

# Apport de la photogrammétrie satellite pour la modélisation du manteau neigeux

**César Deschamps-Berger**

Colloque SHF 28 novembre 2023 – Prix Henry Milon



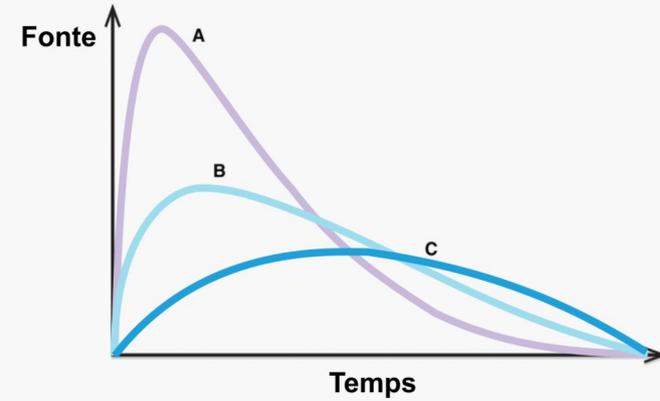
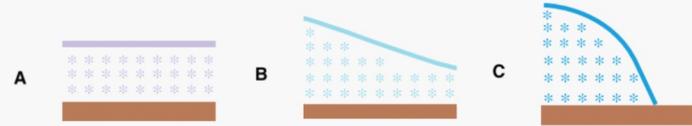
**Marie DUMONT**, CNRM, Centre d'Grenoble (encadrant)

**Simon GASCOIN**, CESBIO, Toulouse (encadrant)

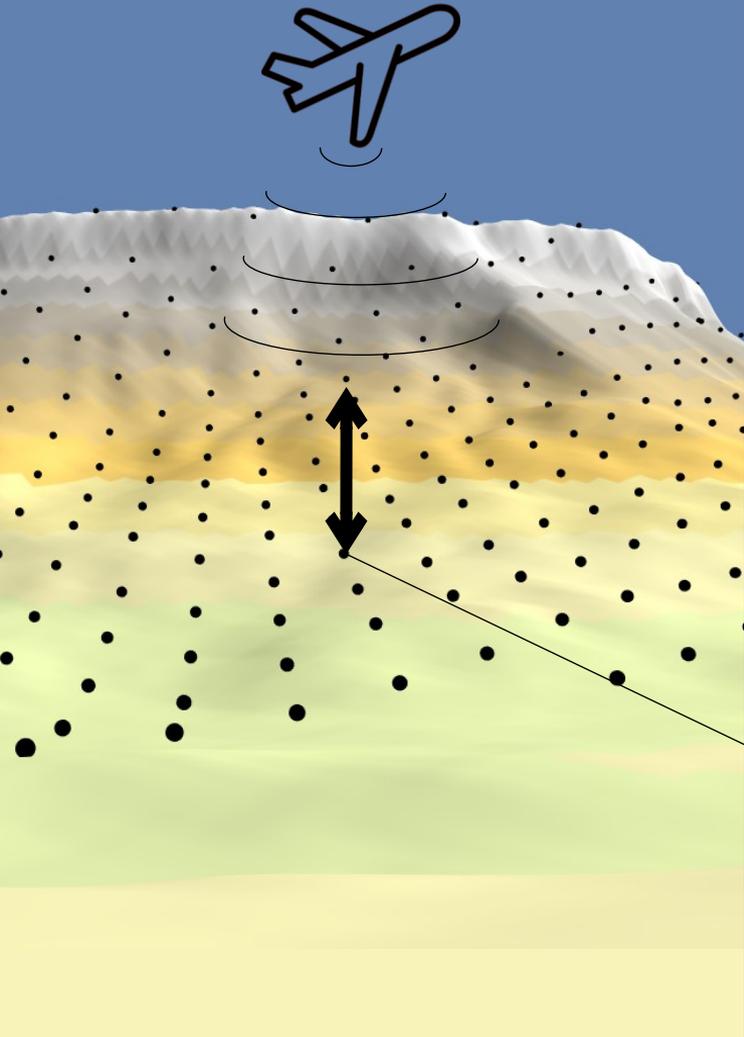


# La forte variabilité spatiale du manteau neigeux

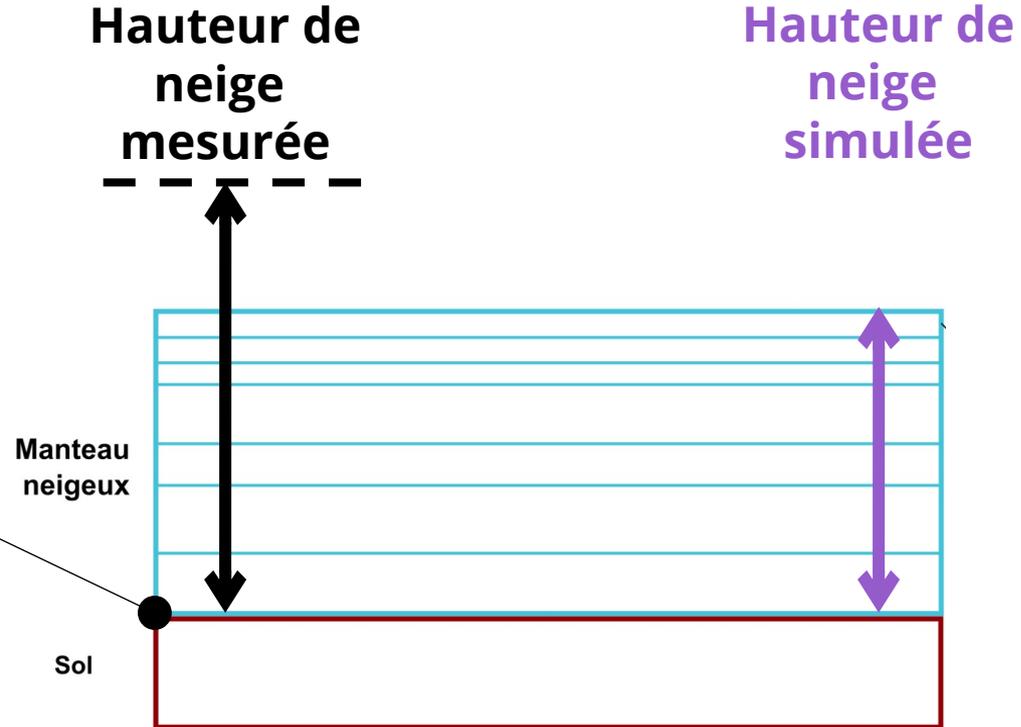
Faible variabilité spatiale → Forte variabilité spatiale



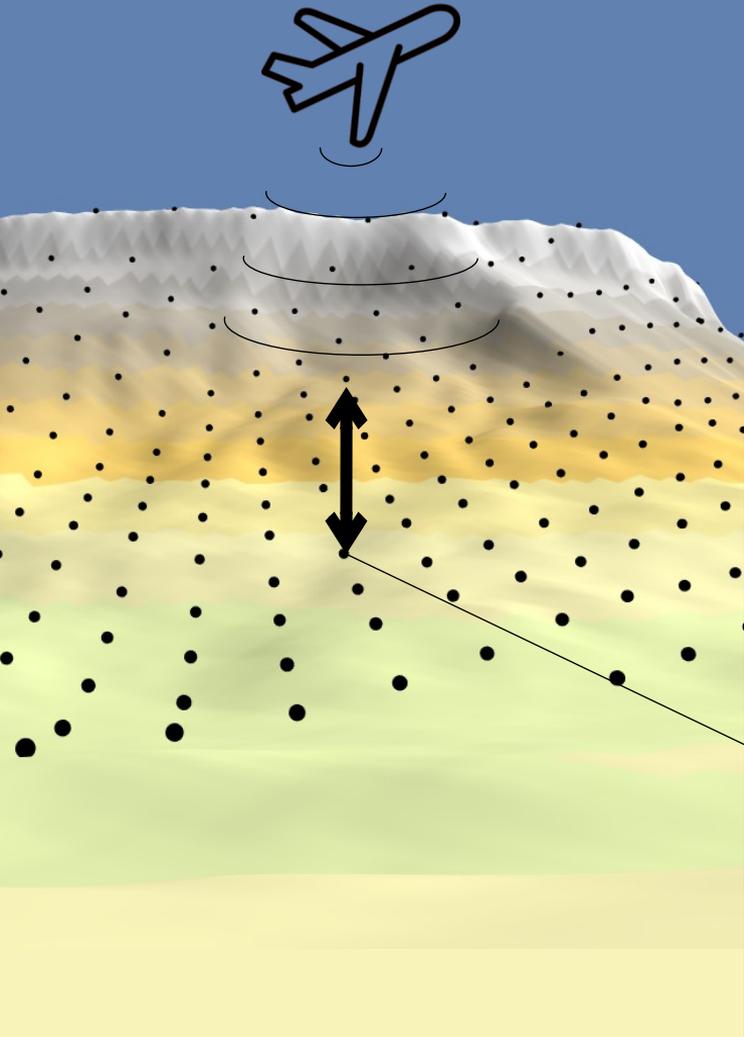
# Modélisation du manteau neigeux



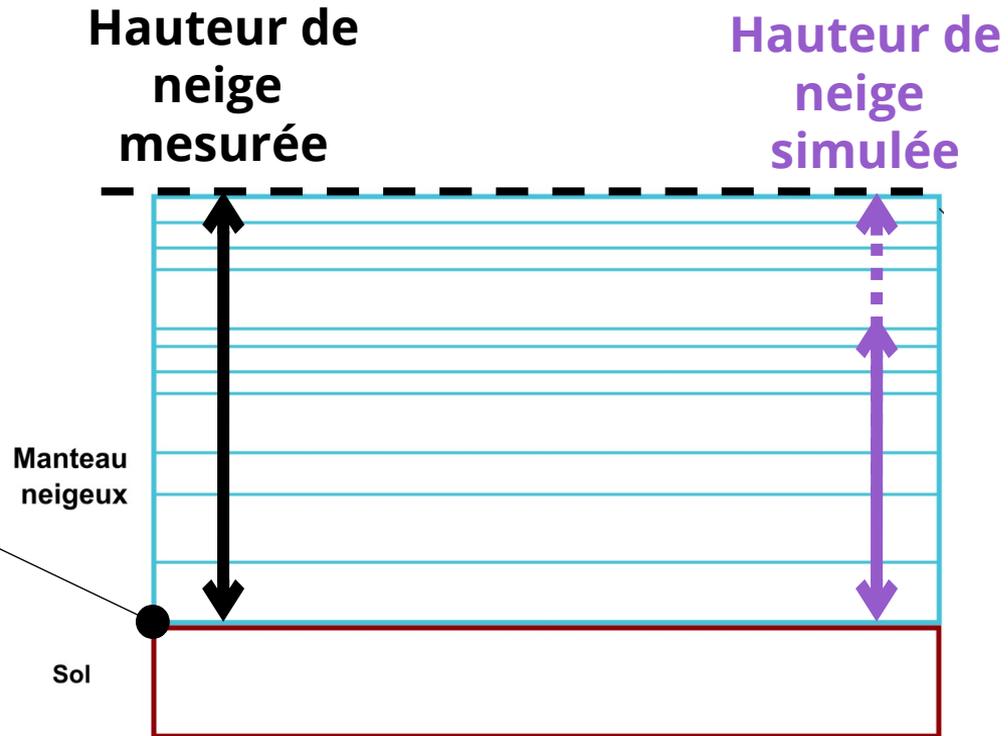
**Masse de neige = Hauteur de neige x Densité**



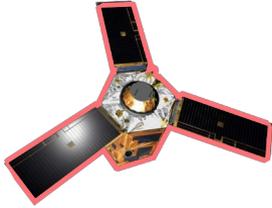
# Modélisation du manteau neigeux



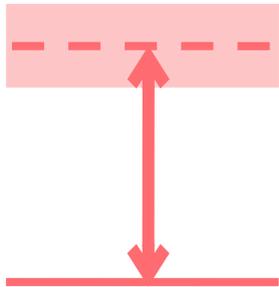
**Masse de neige = Hauteur de neige x Densité**



