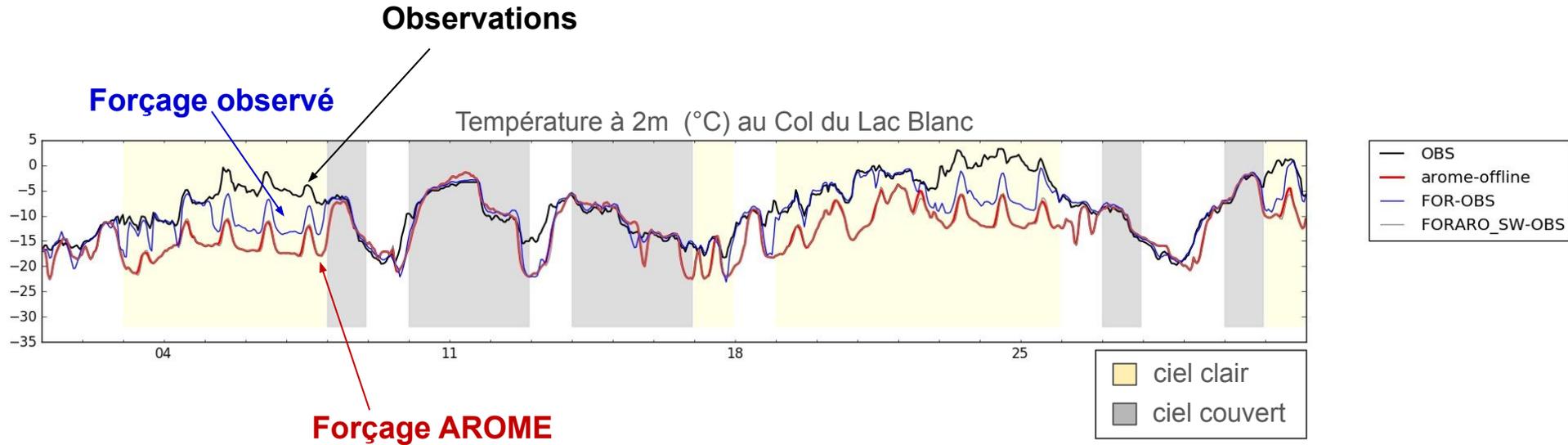
Sous-estimation importante du vent, et du rayonnement LWin par AROME

Aux origines du biais froid en altitude / modèle AROME



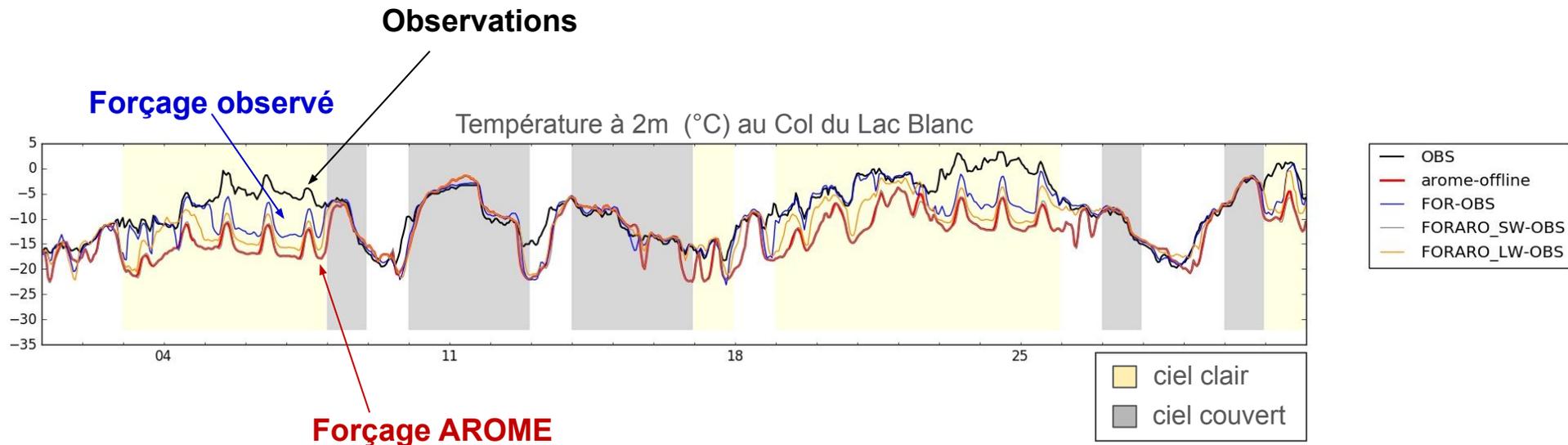
★ ~ 70% de correction de biais avec un forçage observé sur la période hivernale

Aux origines du biais froid en altitude / modèle AROME



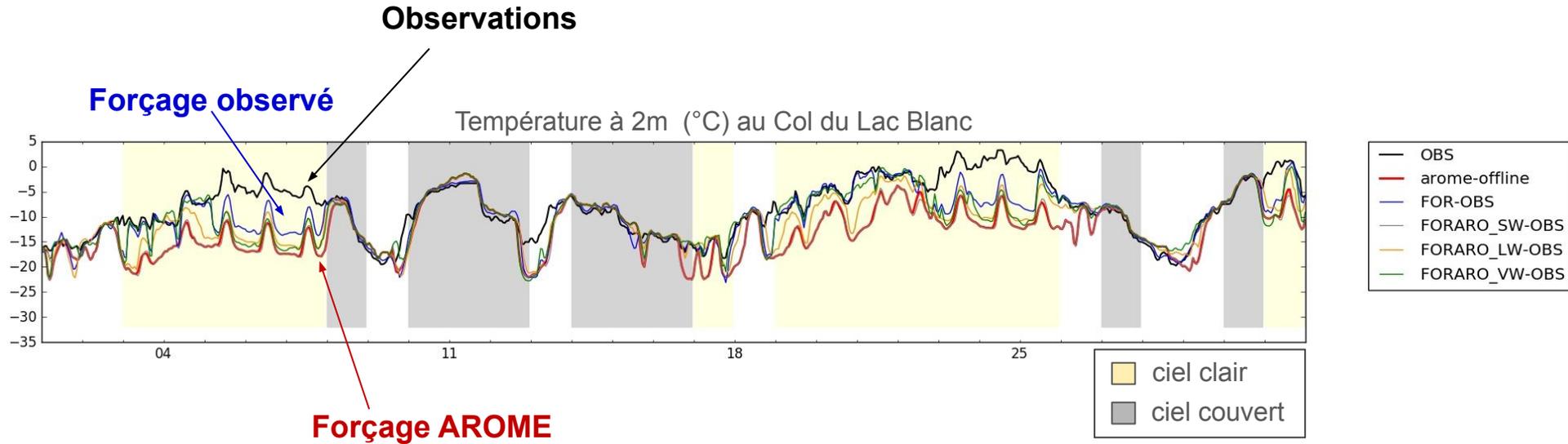
★ ~ 70% de correction de biais avec un forçage observé sur la période hivernale

