

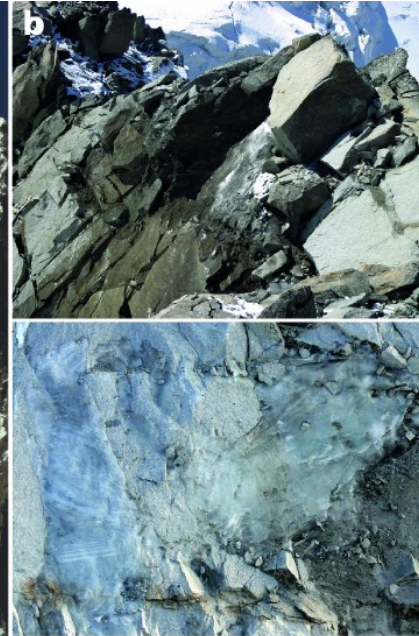
# Apports de la télédétection pour l'étude des risques liés au permafrost

**Diego CUSICANQUI, Pascal LACROIX - ISTerre (IRD / UGA / CNRS)**

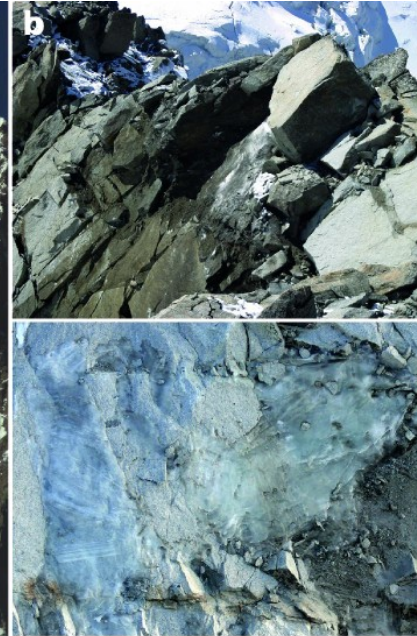
**Xavier BODIN - EDYTEM (CNRS / USMB)**



# Contexte | Différents types de permafrost en montagne



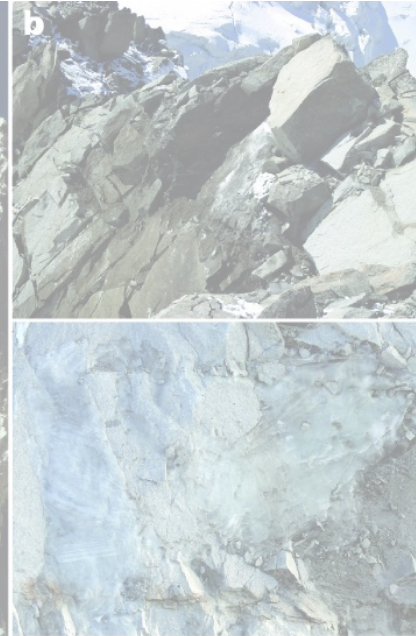
# Contexte | Différents types de permafrost en montagne



## Parois rocheuses

- > 3000 m, Mont Blanc, Ecrins et Vanoise
- Faces raides (>40°)
- Glace dans les fractures

# Contexte | Différents types de permafrost en montagne



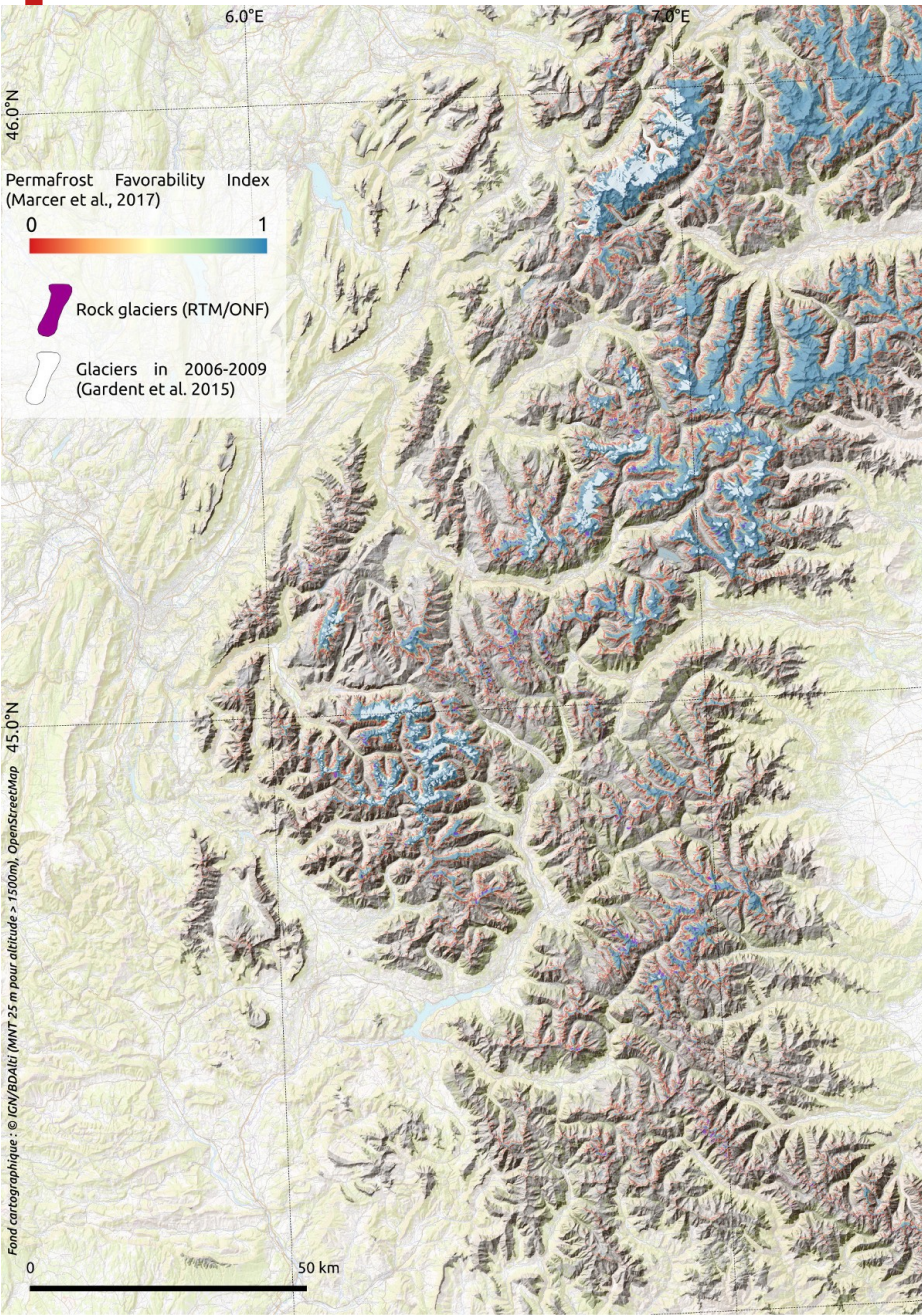
## Parois rocheuses

- > 3000 m, Mont Blanc, Ecrins et Vanoise
- Faces raides (>40°)
- Glace dans les fractures