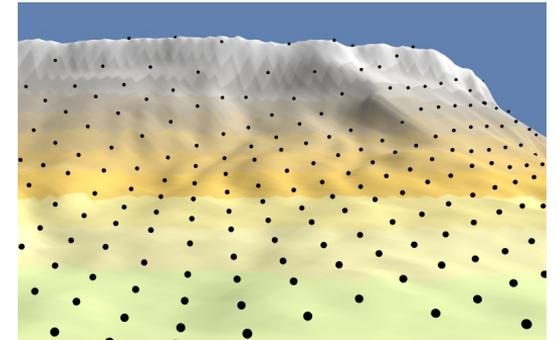
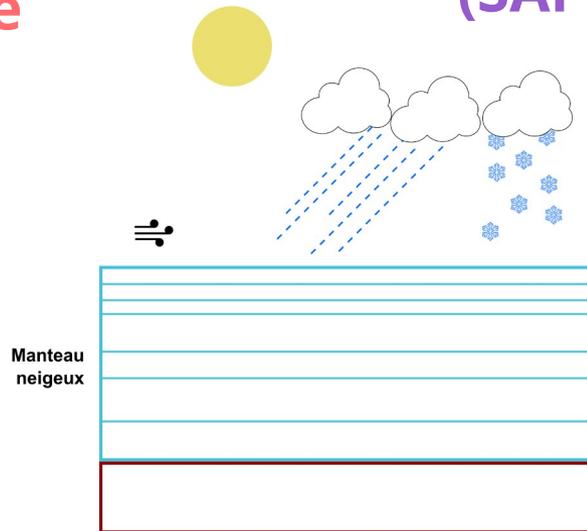
# Assimilation de cartes de hauteur de neige dans un modèle de manteau neigeux



Mesure de la hauteur de neige (Pléiades)

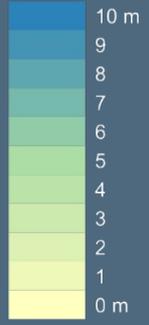


Modélisation de la hauteur de neige (SAFRAN - Crocus)

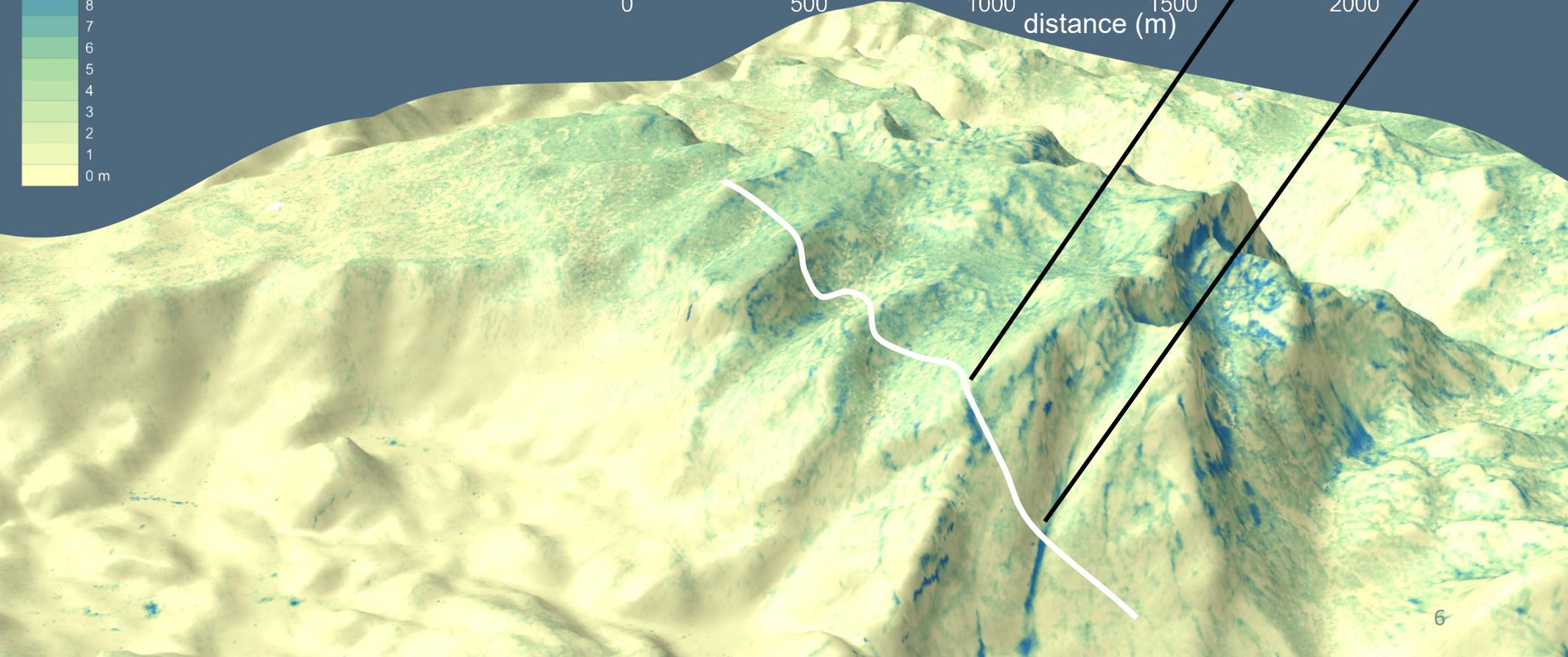
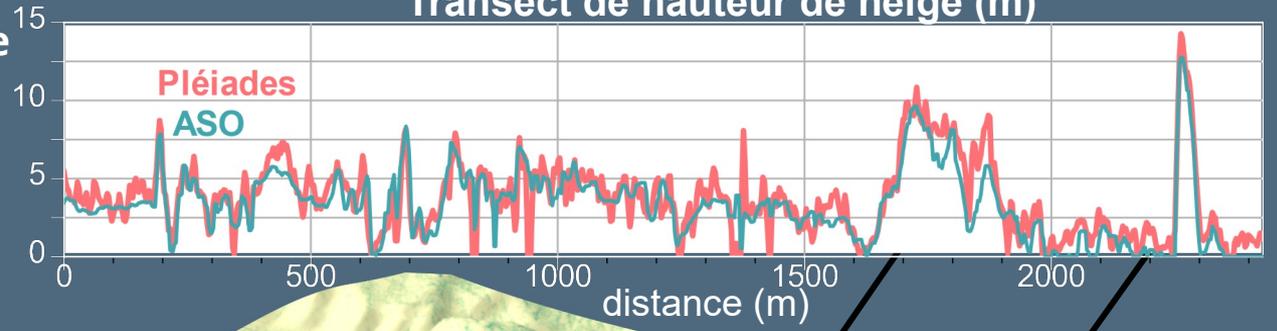


# Evaluation d'une carte de hauteur de neige par photogrammétrie satellite

Hauteur de neige (m)



## Transect de hauteur de neige (m)

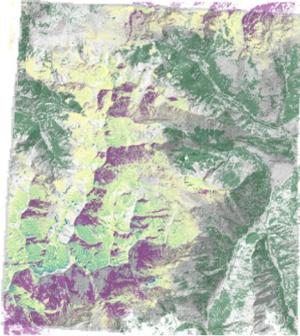


# Série pluriannuelle de cartes de hauteur de neige sur un bassin de montagne Haut-Vicdessos, Ariège

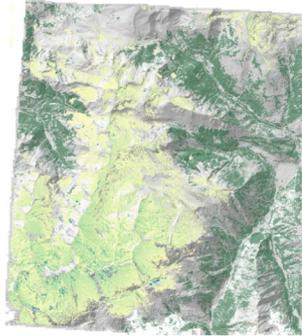
2015-03-11



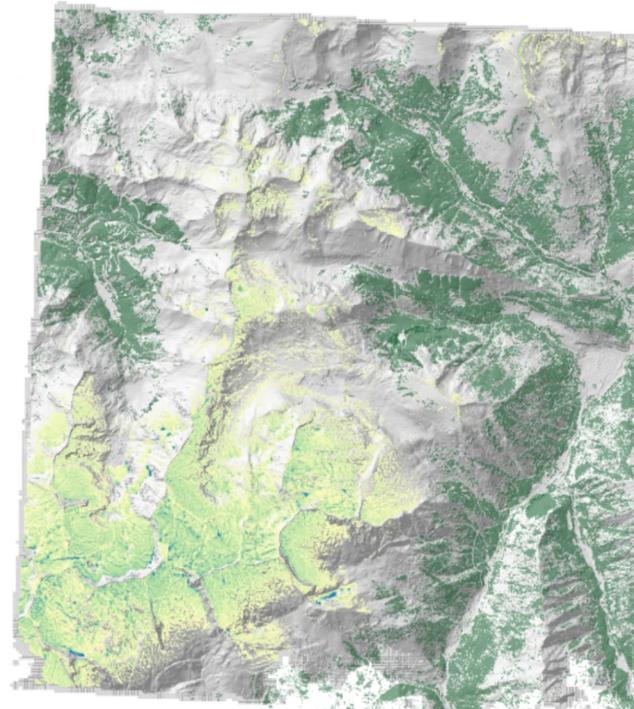
2016-04-11



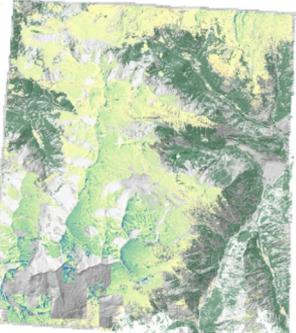
2017-03-15



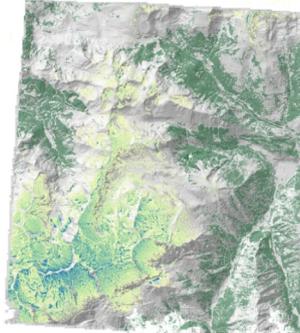
2020-04-05



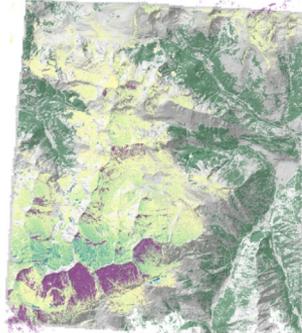
2018-02-15



2018-05-11



2019-03-26



Hauteur de neige

8 m

0 m

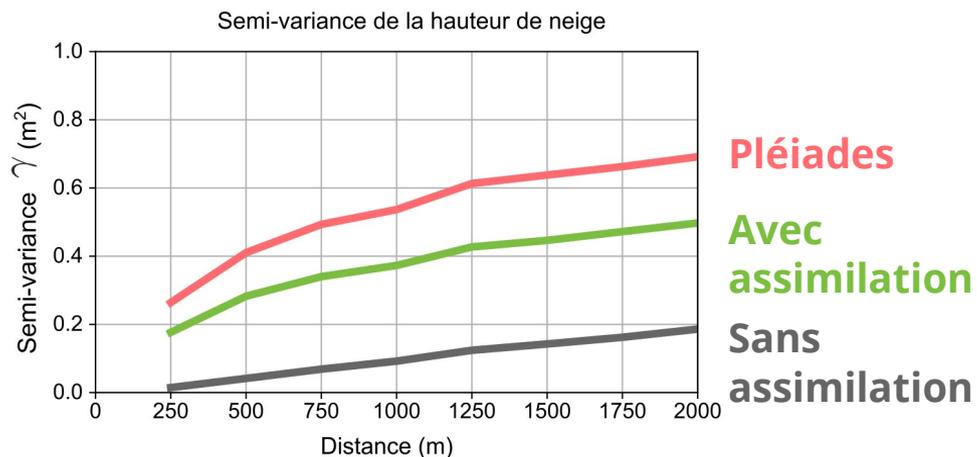
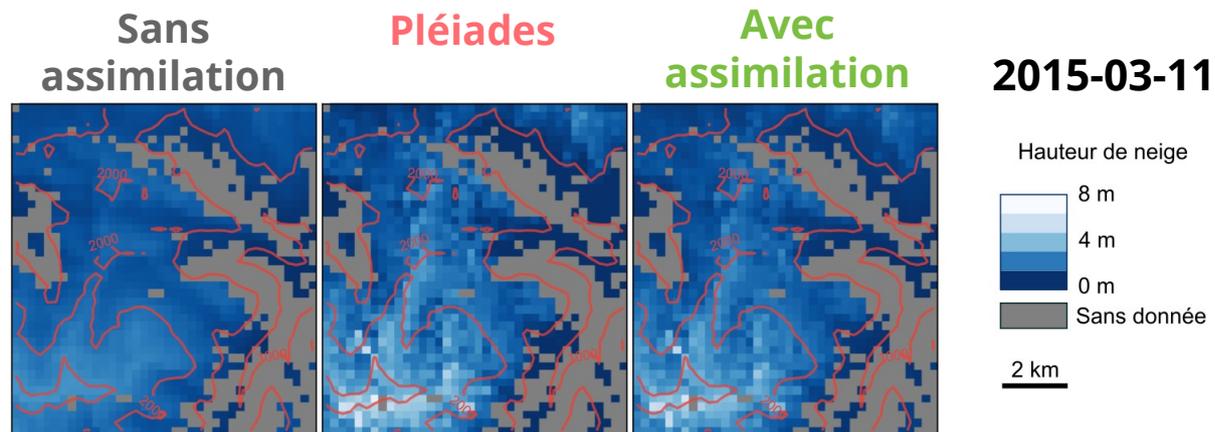
Image saturée