Aux origines du biais froid en altitude / modèle AROME



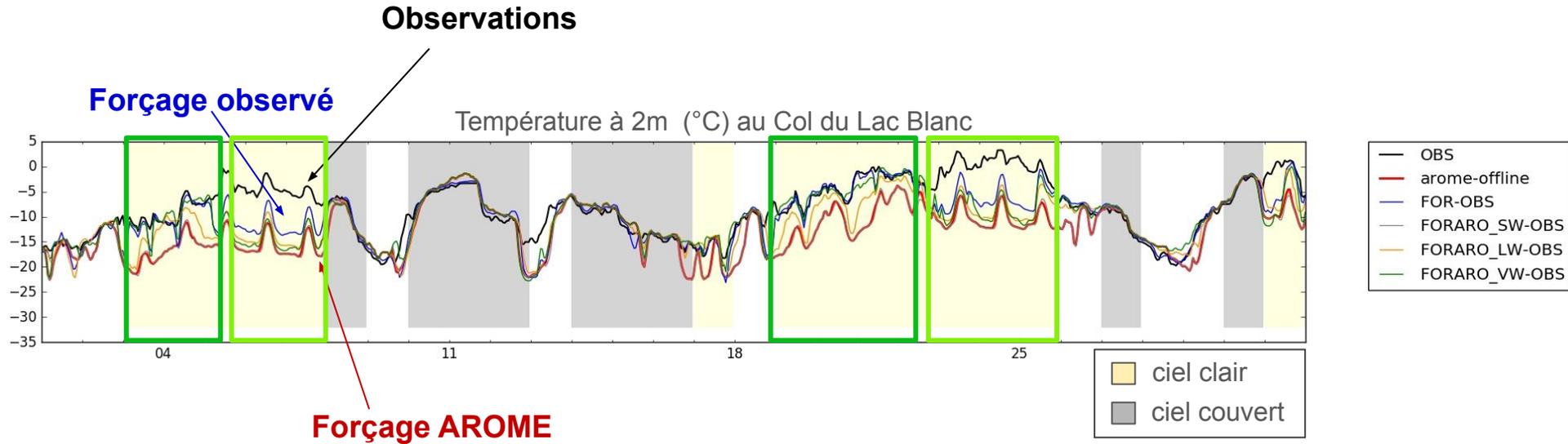
★ ~ 70% de correction de biais avec un forçage observé sur la période hivernale

Aux origines du biais froid en altitude / modèle AROME



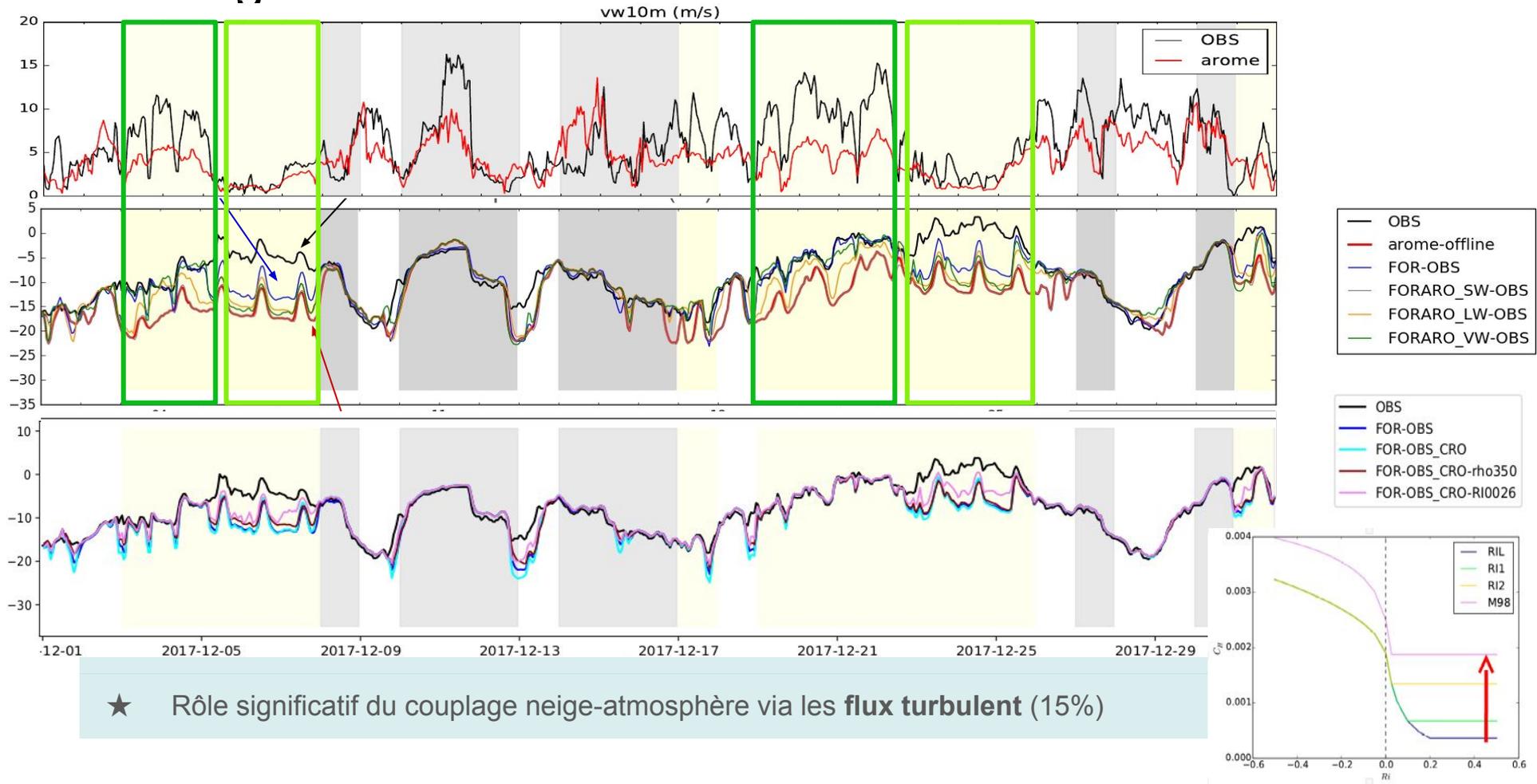
★ ~ 70% de correction de biais avec un forçage observé sur la période hivernale