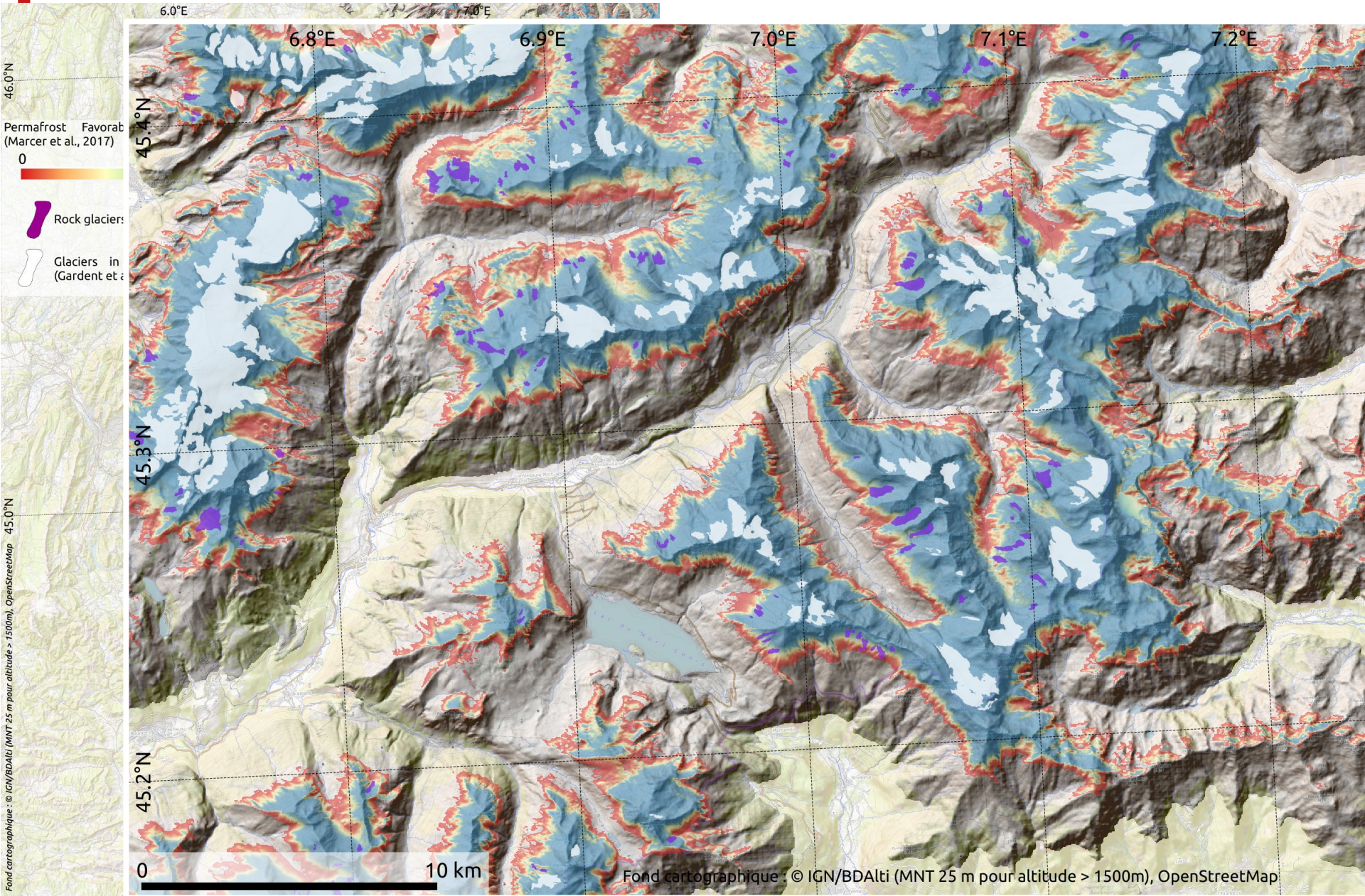
## Formations superficielles (glaciers rocheux)

- > 2400 m, tous les massifs peu englacés
- Débris rocheux + glace
- Plus de 3500 glaciers rocheux dans les Alpes fr.

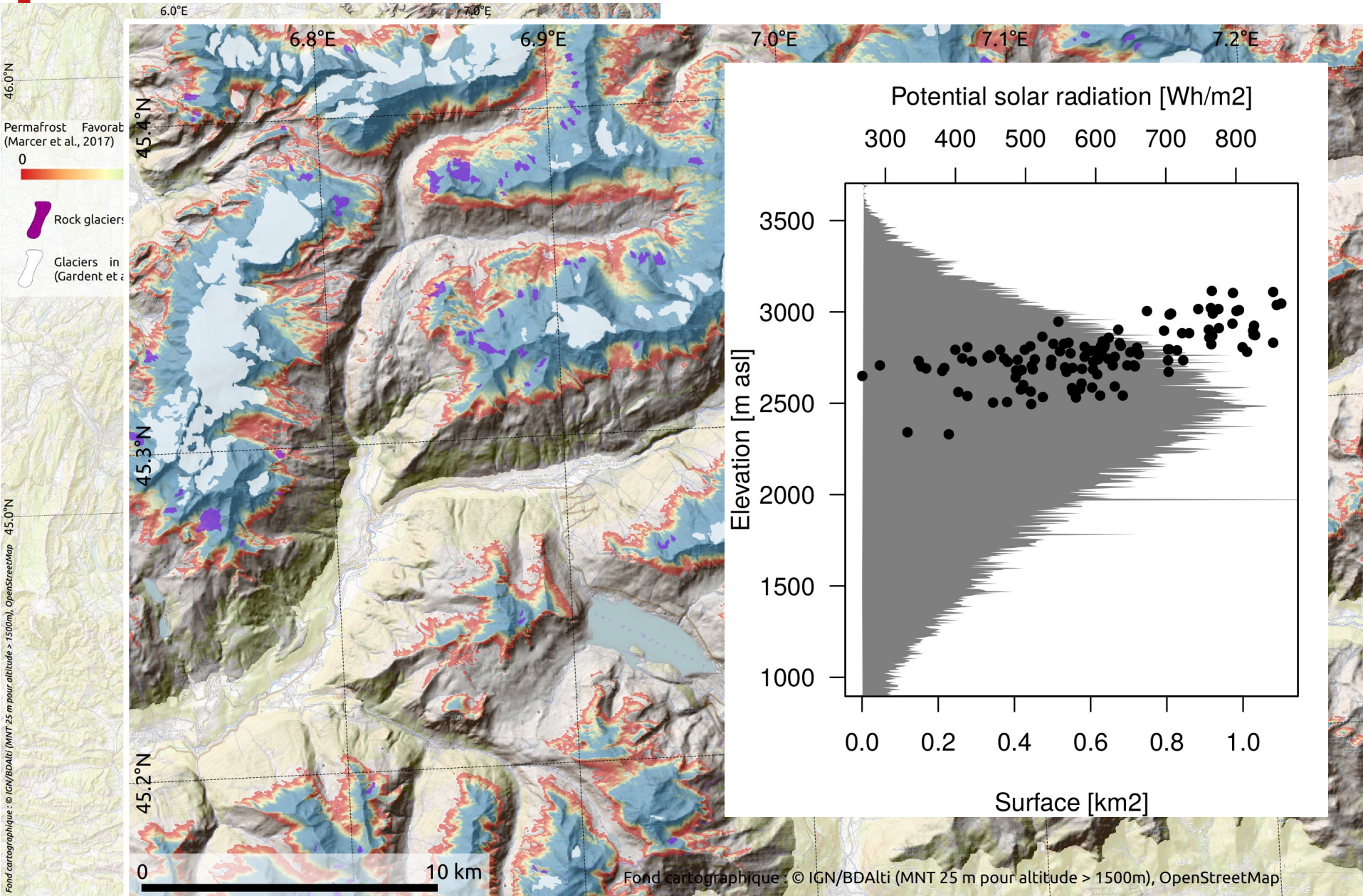
# Contexte | Distribution des GR et du permafrost riche en glace