Forêt

2 km

# Assimilation de cartes de hauteur de neige dans un modèle de manteau neigeux

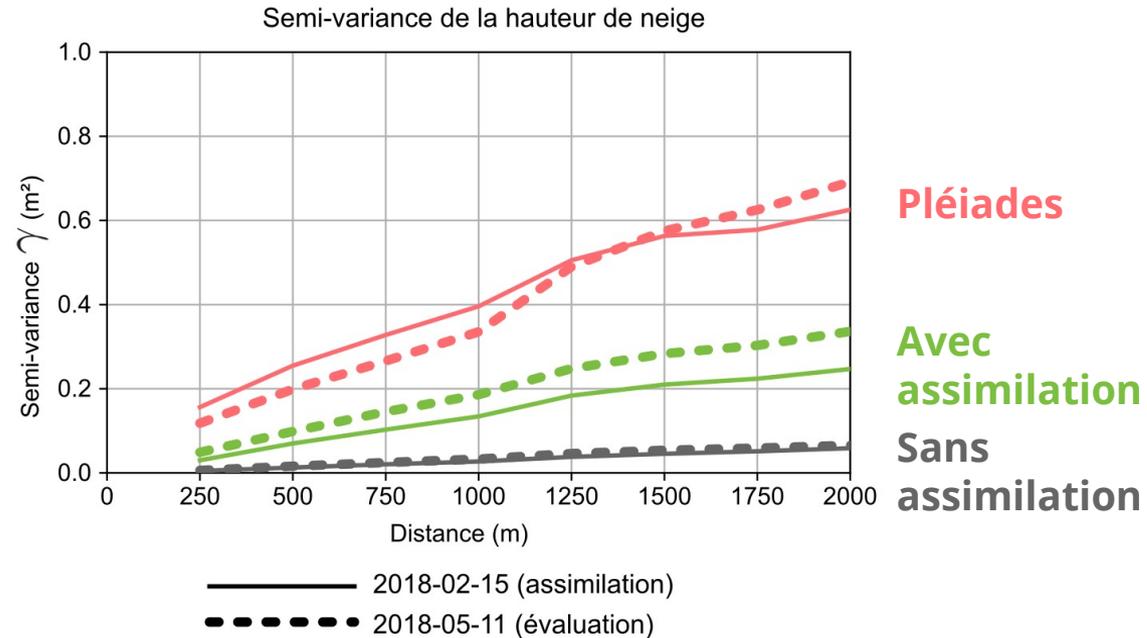
## Impact sur la modélisation de la hauteur de neige



# Assimilation de cartes de hauteur de neige dans un modèle de manteau neigeux

## Évaluation indépendante

### Impact sur la variabilité spatiale de la hauteur de neige

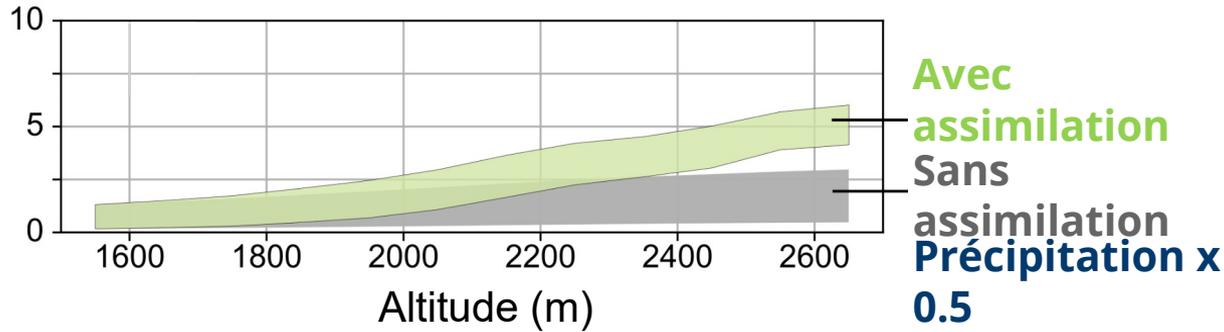


# Impact sur la modélisation de la masse et de la densité du manteau

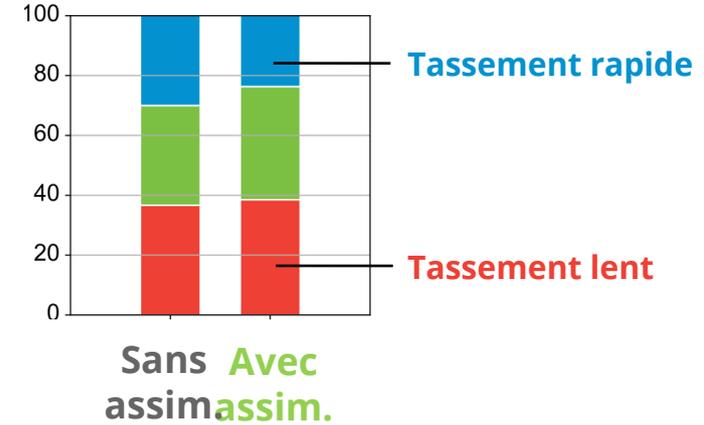
$$\text{Masse} = \text{Densité} \times \text{Hauteur de neige}$$

## Précipitations neigeuses ( $10^{-5} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )

01-09-2018 au 26-03-2019



2019-03-26



- Teufelsbauer (2011)
- Schleef et al. (2014)
- Anderson (1976)

# Conclusions

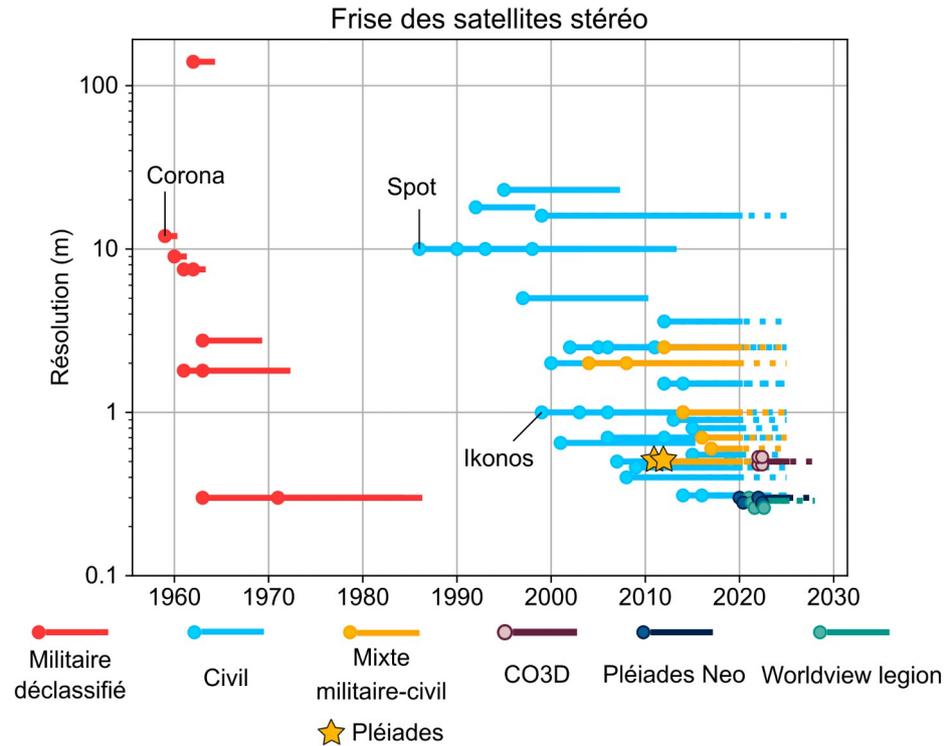
## Carte de hauteur de neige par photogrammétrie satellite

- + La précision de la mesure est de **~0,70 m à 3 m de résolution**, moins bonne que par drone ou avion (~0,10 m) mais sur des aires assez larges (**~400 km<sup>2</sup>**) **n'importe où sur Terre**.
  - La méthode ne fonctionne pas ou mal dans les zones d'ombres, en cas d'image saturée.
  - Les données sont difficiles d'accès.
- => Deschamps-Berger et al. (2020), Helbig et al. (2020), Shaw, Deschamps-Berger et al. (2020).

## Assimilation de cartes de hauteur de neige dans un modèle détaillé avec un filtre particulière

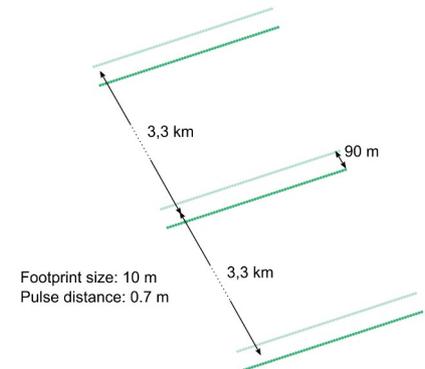
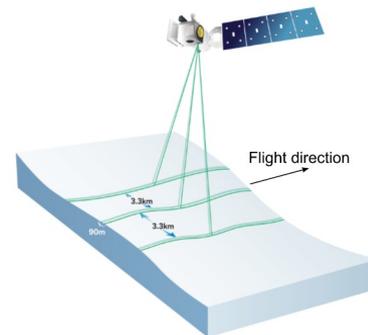
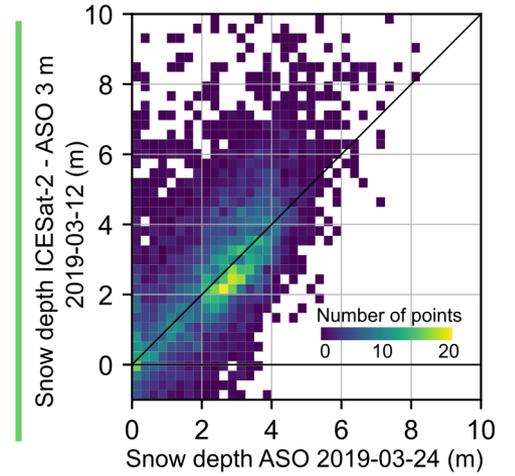
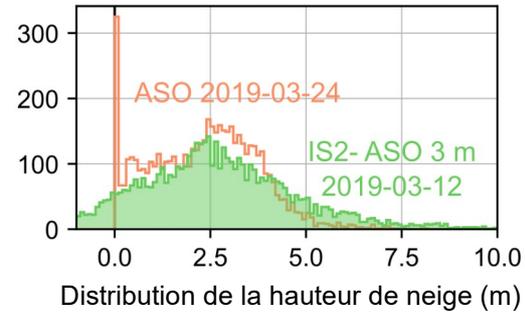
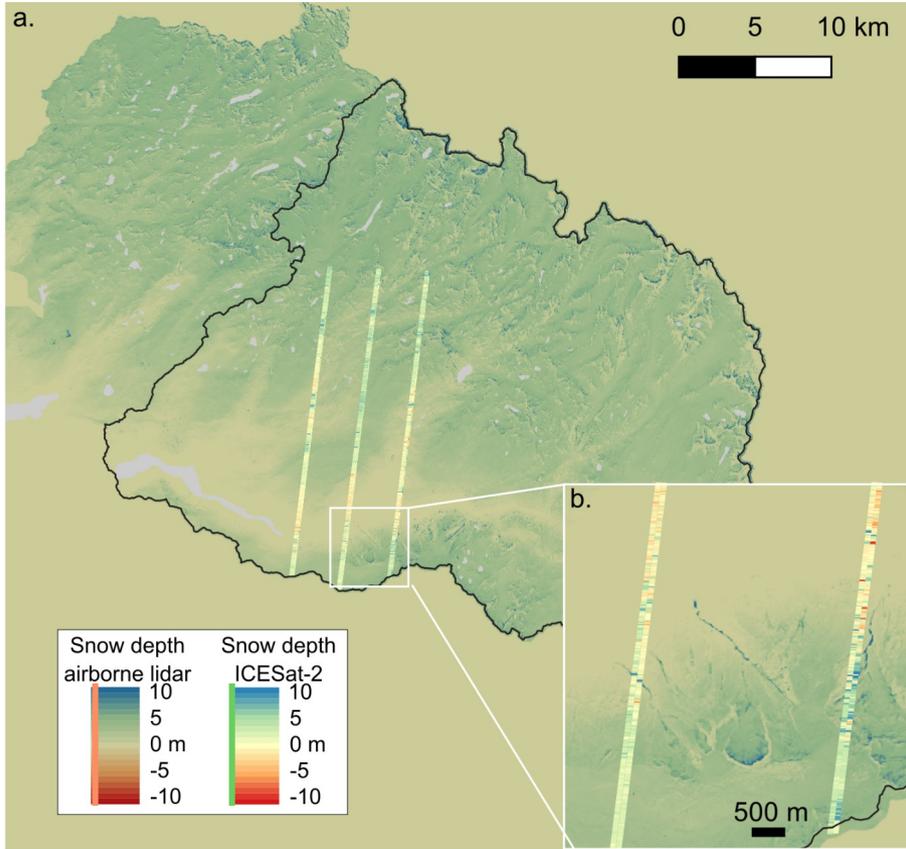
- + Cette approche améliore des modélisations du manteau neigeux en **corrigeant des biais dans les précipitations** et en **introduisant la variabilité spatiale** autrement absente.
  - L'assimilation de hauteur de neige peut **améliorer** la modélisation de **la masse de neige** et **dégrader** la modélisation de **la densité de la neige**.
- => Deschamps-Berger et al. (2022)