Aux origines du biais froid en altitude / modèle AROME

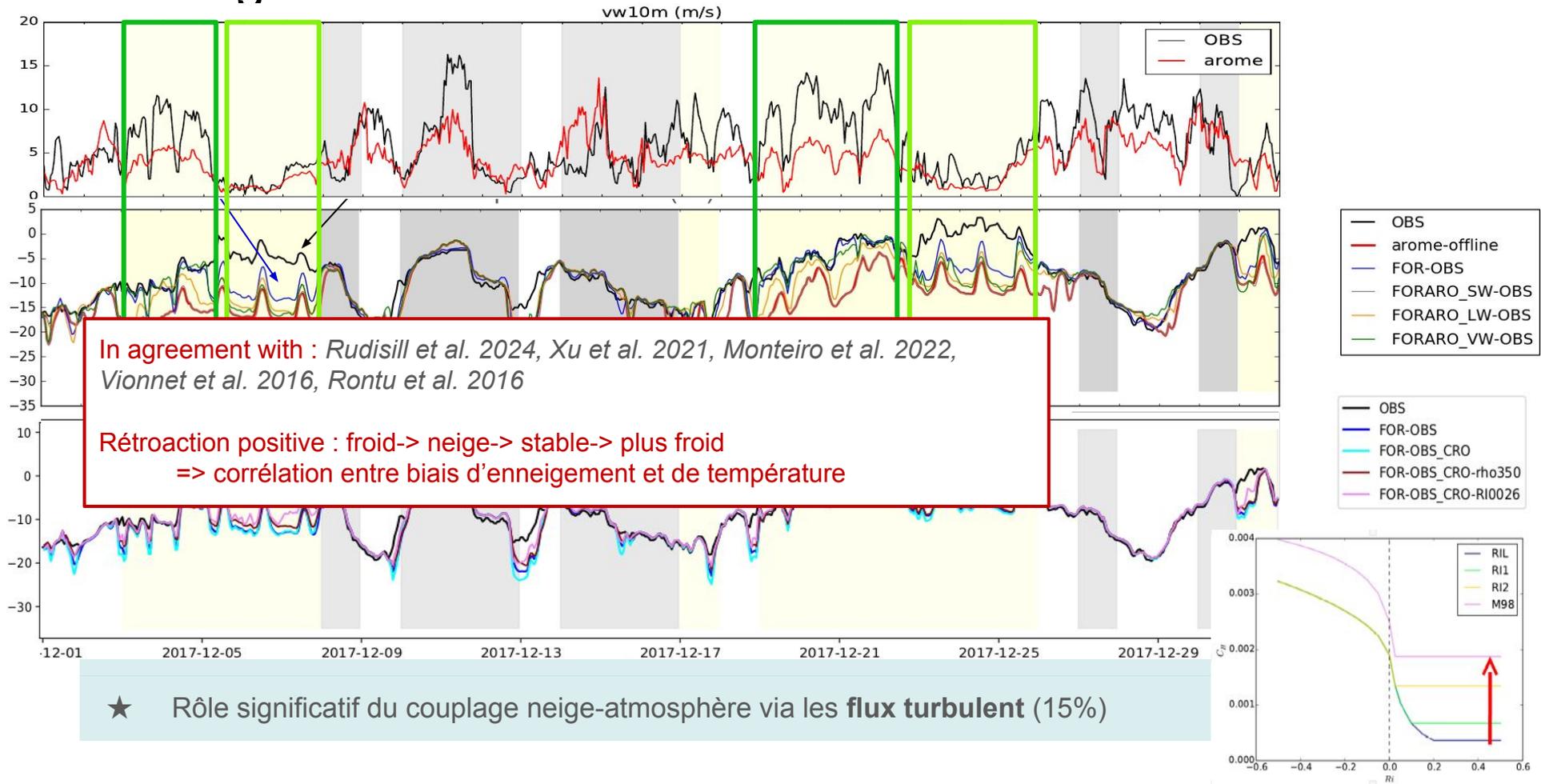


- ★ ~ 70% de correction de biais avec un forçage observé sur la période hivernale
- ★ Rôle majeur du **vent** et du **rayonnement thermique** de l'atmosphère dans ces biais (~70% des 70%)

Aux origines du biais froid en altitude / modèle AROME



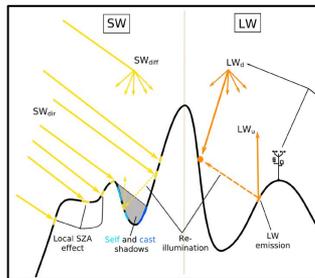
Aux origines du biais froid en altitude / modèle AROME



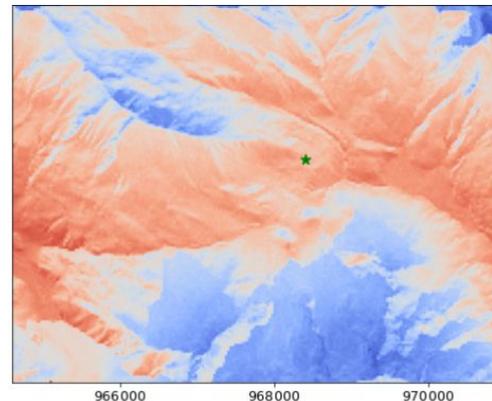
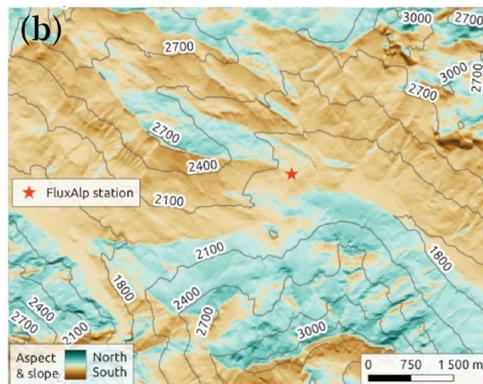
Perspectives pour progresser dans la correction de ces biais