# Contexte | Distribution des GR et du permafrost riche en glace

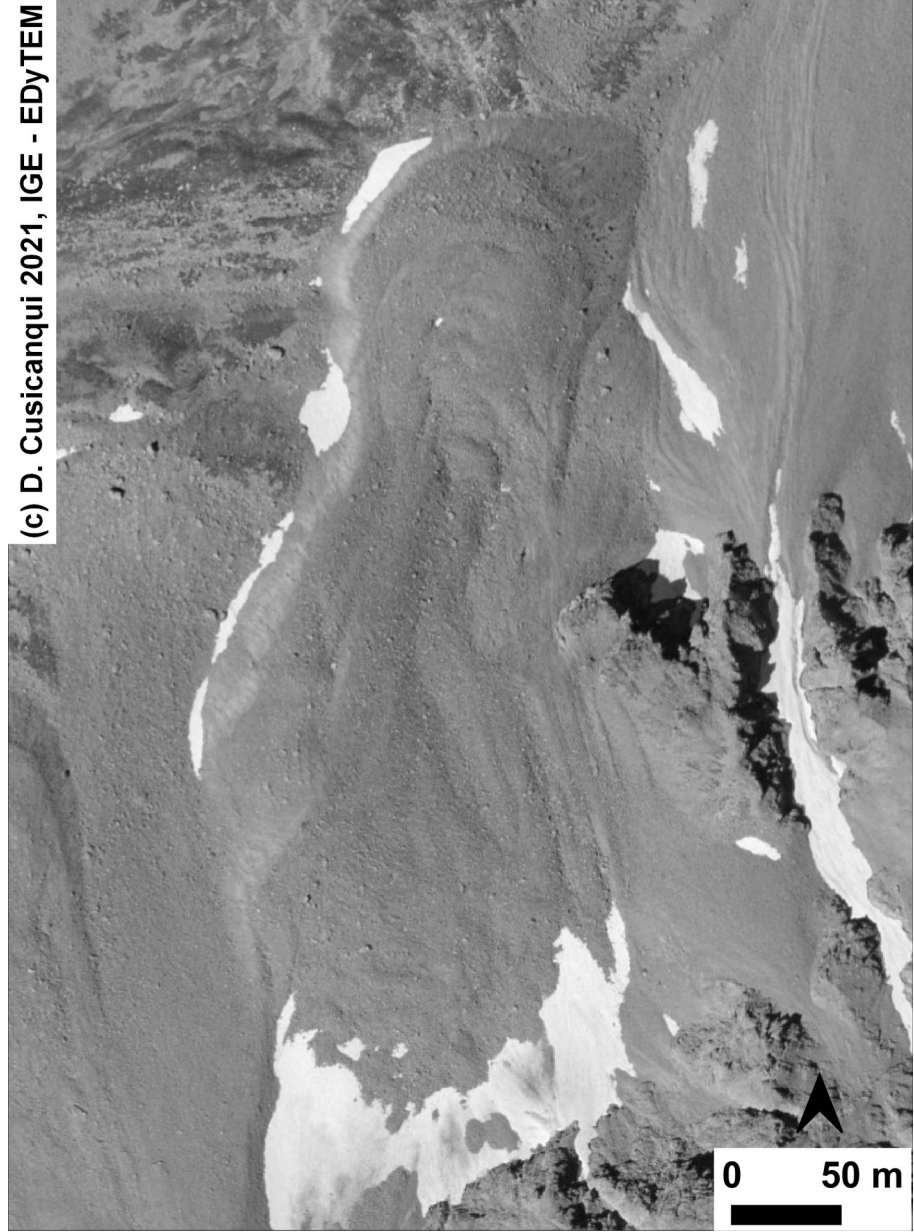


# Contexte | Distribution des GR et du permafrost riche en glace



# Contexte | Fonctionnement des glaciers rocheux

1952 1960 1971 1986 1994 **2003** 2013 2017 2019

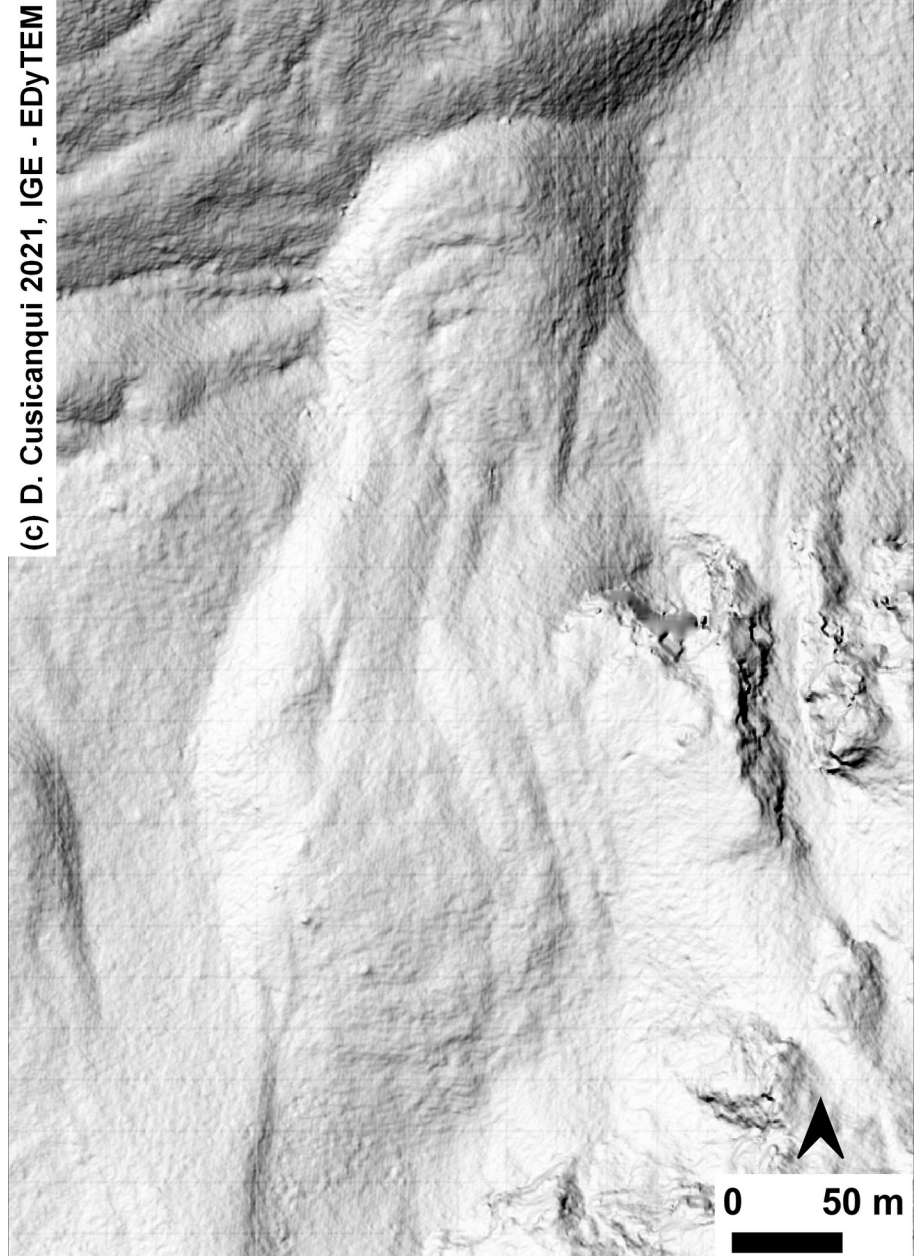


Cusicanqui *et al.*, 2021



# Contexte | Fonctionnement des glaciers rocheux

1952 1960 1971 1986 1994 2003 2013 2017 2019



Cusicanqui *et al.*, 2021