# Elargir la zone d'étude...



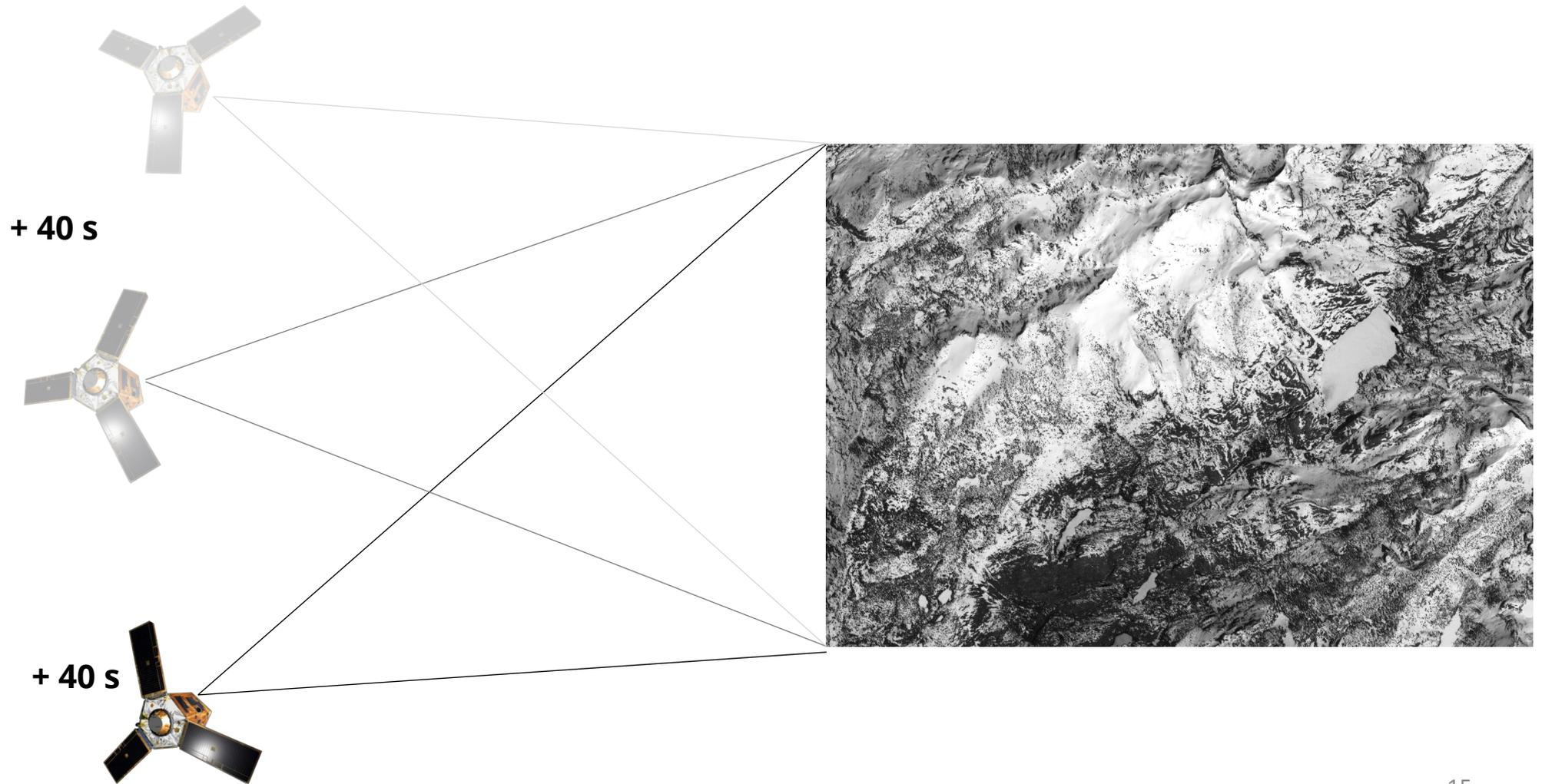
Deschamps-Berger et al.  
(2019)

# Altimétrie laser (ICESat-2 ATL06) combiné avec un MNE lidar

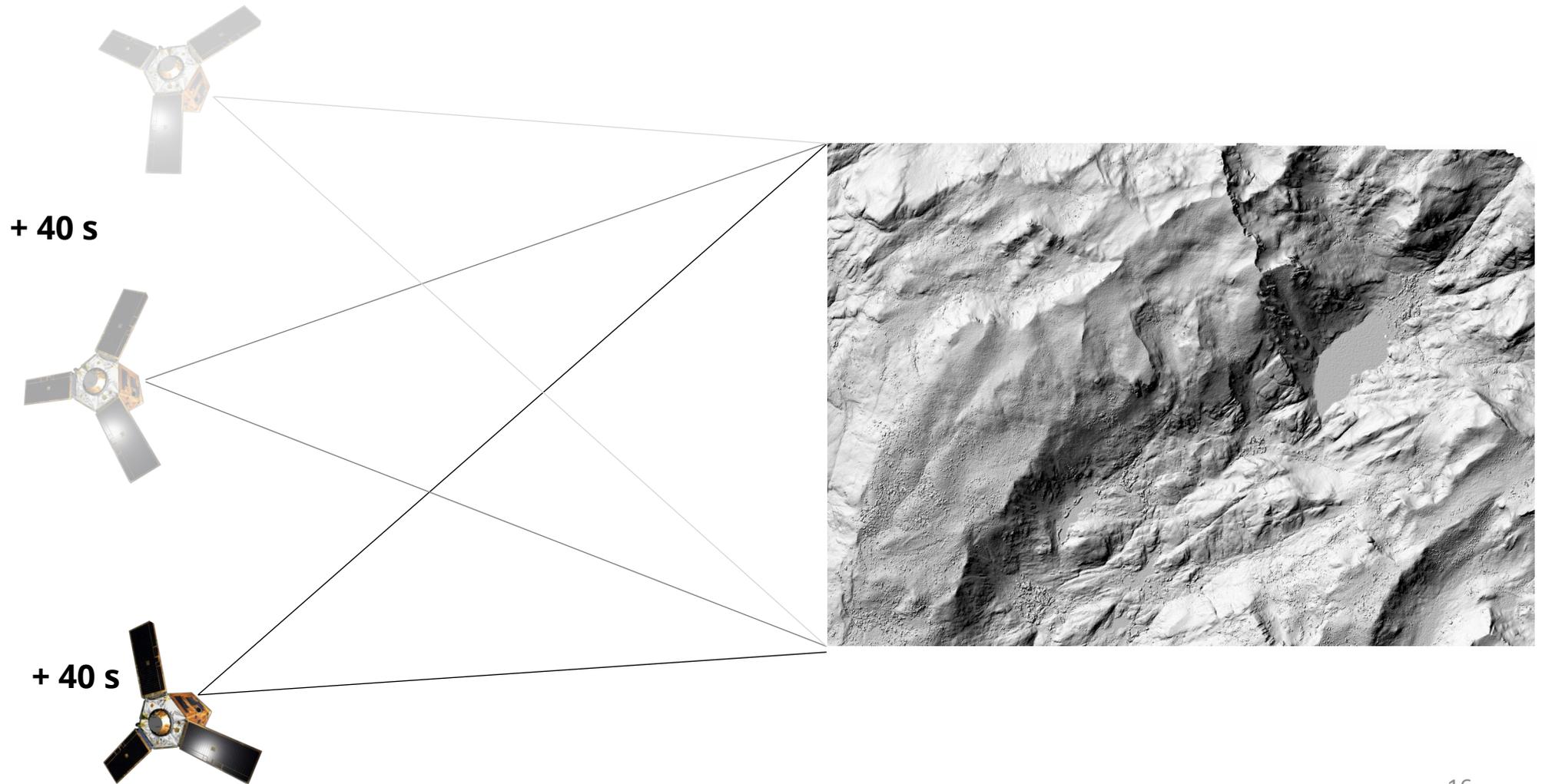




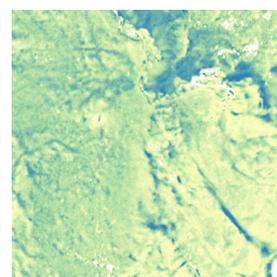
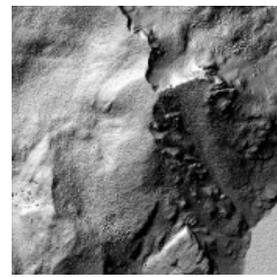
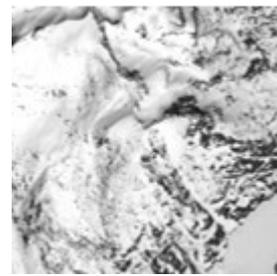
# Cartographie de la hauteur de neige par photogrammétrie satellite



# Cartographie de la hauteur de neige par photogrammétrie satellite



# Cartographie de la hauteur de neige par photogrammétrie satellite



Triplets d'images Pléiades avec neige (hiver) et sans neige (été)

**Pair/Triplet**  
Images panchromatique  
[0.5 m]

hiver  
été

Ames  
Stereo  
Pipeline

Corrélation d'image  
Triangulation  
Grillage

Modèle Numérique  
d'Élévation  
(MNE) [3 m]

hiver  
été

Co-registration  
Nuth and Kääb (2011)  
Différenciation

Différence d'élévation  
(dMNE) [3 m]

Masque

**Hauteur de neige  
(HTN) [3 m]**

Image multi-spectrale (MS)  
au nadir  
[2 m]

Ortho-rectification

MS ortho-rectifiée  
[2 m]

Classification d'image  
Random Tree Forest

Orfeo  
Toolbox

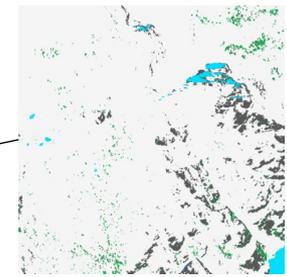
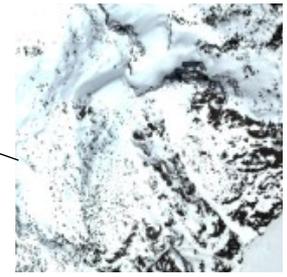
Image classifiée  
[2 m]

Erosion

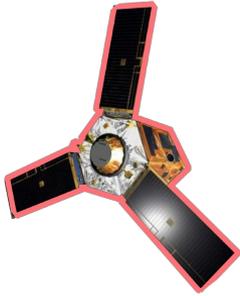
Masque terrain stable  
[3 m]