Perspectives pour progresser dans la correction de ces biais

★ La prise en compte du rayonnement 3D dans les modèles



- effet négligé dans les modèles (en LW comme en SW)
- un impact fort
- potentiel d'**émulateurs** de modèles plus complexes (e.g. Robledano et al 2022) ou de paramétrisations sous-maille apprises sur ces modèles (e.g. Helbig et al. 2017, Le Toumelin et al., 2023a)
- **importance de l'observation in-situ !!!**



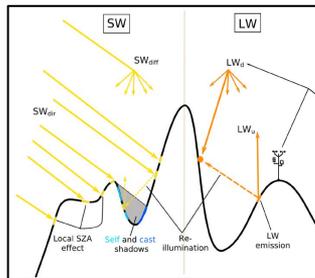
Robledano et al 2022

Effets de l'émission thermique des pentes : +1°C de Tsurf en moyenne sur 50 km² en Oisan, +14 W m⁻² sur le plateau Tibétain

(Robledano et al 2022, Lee et al., 2013)

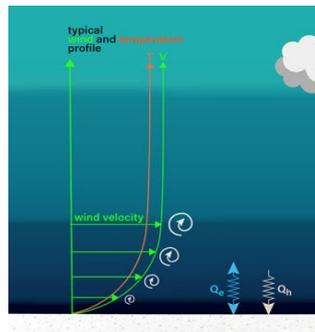
Perspectives pour progresser dans la correction de ces biais

★ La prise en compte du rayonnement 3D dans les modèles



- effet négligé dans les modèles (en LW comme en SW)
- un impact fort
- potentiel d'**émulateurs** de modèles plus complexes (e.g. Robledano et al 2022) ou de paramétrisations sous-maille apprises sur ces modèles (e.g. Helbig et al. 2017, Le Toumelin et al., 2023a)
- **importance de l'observation in-situ !!!**

★ La formulation des échanges turbulents en terrain complexe

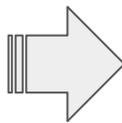


- Conditions d'application de la théorie de Monin-Obhukov violées
- Rôle des flux de chaleurs non-turbulents, et/ou de la turbulence locale générée par le micro-relief (e.g. Conway et al 2018, Feigenwinter et al, 2008)
- **Résolution verticale** des modèles proche de la surface

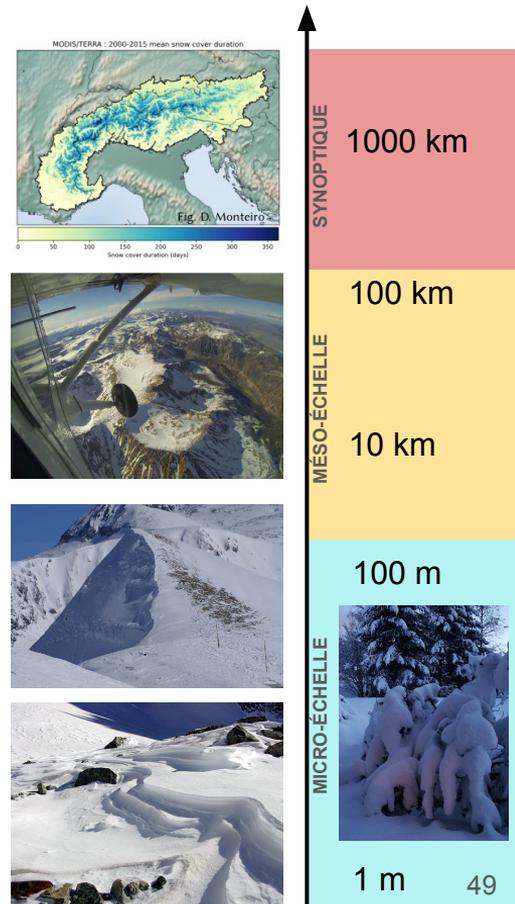
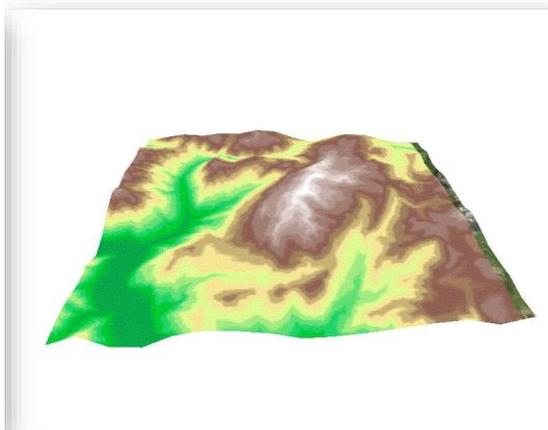
- ★ **Rôle de la fraction d'enneigement** (Lalande et al., 2023) -> possibilité de mieux la contraindre grâce aux observations satellite

Vers l'hectométrie : Descendre en échelle

AROME model
1.3 / 2.5 km
Seity et al. 2011

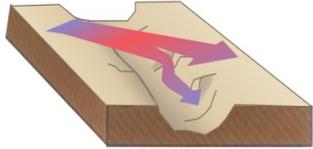


Digital elevation model
IGN – 30m

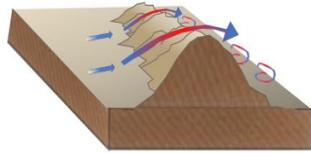


Descente d'échelle du vent en montagne

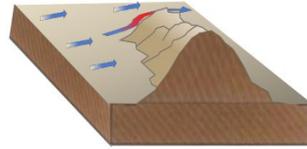
Le vent en montagne : effets orographiques et effets thermiques



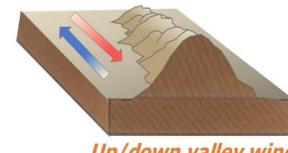
Channeling



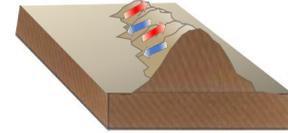
Speed up on crest / leeward recirculation