# Contexte | Fonctionnement des glaciers rocheux

1952 1960 1971 1986 1994 2003 2013 2017 2019

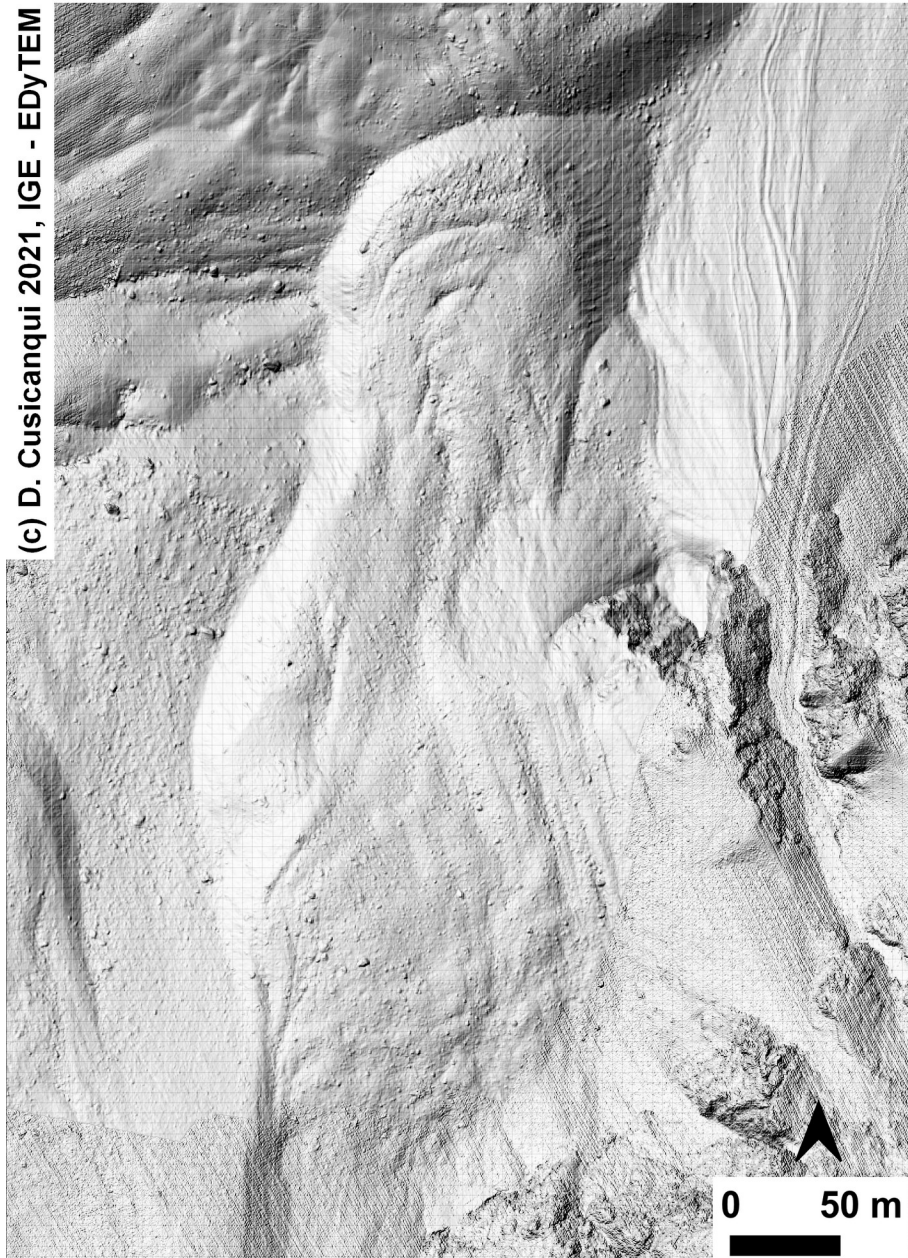


Cusicanqui *et al.*, 2021

# Contexte | Fonctionnement des glaciers rocheux

1952 1960 1971 1986 1994 2003 2013 2017 2019

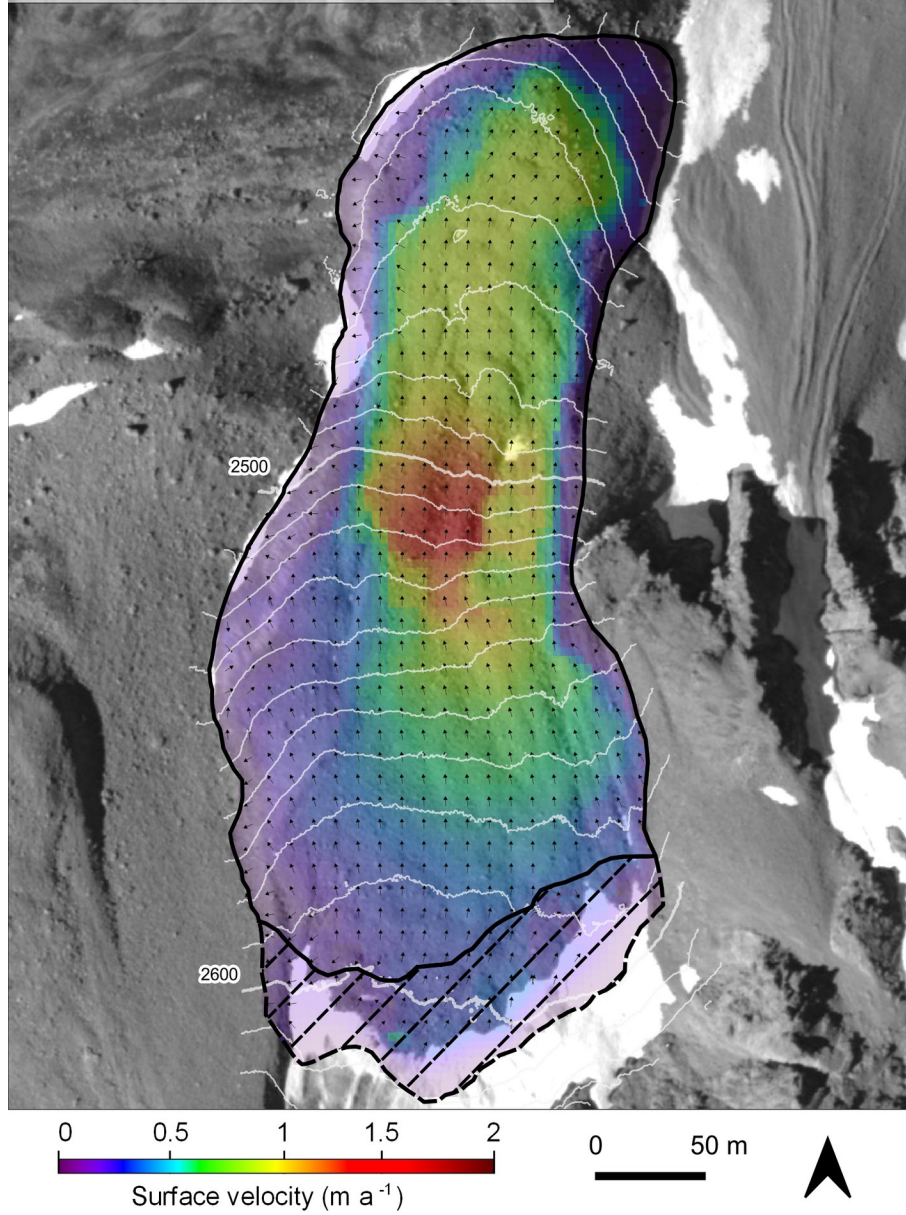
(c) D. Cusicanqui 2021, IGE - EDyTEM



Cusicanqui *et al.*, 2021

# Contexte | Fonctionnement des glaciers rocheux

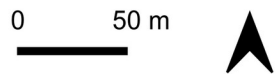
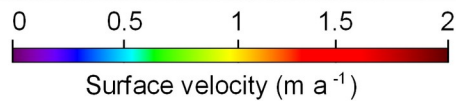
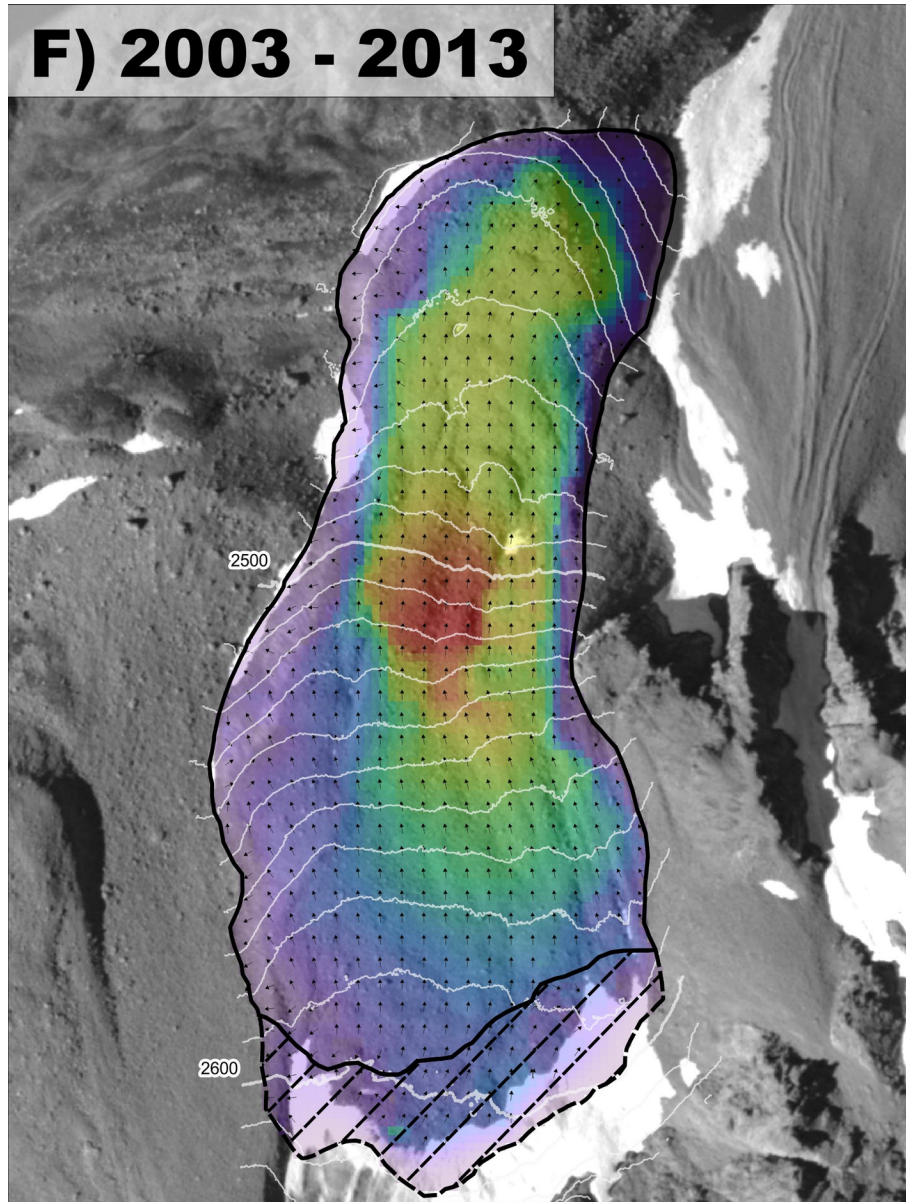
**F) 2003 - 2013**