Masque neige [3 m]

Recalage  
Interpolation

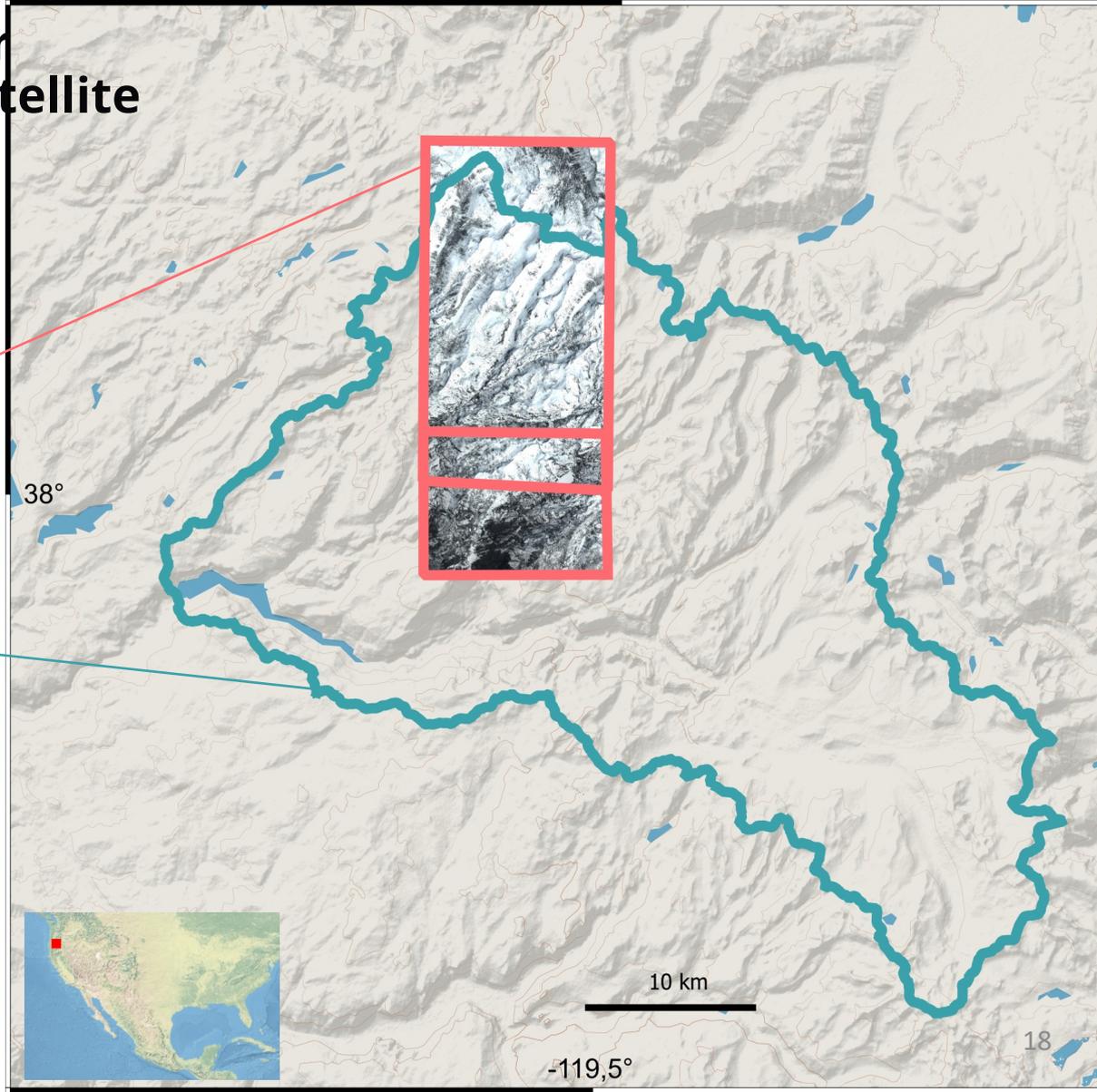


# Evaluation d'une carte de hauteur de neige par photogrammétrie satellite

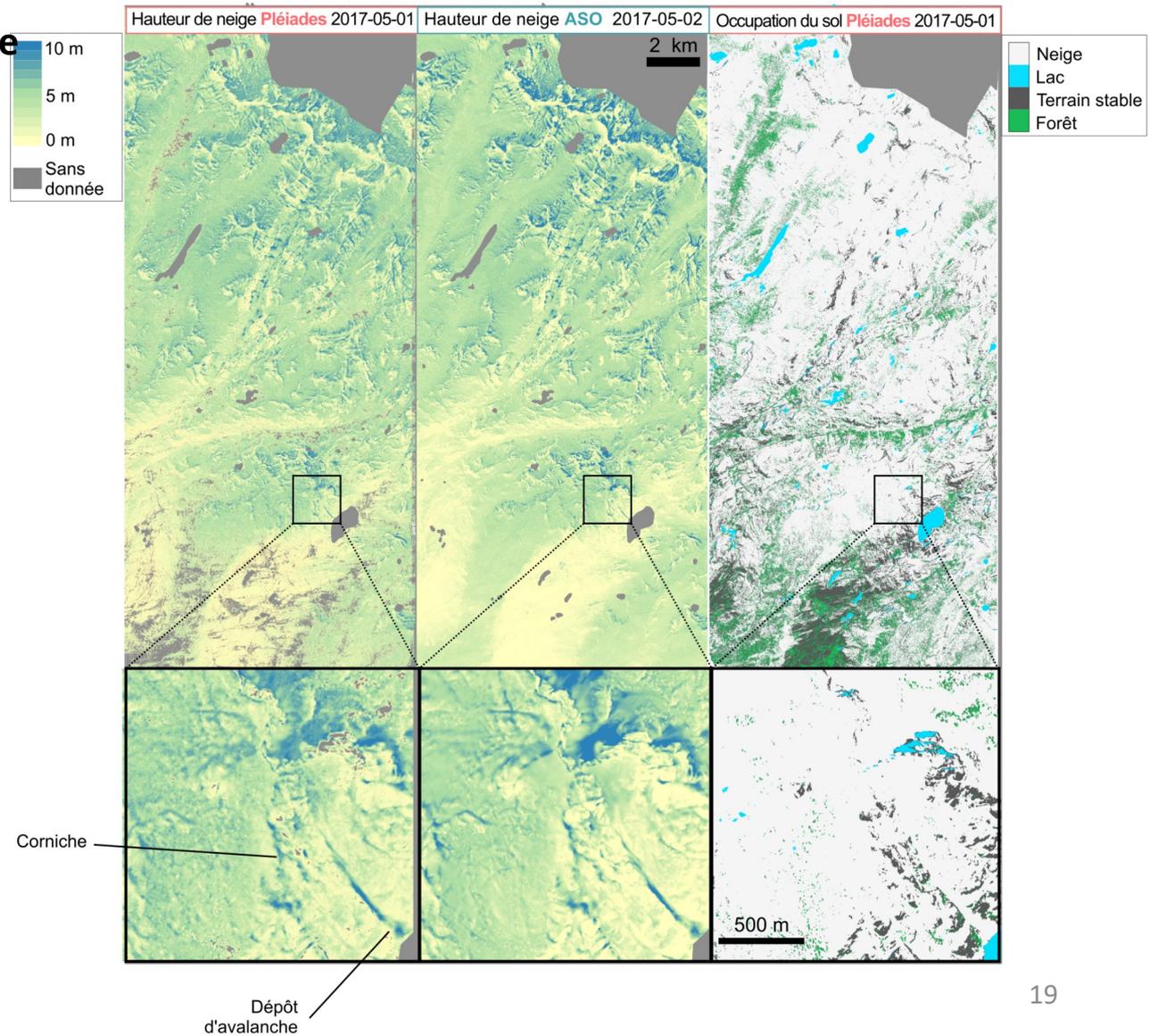


**Stéréo-images Pléiades**  
Hiver : 2017-05-01  
Eté : 2017-08-08/13

**Lidar aéroporté**  
Hiver : 2017-05-02  
Eté : 2015-10-13  
**Mesure de référence**

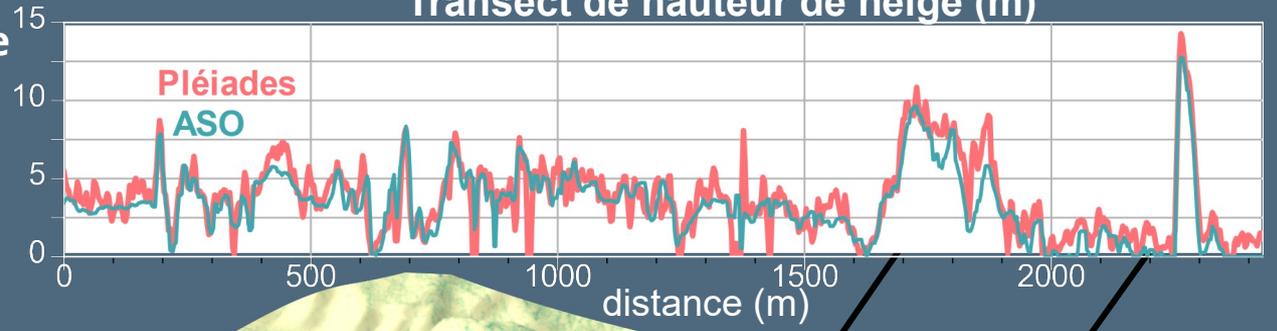


# Evaluation d'une carte de hauteur de neige par photogrammétrie satellite

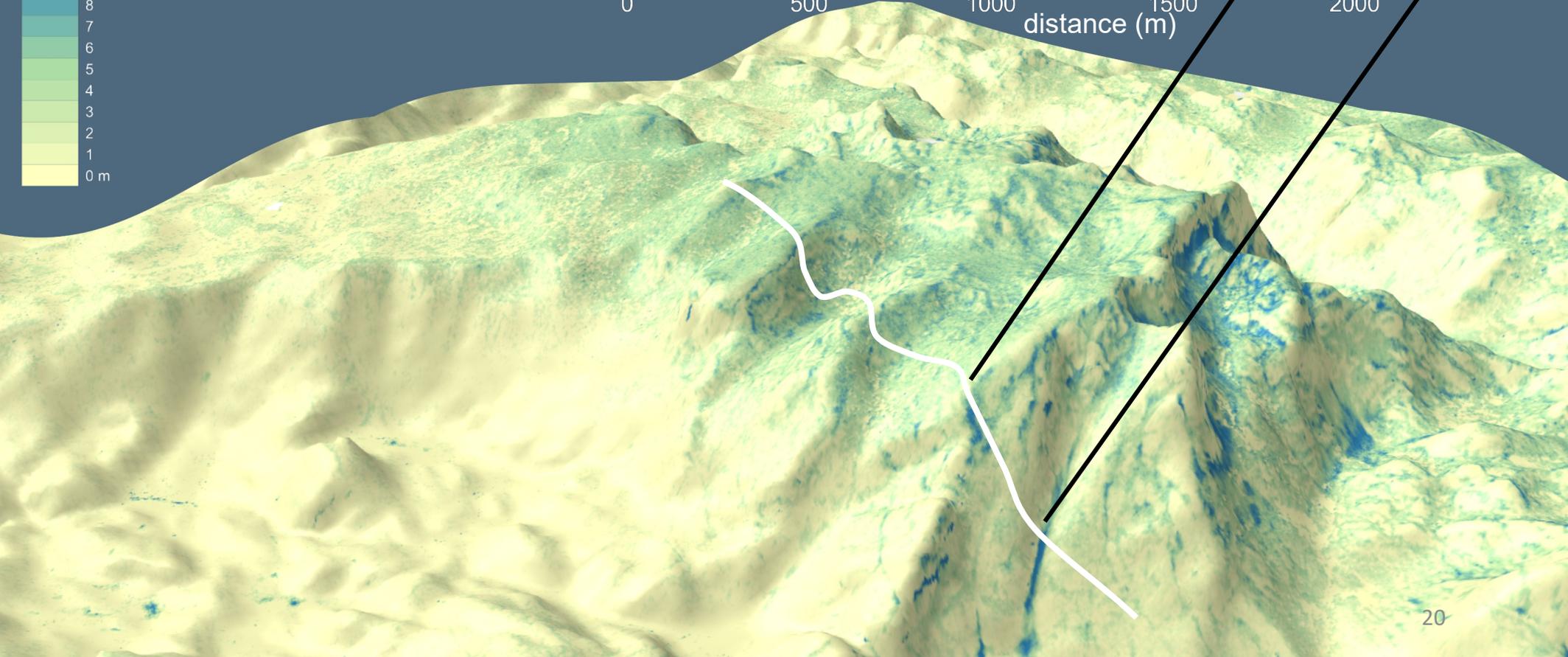
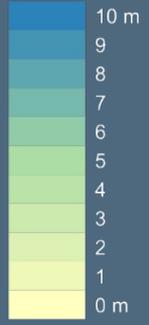