Deflection



*Up/down valley winds
(thermally driven winds)*

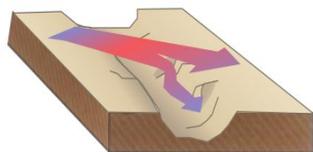


*Up/down slope winds
(thermally driven winds)*

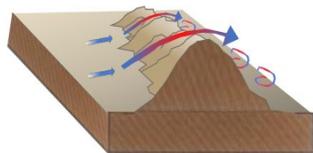
adapté de Whiteman, 2000

Descente d'échelle du vent en montagne

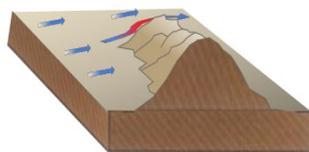
Le vent en montagne : effets orographiques et effets thermiques



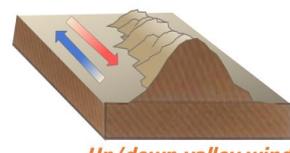
Channeling



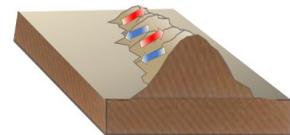
Speed up on crest / leeward recirculation



Deflection



*Up/down valley winds
(thermally driven winds)*



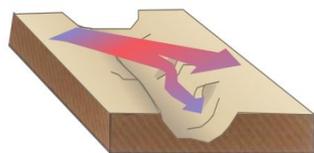
*Up/down slope winds
(thermally driven winds)*

adapté de Whiteman, 2000

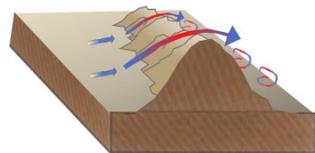
La simulation de ces effets est possible mais souvent coûteuse numériquement et peu compatible avec des simulations opérationnelles

Descente d'échelle du vent en montagne

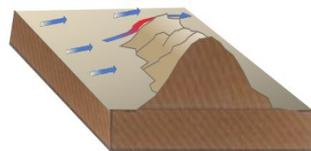
Le vent en montagne : effets orographiques et effets thermiques



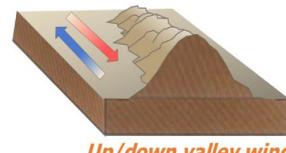
Channeling



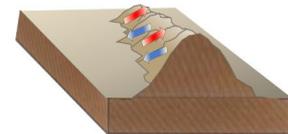
Speed up on crest / leeward recirculation



Deflection



Up/down valley winds
(thermally driven winds)

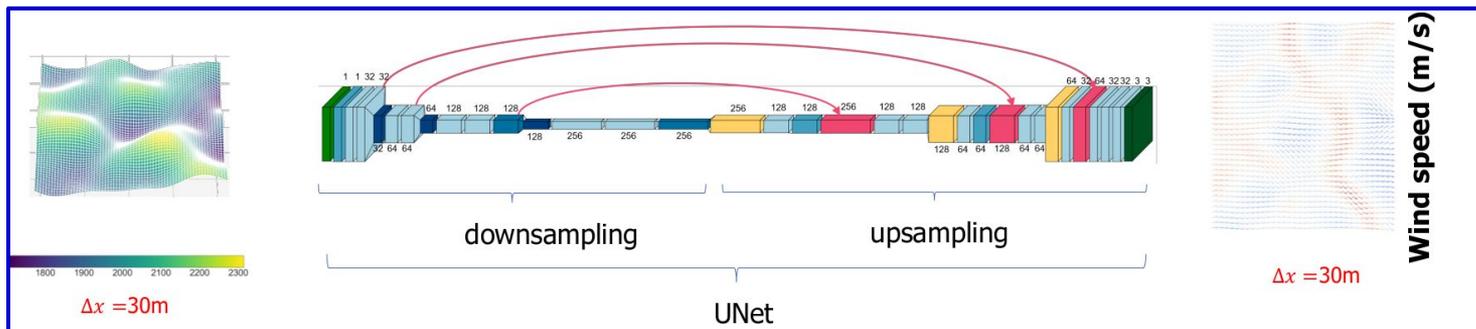


Up/down slope winds
(thermally driven winds)

adapté de Whiteman, 2000

La simulation de ces effets est possible mais souvent coûteuse numériquement et peu compatible avec des simulations opérationnelles

=> Construction d'un émulateur sur la base de simulations atmosphériques (Le Toumelin et al., 2023a)



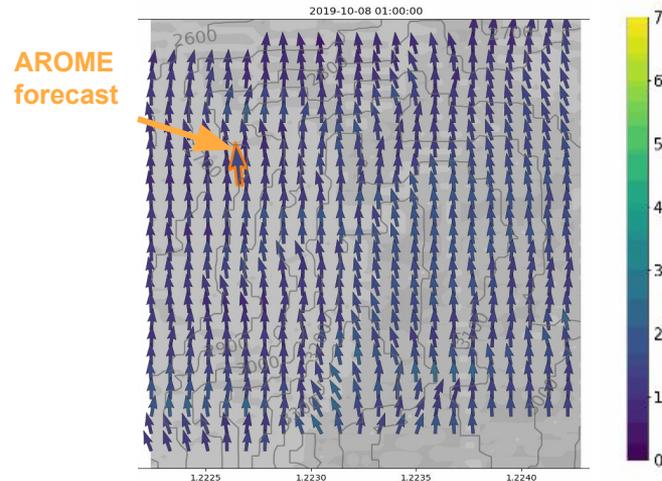
INPUTS : topographie à haute résolution spatiale, vent (~ 1km)

(Ronneberger et al., 2015)

LABELS : simulations ARPS, 30m
(Helbig et al., 2013)