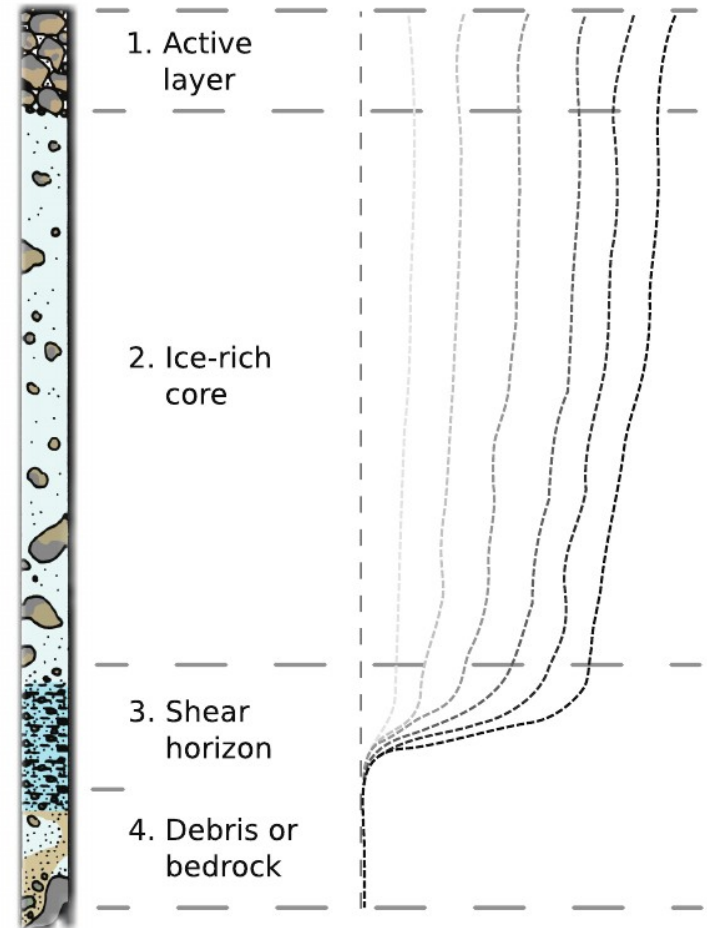
Cusicanqui *et al.*, 2021

# Contexte | Fonctionnement des glaciers rocheux

**F) 2003 - 2013**



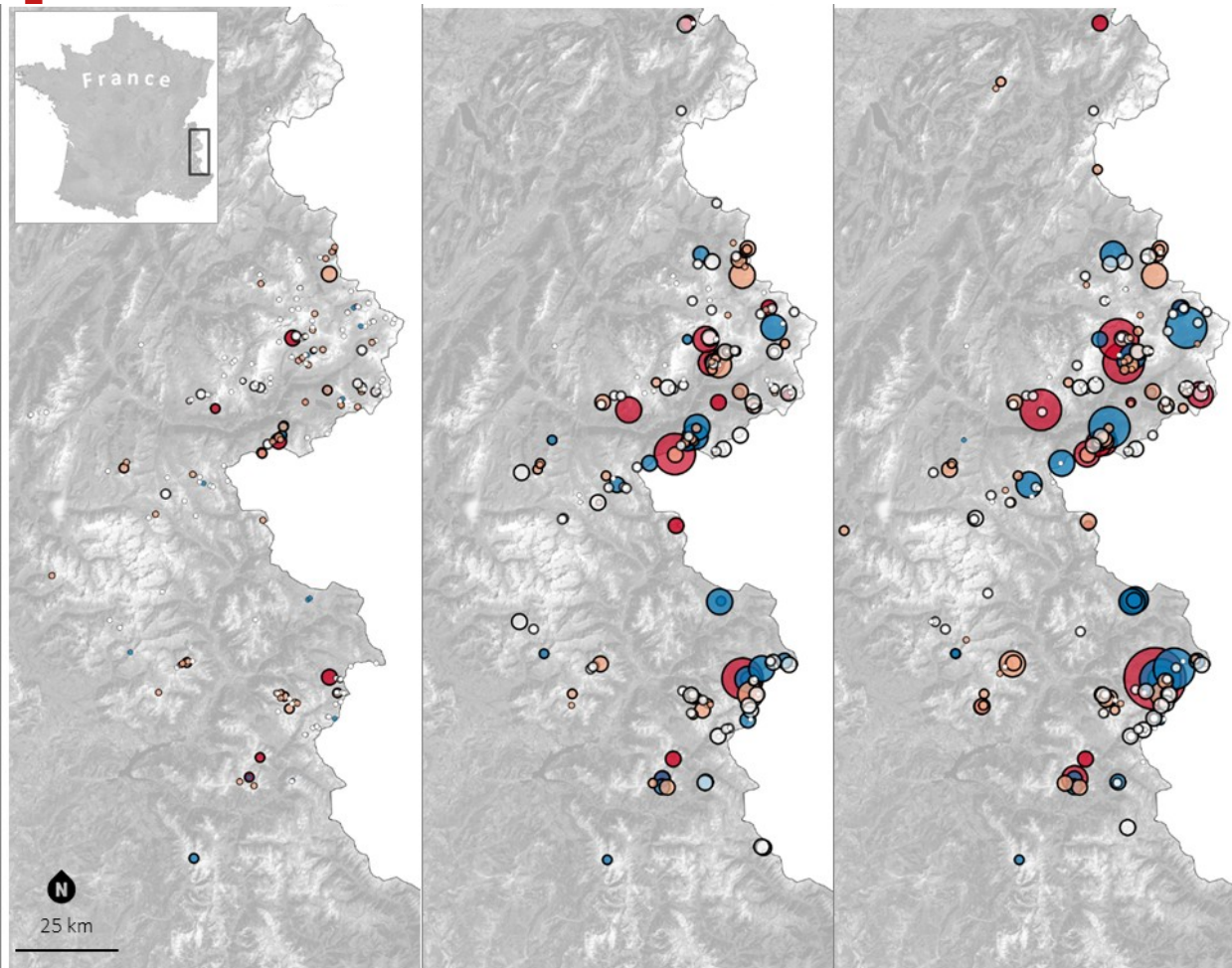
Internal structure      Displacement



Cicoira *et al.*, 2021

Cusicanqui *et al.*, 2021

# Contexte | Evolution des glaciers rocheux

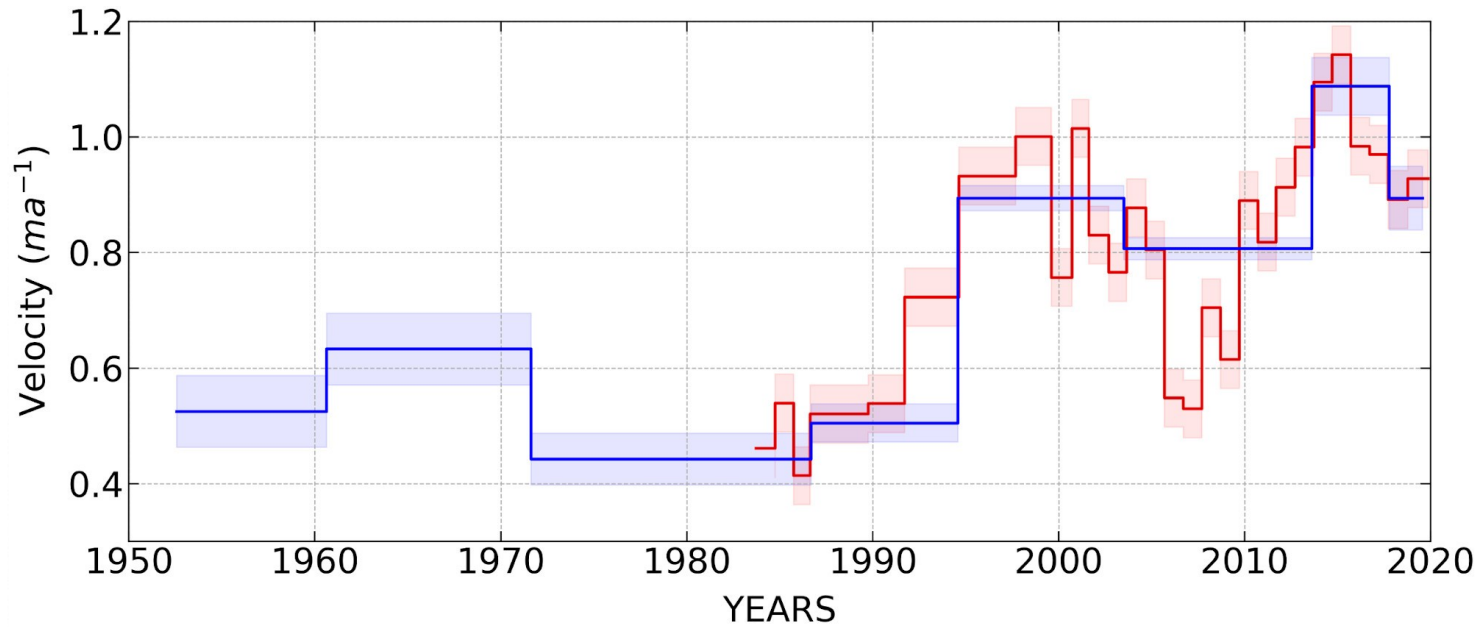
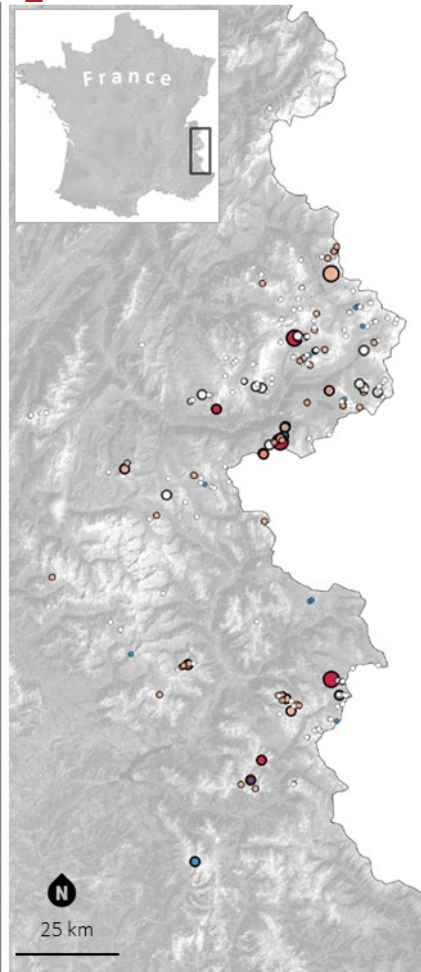