# Evaluation d'une carte de hauteur de neige par photogrammétrie satellite

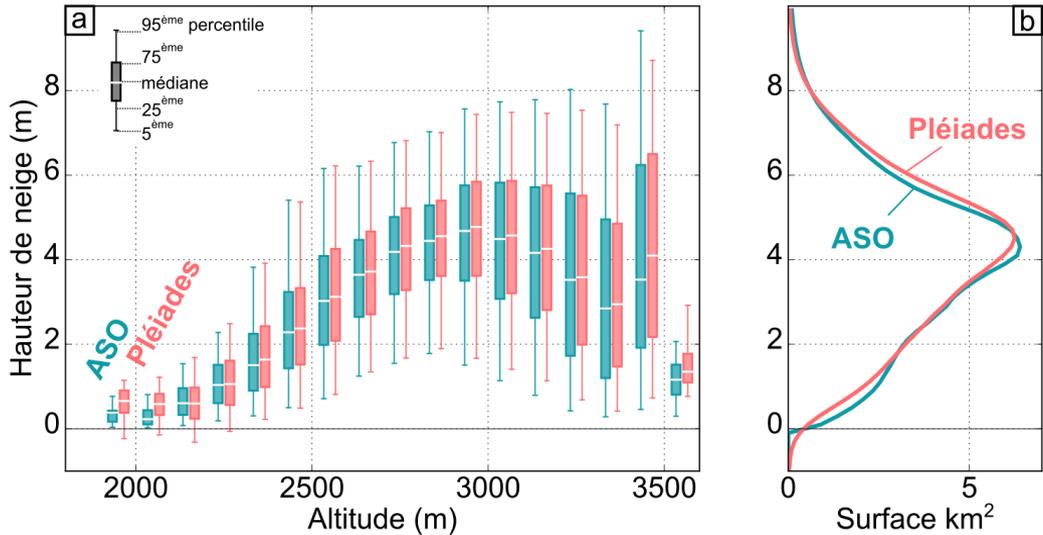
## Transect de hauteur de neige (m)



### Hauteur de neige (m)



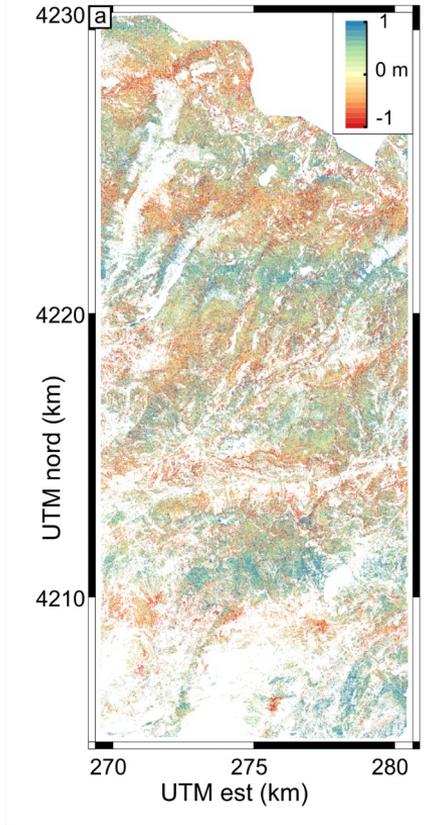
# Evaluation d'une carte de hauteur de neige par photogrammétrie satellite



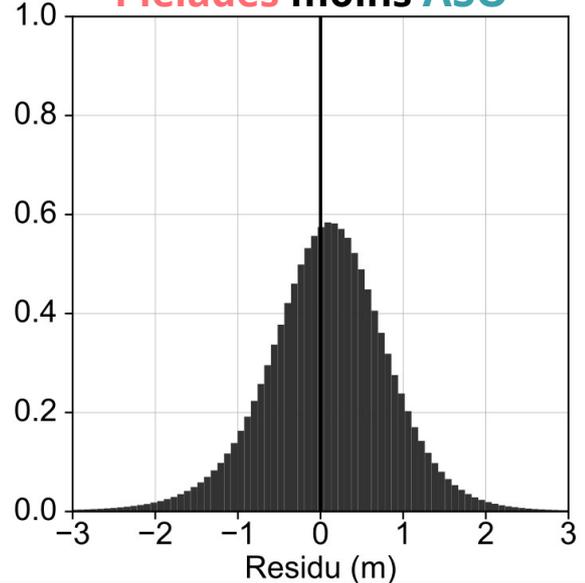
**Pléiades : 4.05 m**  
**ASO : 3.96 m**

# Evaluation d'une carte de hauteur de neige par photogrammétrie satellite

Carte du résidu de hauteur de neige  
Pléiades moins ASO



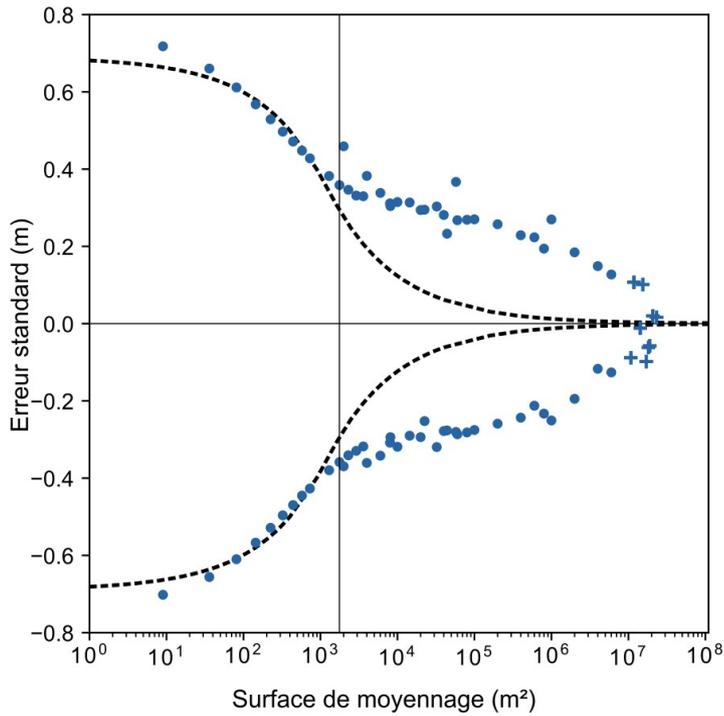
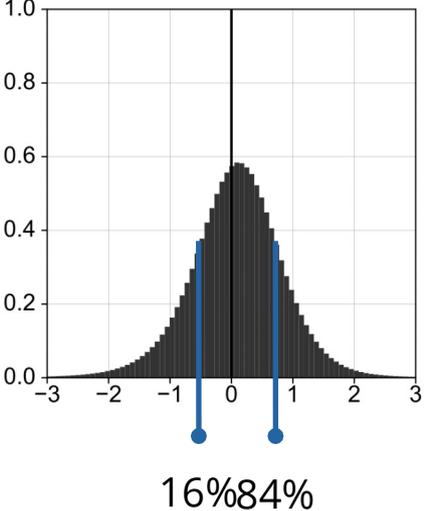
Distribution du résidu de hauteur de neige  
Pléiades moins ASO



**NMAD : 0,69 m**  
**Moyenne : 0,08 m**

# Evaluation d'une carte de hauteur de neige par photogrammétrie satellite

Distribution du résidu de hauteur de neige  
Pléiades moins ASO



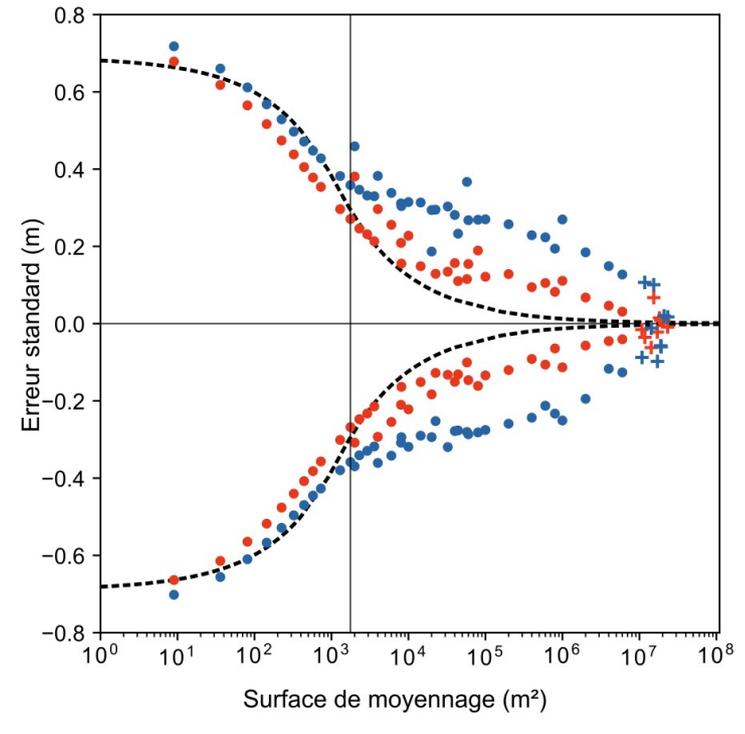
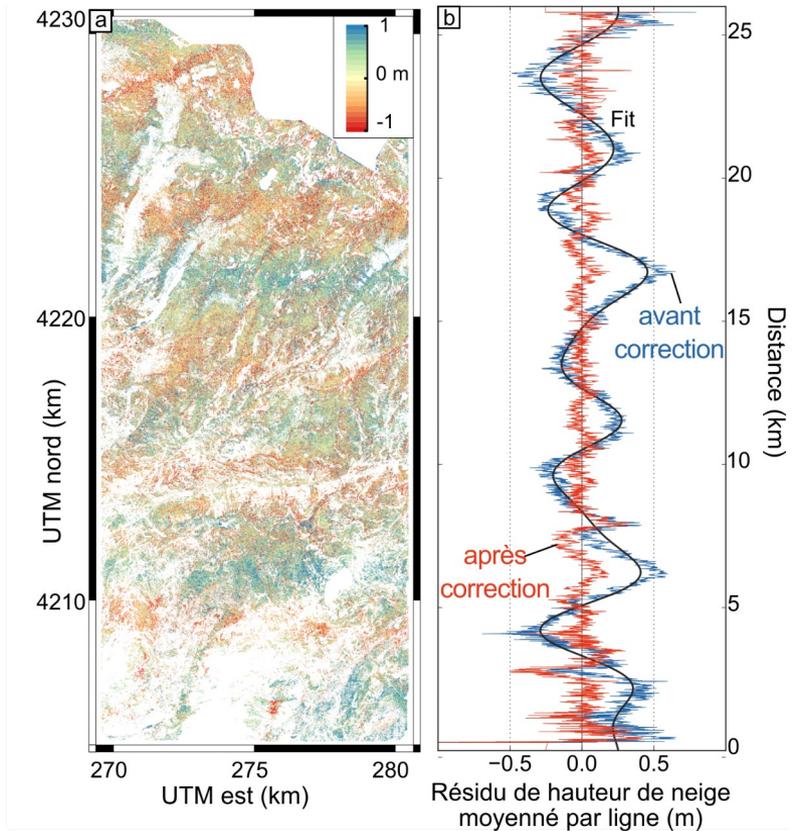
Erreur modélisée

----- Erreur Rolstad et al. (2009) Icor=20 m, sigma=0.69 m

si <

si >

# Evaluation d'une carte de hauteur de neige par photogrammétrie satellite



**Erreur modélisée**  
----- Erreur Rolstad et al. (2009)  $I_{cor}=20$  m,  $\sigma=0.69$  m

si <

si >

**Perturbation stochastique**  
+  
**Précipitation x 0.5**  
**Précipitation x 1.0**  
**Précipitation x 2.0**

120 forçages météorologiques perturbés

120 paramétrisations physiques de Crocus

**Vitesse de tassement, métamorphisme, densité de la neige**  
Lafaysse et al. (2017)

**Modélisation**  
Simulation ensembliste (n=120, résolution=250 m)

Observation  
Carte de hauteur de neige Pléiades (3 m)