DEVINE
Descente d'Échelle du Vent pour la Nivologie et ses Enjeux

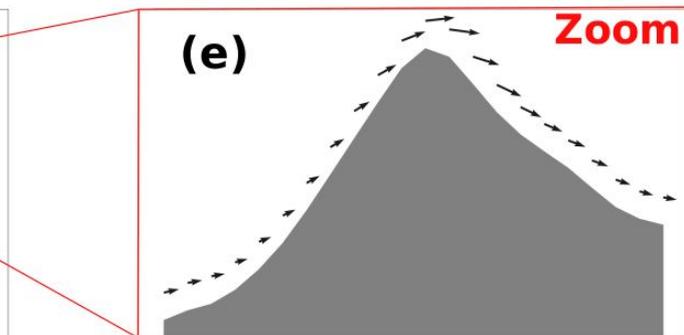
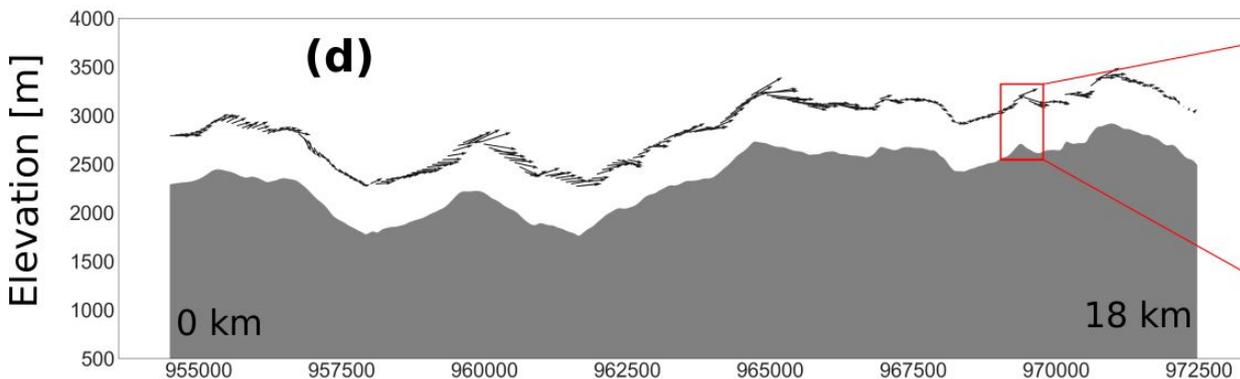
Descente d'échelle du vent en montagne



Spatialisation du vent par DEVINE
(Piz Corvatsch, Suisse, 3294 m)

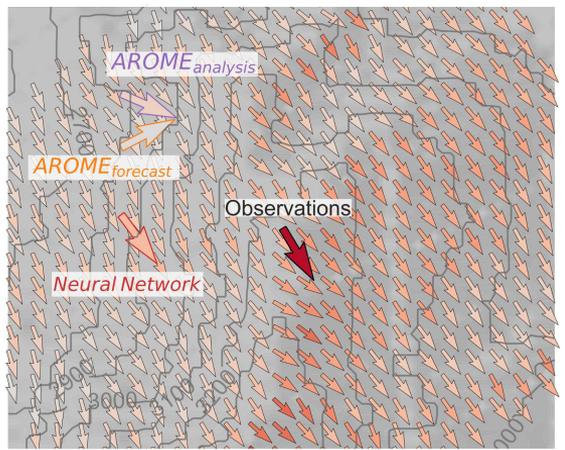
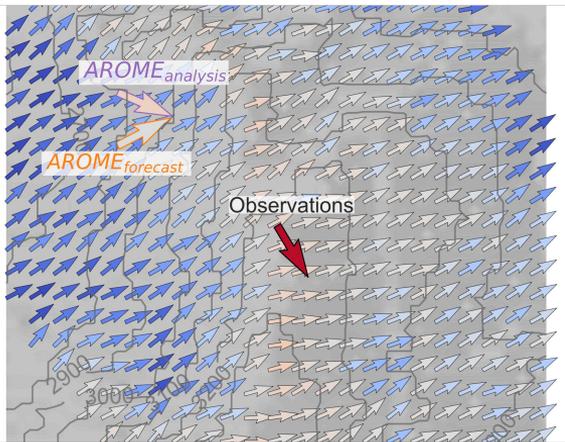
08/10/2019 –
10/10/2019

Le Toumelin et al., 2023a, b



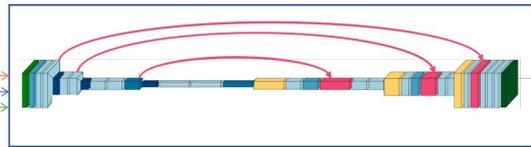
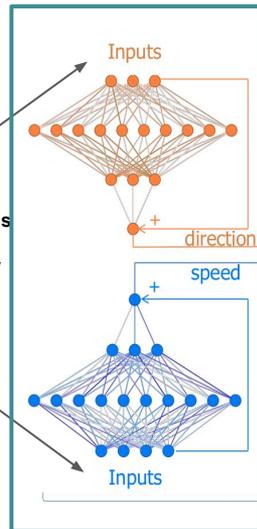
Descente d'échelle du vent en montagne