Displacement rate [ $\text{my}^{-1}$ ]

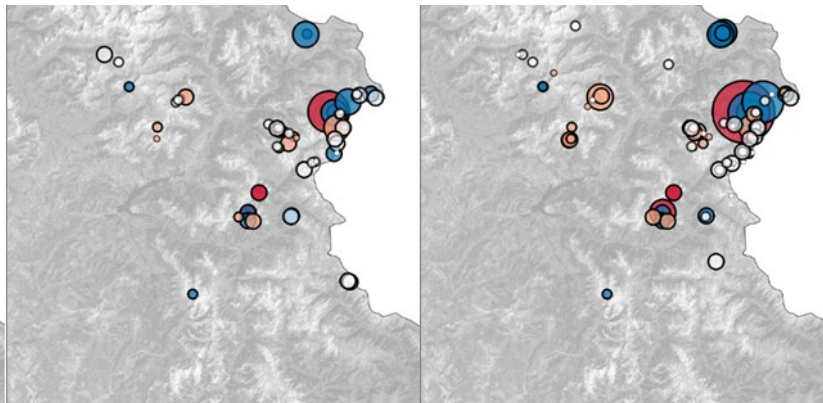
Destabilization rating



# Contexte | Evolution des glaciers rocheux



Cusicanqui *et al.*, 2021



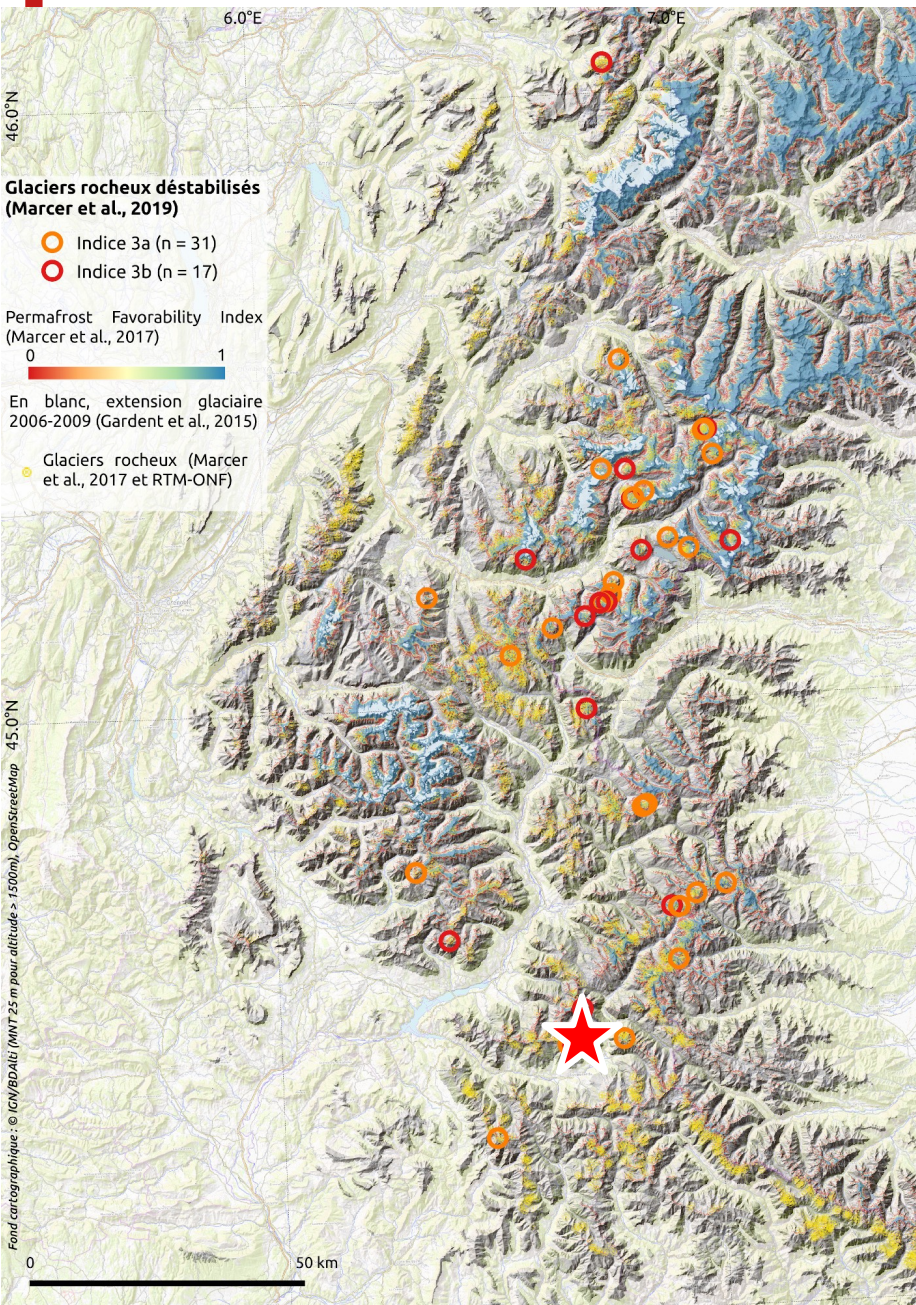
Displacement rate [ $my^{-1}$ ]

Destabilization rating

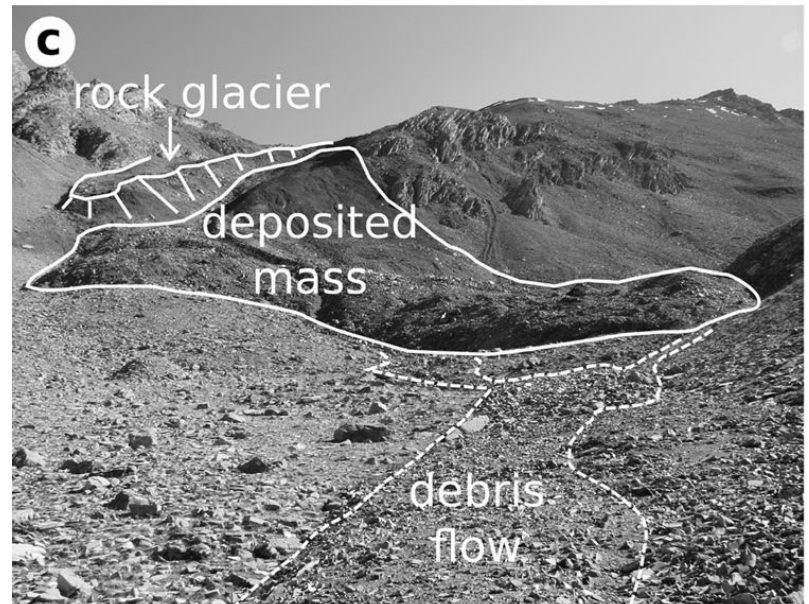
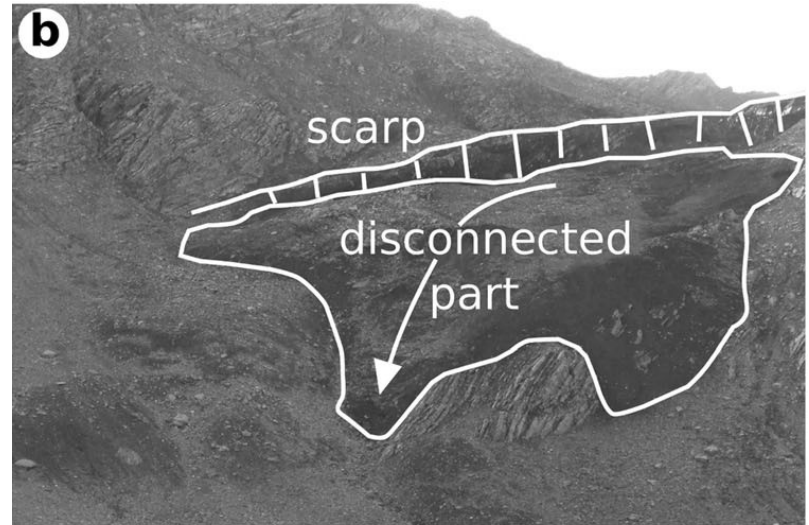