Carte de hauteur de neige Pléiades (250 m)

**Assimilation**  
Filtre particulaire Cluzet et al. (2020)

Pas d'assimilation

Simulation ensembliste (n=120, résolution=250 m)

**Avec assimilation**

Simulation ensembliste (n=120, résolution=250 m)

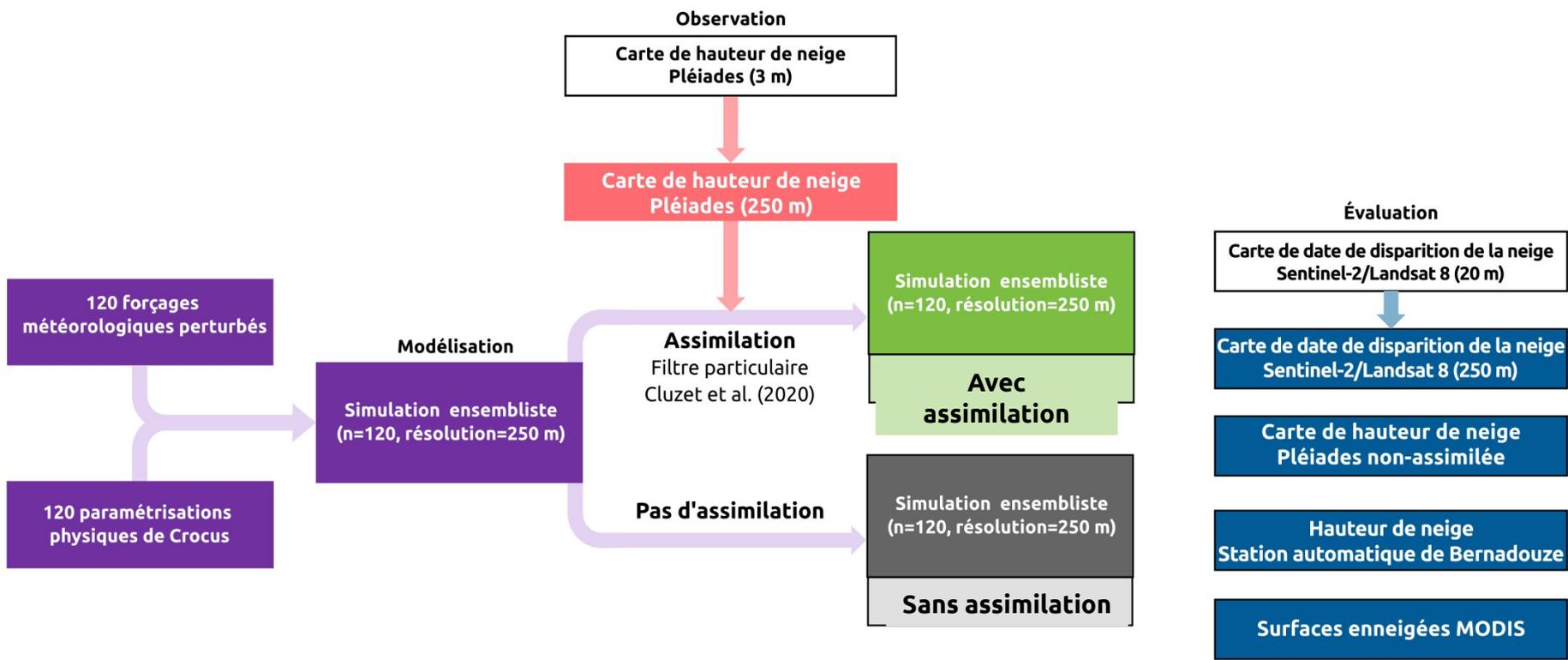
**Sans assimilation**

Évaluation  
Carte de date de disparition de la neige Sentinel-2/Landsat 8 (20 m)

Carte de date de disparition de la neige Sentinel-2/Landsat 8 (250 m)

Carte de hauteur de neige Pléiades non-assimilée

# Assimilation de cartes de hauteur de neige dans un modèle de manteau neigeux



**Perturbation stochastique**  
(rayonnement,  
précipitations,  
température...)

120 forçages  
météorologiques perturbés

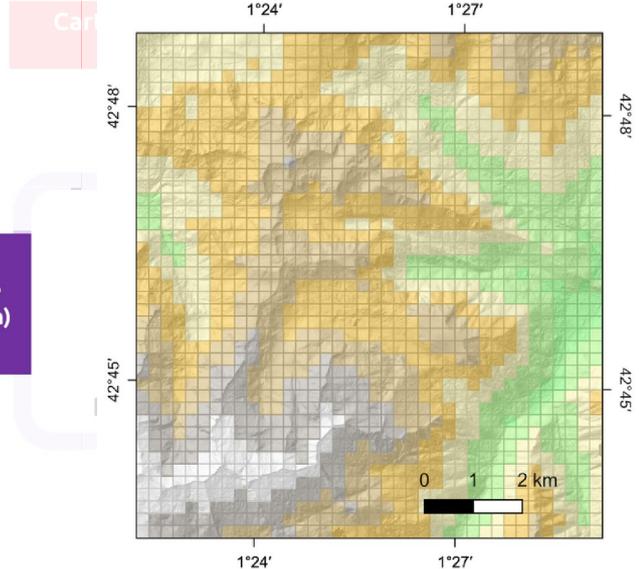
**Modélisation**

Simulation ensembliste  
(n=120, résolution=250 m)

120 paramétrisations  
physiques de Crocus

**Vitesse de tassement,  
métamorphisme,  
densité de la neige**  
Lafaysse et al. (2017)

Observation  
Carte de hauteur de neige  
Pléiades (3 m)



Elevation (m asl)  
≤ 900  
900 - 1200  
1200 - 1500  
1500 - 1800  
1800 - 2100  
2100 - 2400  
> 2400

Évaluation

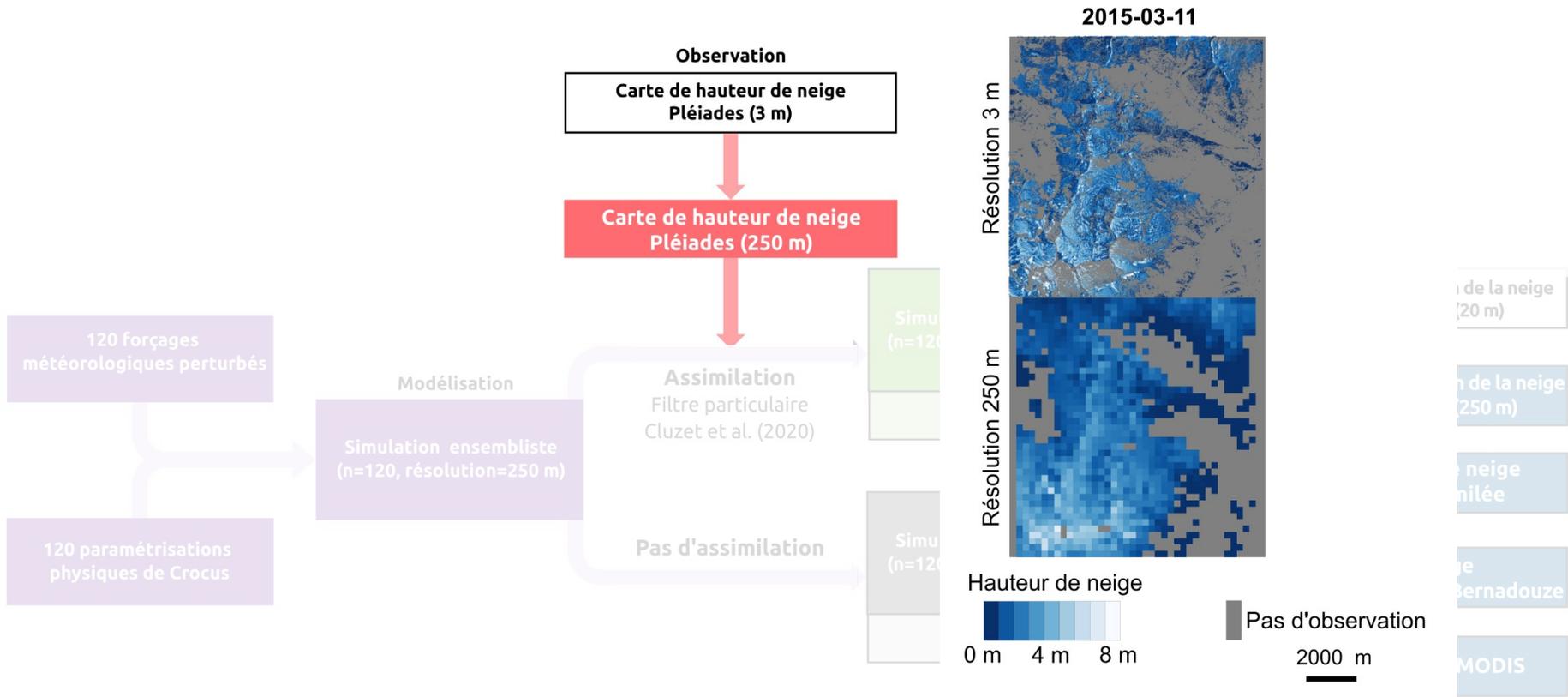
Carte de date de disparition de la neige  
Sentinel-2/Landsat 8 (20 m)

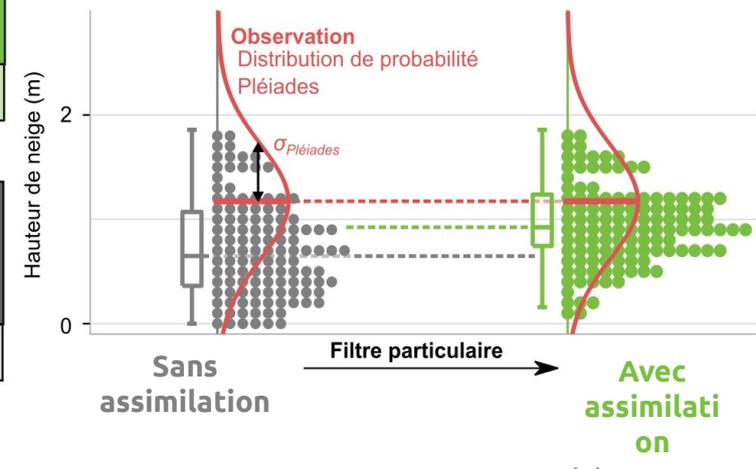
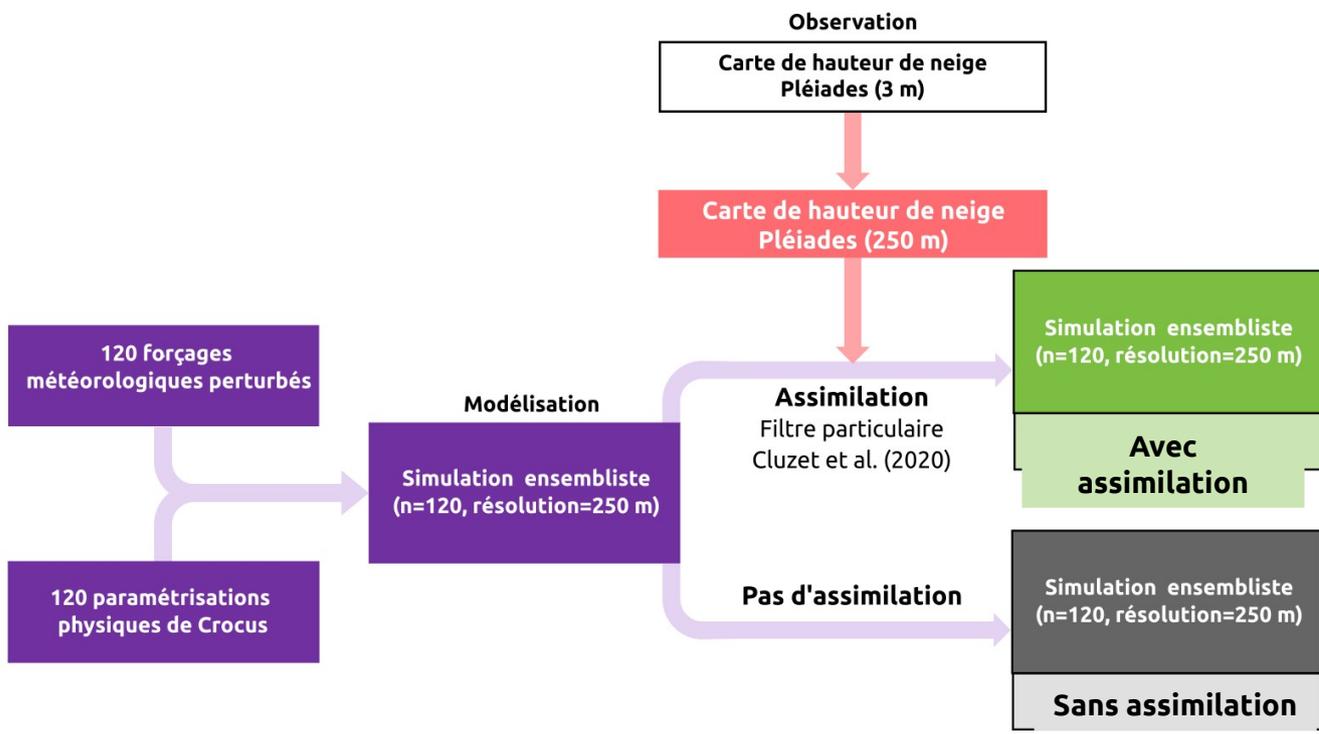
Carte de date de disparition de la neige  
Sentinel-2/Landsat 8 (250 m)