DEVINE au Piz Corvatsch



correction de biais

AROME fields and topography

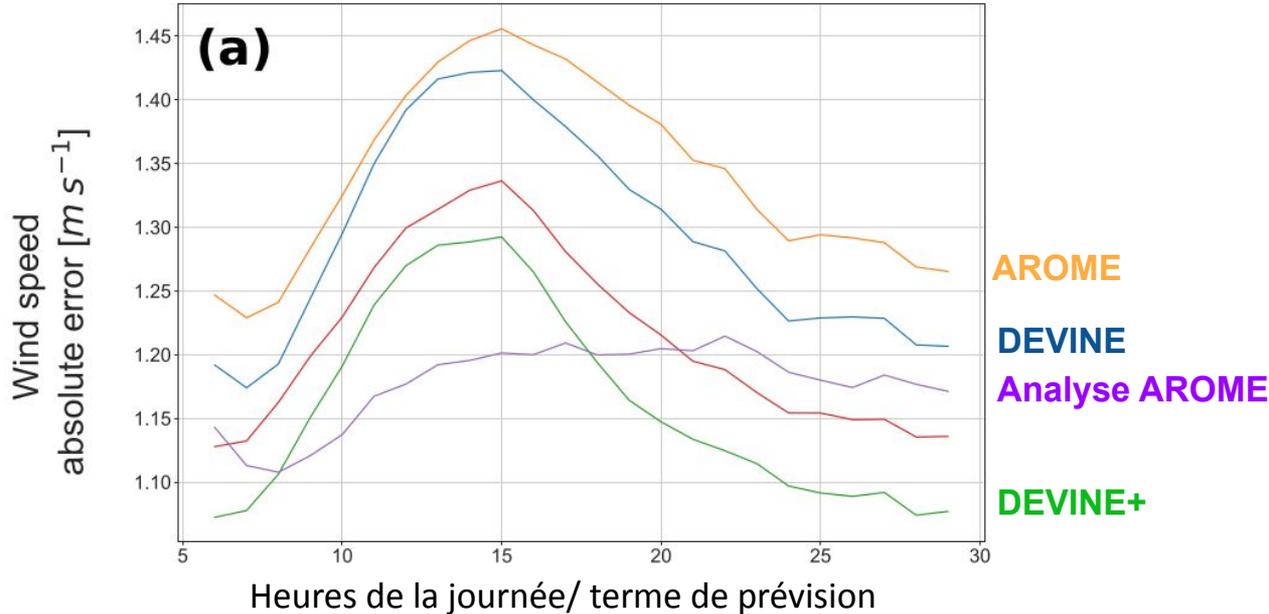


3D 10-m wind field maps

Le Toumelin et al., 2023a, b

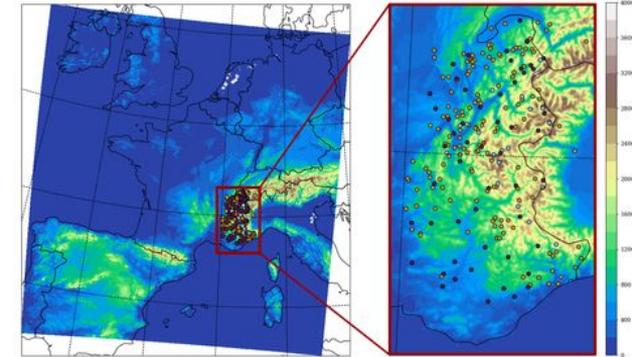
Descente d'échelle du vent en montagne

Cycle diurne de l'erreur absolue en vent



Perspectives :

- Application à d'autres variables (ex : température)
 - réseaux participatifs d'observations



- Travailler en **multi-varié** pour préserver la cohérence inter-variables

Merci !



Why do we care about ARCTIC SNOW?

SHELTER
 "Snow conditions impact ecosystems and humans far away: permafrost and soils, lake and sea ice, glaciers and climate."
 "Survival."

HUNTING
 "Snow melts too quickly now."
 "More unusual weather events."
 "Albedo and insulating properties."
 "Complex resource."
 "Joy, play, from darkness to light."

CLIMATE
 "Snow cover is a book where animals are writing stories."

CULTURE
 "The musicality of snow."
 "Snow is part of our memory and culture. What will remain for our children?"

TRAVELING
 "Snow allows life."

WATER SOURCE
 "Brings people together."
 "Rebirth of the land with first snow."
 "Harder to access water"
 "More snow"
 "Thin ice dangerous for travel"

HAPPINESS, LIFE
 "Snow shapes our lives."
 "More snow impacts the opening of ice roads."

PUKIAQ

"A tool to pass down knowledge Inuit Qaujimagatuqangit (Traditional Inuit Knowledge)."

Références (I)

- Barnett, T. P., Adam, J. C., & Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066), 303–309
- Barrere, M., Domine, F., Decharme, B., Morin, S., Vionnet, V., & Lafaysse, M. (2017). Evaluating the performance of coupled snow–soil models in surfexv8 to simulate the permafrost thermal regime at a high arctic site. *Geoscientific Model Development*, 10(9), 3461–3479.
- Bartelt, P. & Lehning, M. (2002). A physical snowpack model for the swiss avalanche warning : Part i : numerical model. *Cold Regions Science and Technology*, 35(3), 123–145.
- Bolibar, J., Rabatel, A., Gouttevin, I., & Galiez, C. (2020a). A deep learning reconstruction of mass balance series for all glaciers in the french alps : 1967–2015. *Earth System Science Data*, 12(3), 1973–1983.
- Bolibar, J., Rabatel, A., Gouttevin, I., Galiez, C., Condom, T., & Sauquet, E. (2020b). Deep learning applied to glacier evolution modelling. *The Cryosphere*, 14(2), 565–584.
- Bolibar, J., Rabatel, A., Gouttevin, I., Zekollari, H., & Galiez, C. (2022). Nonlinear sensitivity of glacier mass balance to future climate change unveiled by deep learning. *Nature communications*, 13(1), 409.
- Brun, E., David, P., Sudul, M., & Brunot, G. (1992a). A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. *Journal of Glaciology*, 38(128), 13–22
- Domine, F., Barrere, M., & Morin, S. (2016a). The growth of shrubs on high arctic tundra at bylot island : impact on snow physical properties and permafrost thermal regime. *Biogeosciences*, 13(23), 6471–6486.
- Domine, F., Barrere, M., & Sarrazin, D. (2016b). Seasonal evolution of the effective thermal conductivity of the snow and the soil in high arctic herb tundra at bylot island, canada. *The Cryosphere*, 10(6), 2573–2588.
- Domine, F., Fourteau, K., Picard, G., Lackner, G., Sarrazin, D., & Poirier, M. (2022). Permafrost cooled in winter by thermal bridging through snow-covered shrub branches. *Nature Geoscience*, 15(7), 554–560.
- Domine, F., Picard, G., Morin, S., Barrere, M., Madore, J.-B., & Langlois, A. (2019). Major issues in simulating some arctic snowpack properties using current detailed snow physics models : Consequences for the thermal regime and water budget of permafrost. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(1), 34–44.
- Essery, R., Rutter, N., Pomeroy, J., Baxter, R., Stähli, M., Gustafsson, D., Barr, A., Bartlett, P., & Elder, K. (2009). Snowmip2 : An evaluation of forest snow process simulations. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(8), 1120–1136.
- Flanner, M. G., Shell, K. M., Barlage, M., Perovich, D. K., & Tschudi, M. (2011). Radiative forcing and albedo feedback from the northern hemisphere cryosphere between 1979 and 2008. *Nature Geoscience*, 4(3), 151–155.
- Girau, A. (2018). Observation et modélisation des flux d'énergie en surface sous canopée. Master's thesis, Université de Genève ; stage de fin d'études réalisé au Centre d'Etudes de la Neige, Grenoble, France.