Marcer *et al.*, 2021

# Contexte | Risques liés aux glaciers rocheux



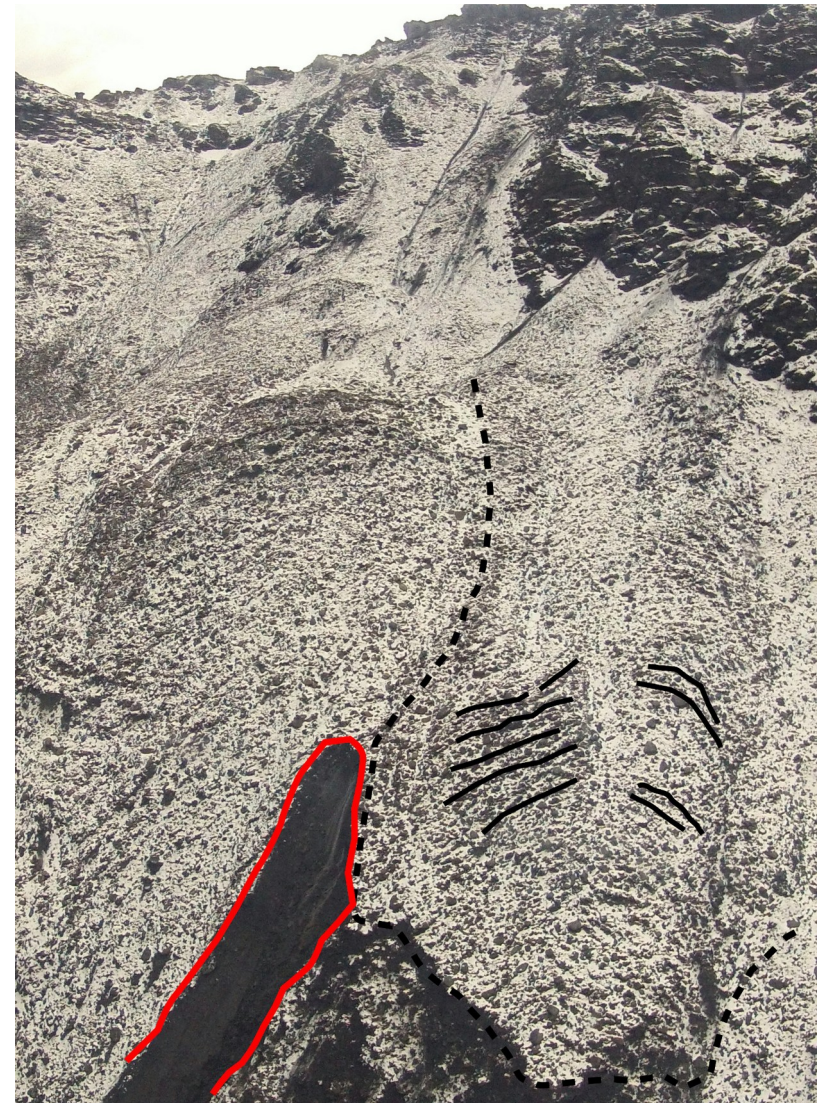
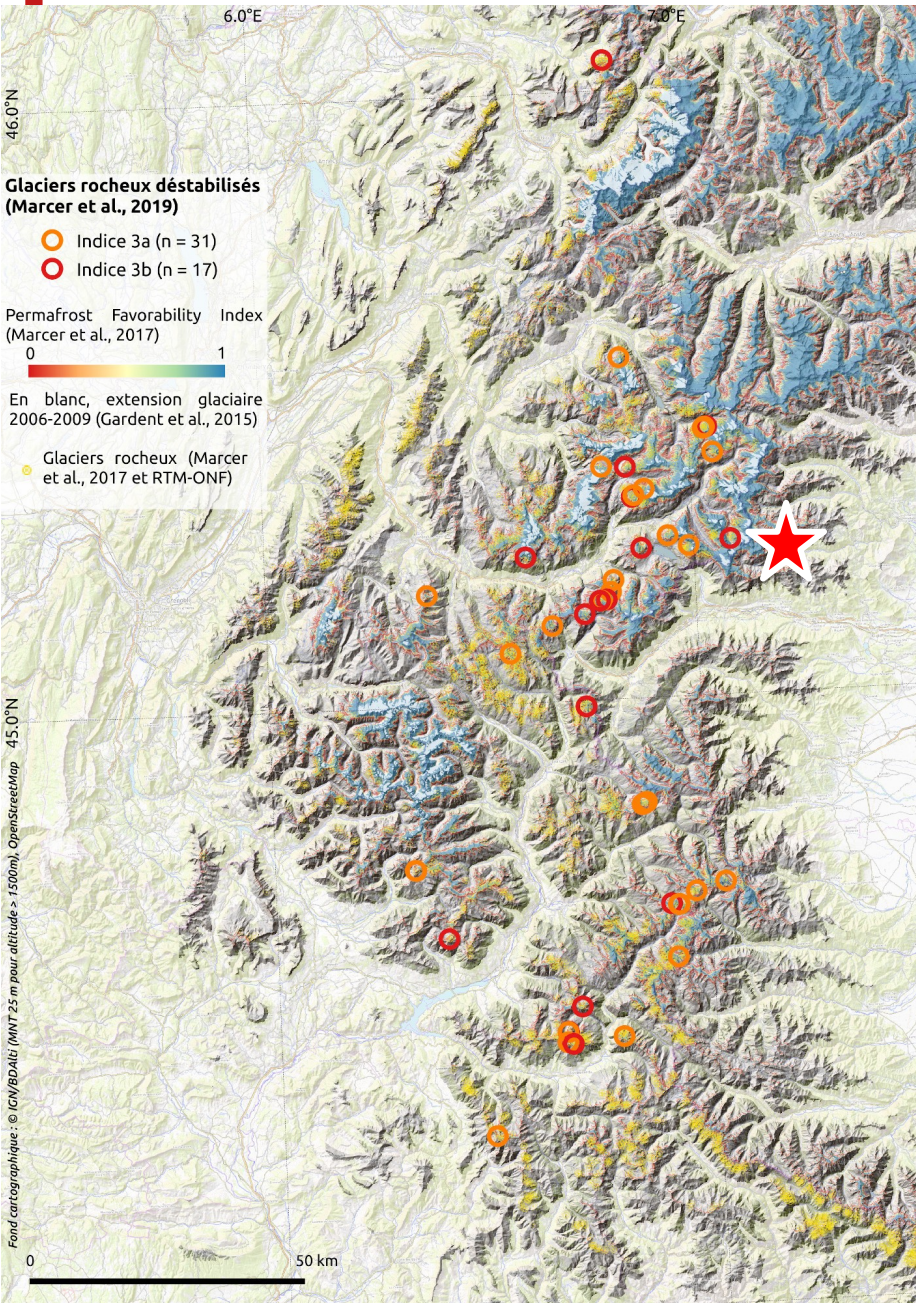
## L'effondrement du Bérard (2006)





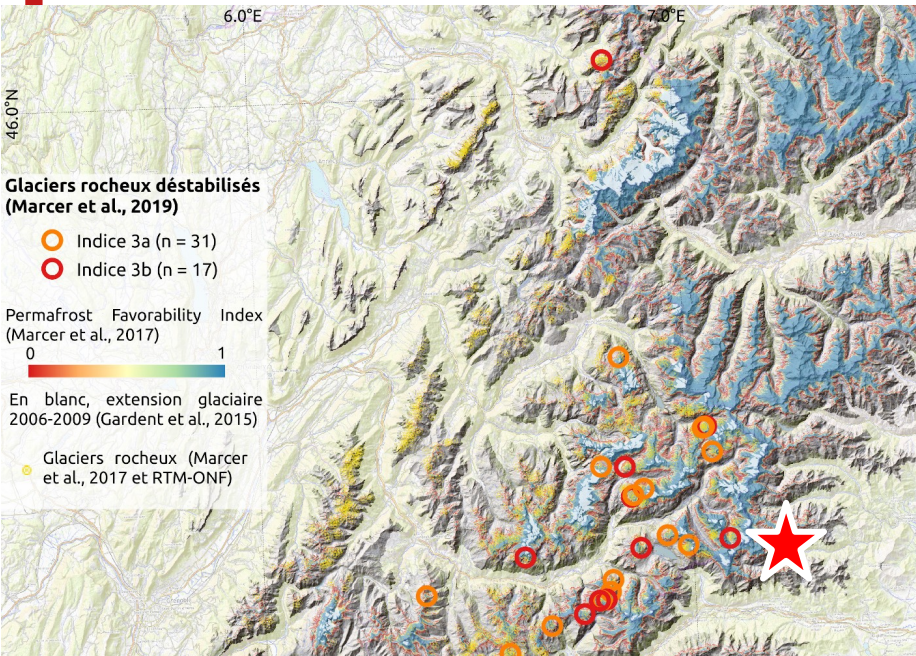
# Contexte | Risques liés aux glaciers rocheux