Carte de hauteur de neige  
Pléiades non-assimilée

Hauteur de neige  
non automatisée de Bernadouze

Surfaces enneigées MODIS





120 forçages  
météorologiques perturbés

120 paramétrisations  
physiques de Crocus

Modélisation  
Simulation ensembliste  
(n=120, résolution=250 m)

Observation  
Carte de hauteur de neige  
Pléiades (3 m)

Carte de hauteur de neige  
Pléiades (250 m)

Assimilation  
Filtre particulaire  
Cluzet et al. (2020)

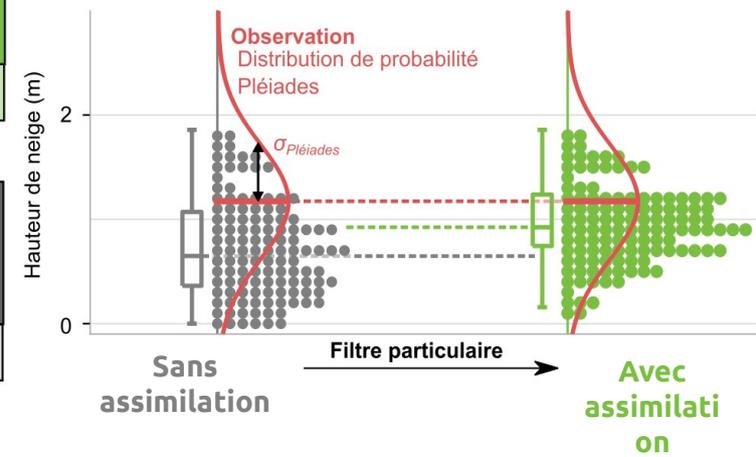
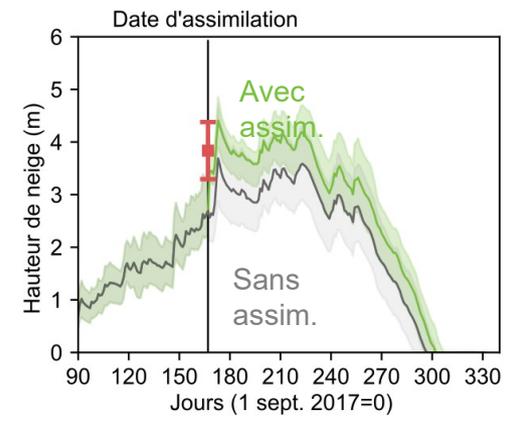
Pas d'assimilation

Simulation ensembliste  
(n=120, résolution=250 m)

Avec  
assimilation

Simulation ensembliste  
(n=120, résolution=250 m)

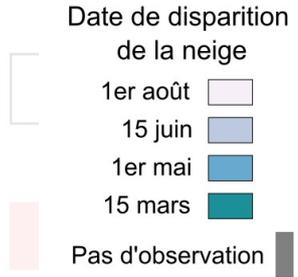
Sans assimilation



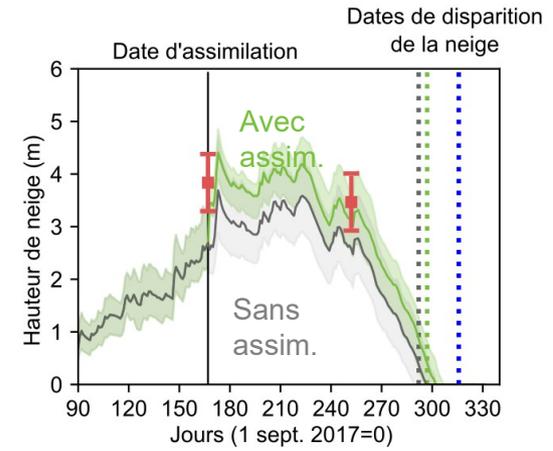
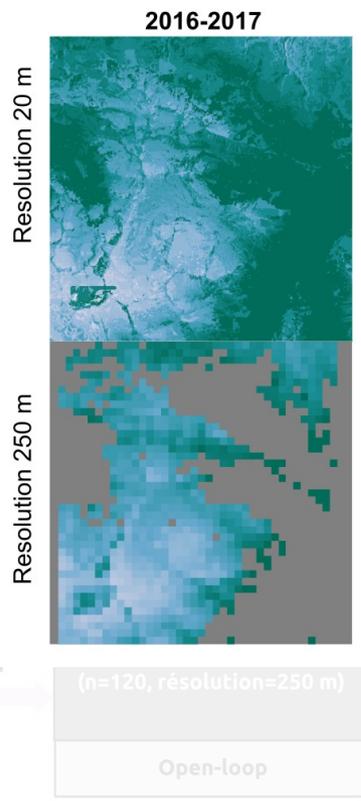
120 forçages  
météorologiques perturbés

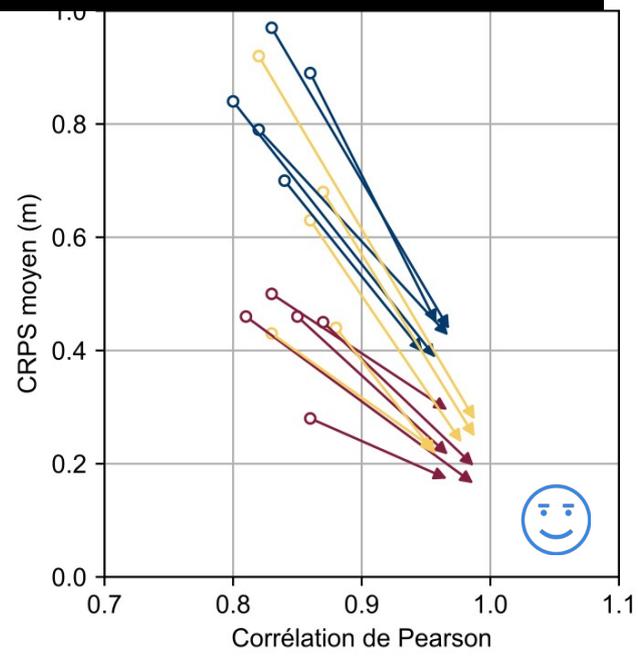
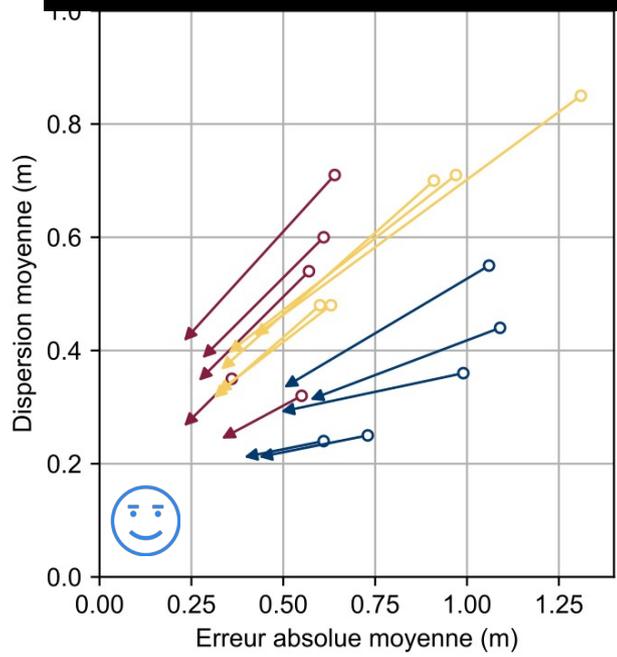
120 paramétrisations  
physiques de Crocus

Modélisation  
Simulation ensembliste  
(n=120, résolution=250 m)



2000 m

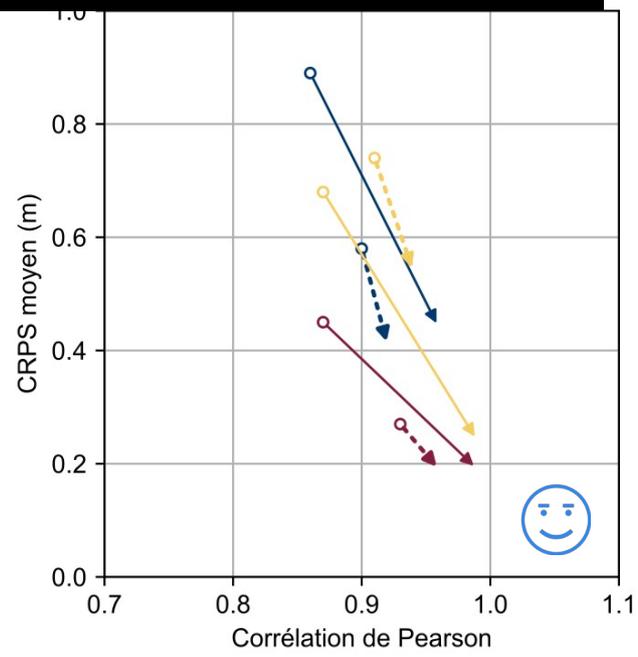
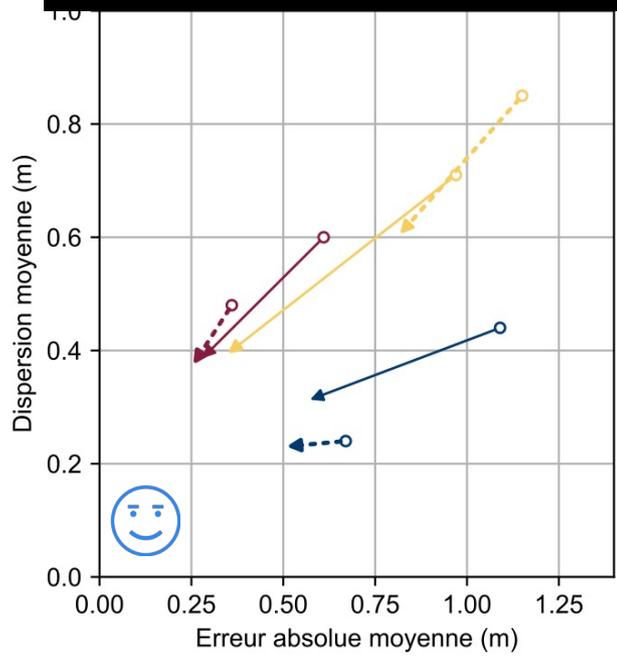




Sans assimilation    Avec assimilation

**Perturbation des précipitations**

- X 0.5
- X 1.0
- X 2.0



Sans assimilation    Avec assimilation  
 ○ ———→    ○ - - - - -> 2018-05-11 (évaluation)

**Perturbation des précipitations**  
 ○ ———→ X 0.5  
 ○ ———→ X 1.0  
 ○ ———→ X 2.0

Précipitation x 0.5



Précipitation x 1.0



Précipitation x 2.0