Références (II)

- Gouttevin, I., Langer, M., Löwe, H., Boike, J., Proksch, M., & Schneebeli, M. (2018). Observation and modelling of snow at a polygonal tundra permafrost site : spatial variability and thermal implications. *The Cryosphere*, 12(11), 3693–3717.
- Gouttevin, I., Lehning, M., Jonas, T., Gustafsson, D., & Mölder, M. (2015). A two-layer canopy model with thermal inertia for an improved snowpack energy balance below needleleaf forest (model snowpack, version 3.2. 1, revision 741). *Geoscientific Model Development*, 8(8), 2379–2398.
- Gouttevin, I., Menegoz, M., Dominé, F., Krinner, G., Koven, C., Ciais, P., Tarnocai, C., & Boike, J. (2012). How the insulating properties of snow affect soil carbon distribution in the continental pan-arctic area. *Journal of Geophysical Research : Biogeosciences*, 117(G2)
- Gouttevin, I., Vionnet, V., Seity, Y., Boone, A., Lafaysse, M., Deliot, Y., & Merzisen, H. (2023). To the origin of a wintertime screen-level temperature bias at high altitude in a kilometric nwp model. *Journal of Hydrometeorology*, 24(1), 53–71.
- Helbig, N., Mott, R., Van Herwijnen, A., Winstral, A., & Jonas, T. (2017). Parameterizing surface wind speed over complex topography. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 122(2), 651–667.
- Hock, R. (2003). Temperature index melt modelling in mountain areas. *Journal of hydrology*, 282(1-4), 104–115.
- Huss, M. (2011). Present and future contribution of glacier storage change to runoff from macroscale drainage basins in europe. *Water Resources Research*, 47(7).
- Immerzeel, W. W., Lutz, A. F., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T., Hyde, S., Brumby, S., Davies, B., Elmore, A., et al. (2020). Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature*, 577(7790), 364–369.
- Immerzeel, W. W., Van Beek, L. P., & Bierkens, M. F. (2010). Climate change will affect the asian water towers. *science*, 328(5984), 1382–1385.
- Ismail, M. F., Bogacki, W., Disse, M., Schäfer, M., & Kirschbauer, L. (2023). Estimating degree-day factors of snow based on energy flux components. *The Cryosphere*, 17(1), 211–231.
- Krause, P. (2002). Quantifying the impact of land use changes on the water balance of large catchments using the j2000 model. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 27(9-10), 663–673.
- Lafaysse, M. (2023). Modélisation du Manteau Neigeux : la fin du déterminisme. PhD thesis, Université Toulouse 3 Paul Sabatier.
- Lawrence, D. M. & Slater, A. G. (2010). The contribution of snow condition trends to future ground climate. *Climate dynamics*, 34, 969–981.
- Le Toumelin, L., Gouttevin, I., Galiez, C., & Helbig, N. (2023a). A two-folds deep learning strategy to correct and downscale winds over mountains. *Nonlinear Processes in Geophysics Discussions*, 2023, 1–32.
- Le Toumelin, L., Gouttevin, I., Helbig, N., Galiez, C., Roux, M., & Karbou, F. (2023b). Emulating the adaptation of wind fields to complex terrain with deep learning. *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, 2(1), e220034.
- Lejeune, Y., Dumont, M., Panel, J.-M., Lafaysse, M., Lapalus, P., Le Gac, E., Lesaffre, B., & Morin, S. (2019). 57 years (1960–2017) of snow and meteorological observations from a mid-altitude mountain site (col de porte, france, 1325 m of altitude). *Earth System Science Data*, 11(1), 71–88.
- Mott, R., Vionnet, V., & Grünwald, T. (2018). The seasonal snow cover dynamics : review on wind-driven coupling processes. *Frontiers in Earth Science*, (pp. 197).

Références (III)

- Rabatel, A., Dedieu, J. P., & Vincent, C. (2016). Spatio-temporal changes in glacier-wide mass balance quantified by optical remote sensing on 30 glaciers in the french alps for the period 1983–2014. *Journal of Glaciology*, 62(236), 1153–1166.
- Rutter, N., Essery, R., Pomeroy, J., Altimir, N., Andreadis, K., Baker, I., Barr, A., Bartlett, P., Boone, A., Deng, H., et al. (2009). Evaluation of forest snow processes models (snowmip2). *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 114(D6).
- Sicart, J. E., Ramseyer, V., Picard, G., Arnaud, L., Coulaud, C., Freche, G., Soubeyrand, D., Lejeune, Y., Dumont, M., Gouttevin, I., et al. (2023). Snow accumulation and ablation measurements in a mid-latitude mountain coniferous forest (col de porte, france, 1325 m alt.) : The snow under forest field campaigns dataset. *Earth System Science Data Discussions*, 2023, 1–22.
- SROCC (2019). IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.).
- Sturm, M., Douglas, T., Racine, C., & Liston, G. E. (2005). Changing snow and shrub conditions affect albedo with global implications. *Journal of Geophysical Research : Biogeosciences*, 110(G1).
- Todt, M., Rutter, N., Fletcher, C. G., & Wake, L. M. (2019). Simulated single-layer forest canopies delay northern hemisphere snowmelt. *The Cryosphere*, 13(11), 3077–3091
- Vernay, M., Lafaysse, M., Monteiro, D., Hagenmuller, P., Nheili, R., Samacoïts, R., ... & Morin, S. (2022). The S2M meteorological and snow cover reanalysis over the French mountainous areas: description and evaluation (1958–2021). *Earth System Science Data*, 14(4), 1707-1733.
- Vionnet, V., Brun, E., Morin, S., Boone, A., Faroux, S., Le Moigne, P., Martin, E., & Willemet, J.-M. (2012). The detailed snowpack scheme crocus and its implementation in surfex v7. 2. Geoscientific model development, 5(3), 773–791
- Vionnet, V., Dombrowski-Etchevers, I., Lafaysse, M., Quéno, L., Seity, Y., & Bazile, E. (2016). Numerical weather forecasts at kilometer scale in the french alps : Evaluation and application for snowpack modeling. *Journal of Hydrometeorology*, 17(10), 2591–2614.
- Viviroli, D., Dürr, H. H., Messerli, B., Meybeck, M., & Weingartner, R. (2007). Mountains of the world, water towers for humanity : Typology, mapping, and global significance. *Water resources research*, 43(7).
- Whiteman, C. D. (2000). *Mountain meteorology : fundamentals and applications*. Oxford University Press.
- Zhang, T. (2005). Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime : An overview. *Reviews of Geophysics*, 43(4).