La lave torrentielle issue du GR du Lou (2015)



# Contexte | Risques liés aux glaciers rocheux

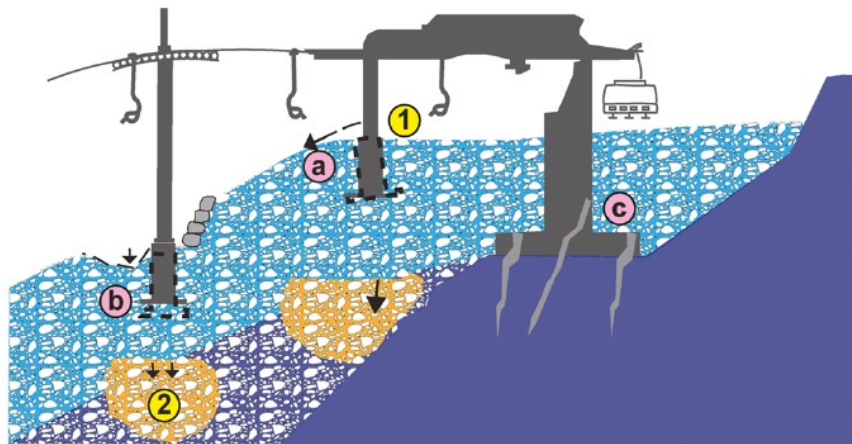
La lave torrentielle issue du GR du Lou (2015)










# Contexte | Risques liés aux glaciers rocheux

## Impacts sur les infrastructures *in situ*

Surficial deposits (e.g. chair lift)



-  Coarse sediments
-  Gravel
-  Bedrock
-  Cracks
-  Active layer
-  Permafrost
-  Permafrost thawing

### Geomorphological processes

- 1** Creep movement
- 2** Thermokarst
- 3** Rockfall - landslide

### NB

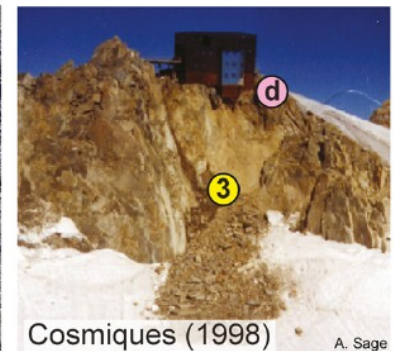
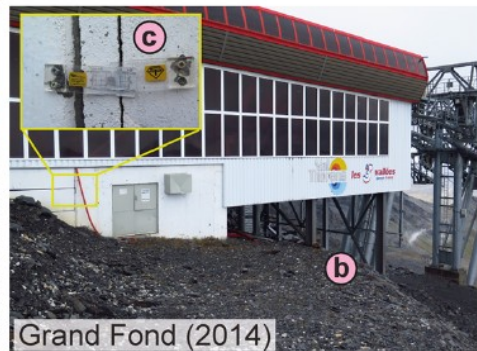
- 4
- 1
- 2

### Deteriorations effects

- a** Tilting
- b** Subsidence
- c** Cracking in foundations
- d** Deterioration of foundations and anchors

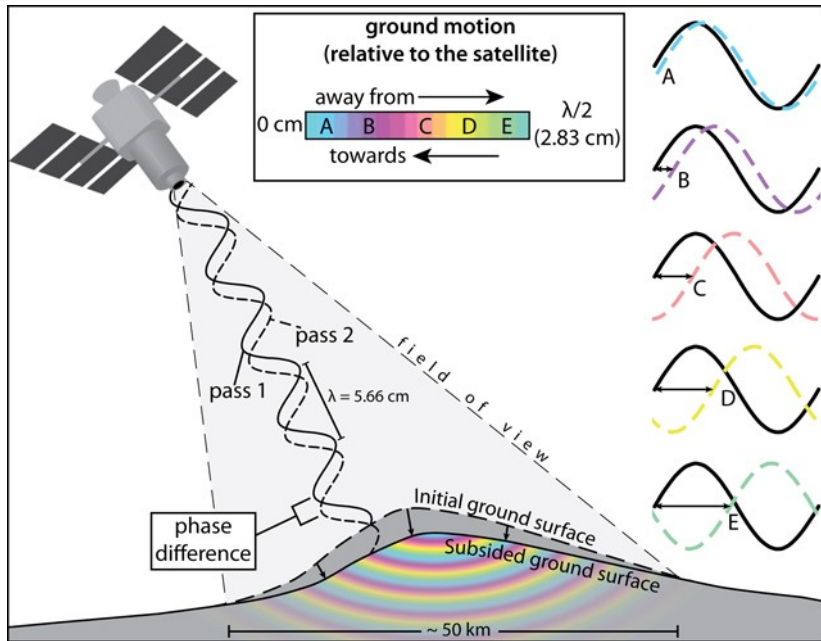
### NB

- 5
- 9
- 3
- 1

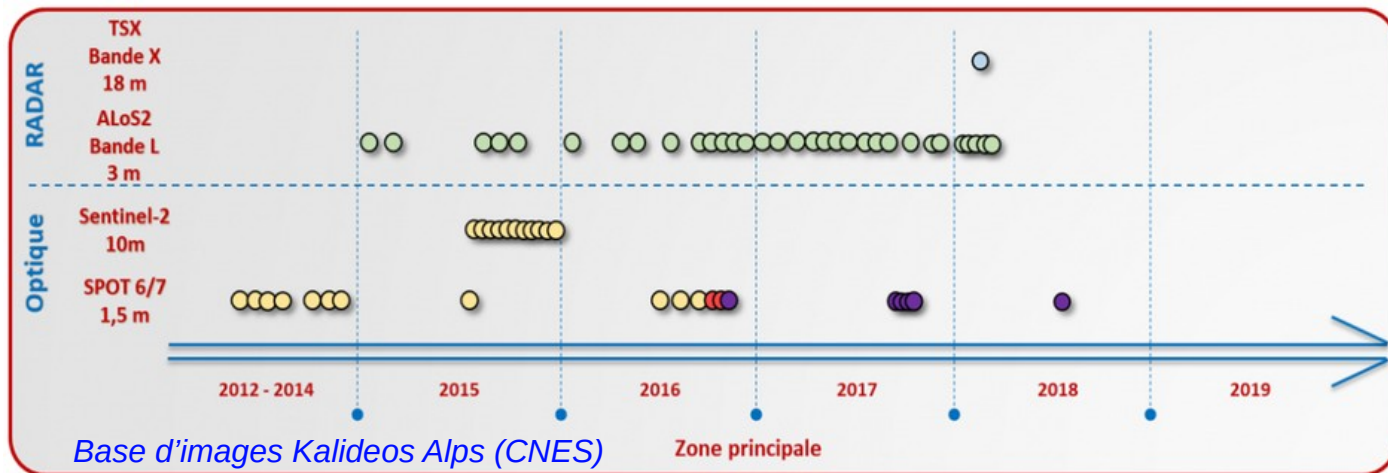
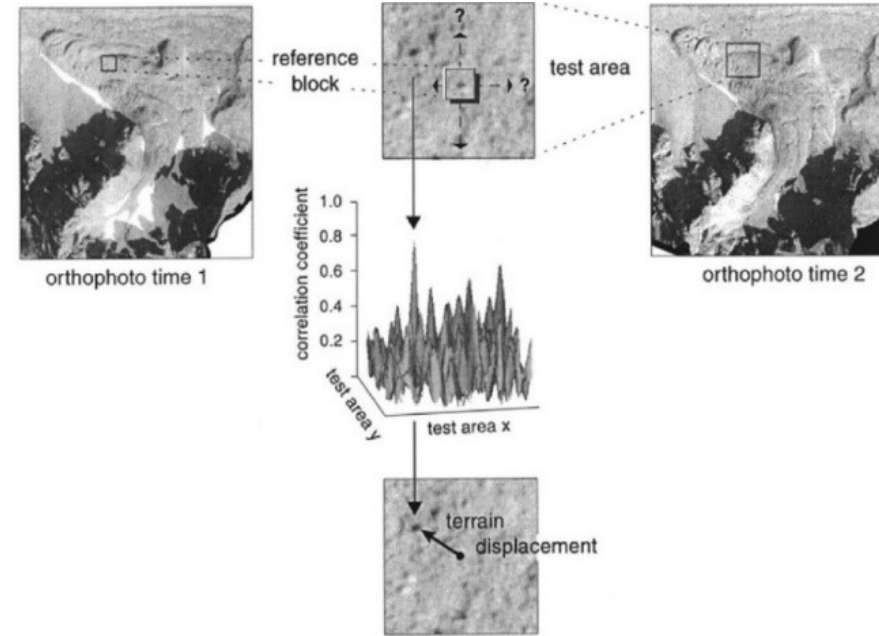


# Outils et données | Complémentarité des approches

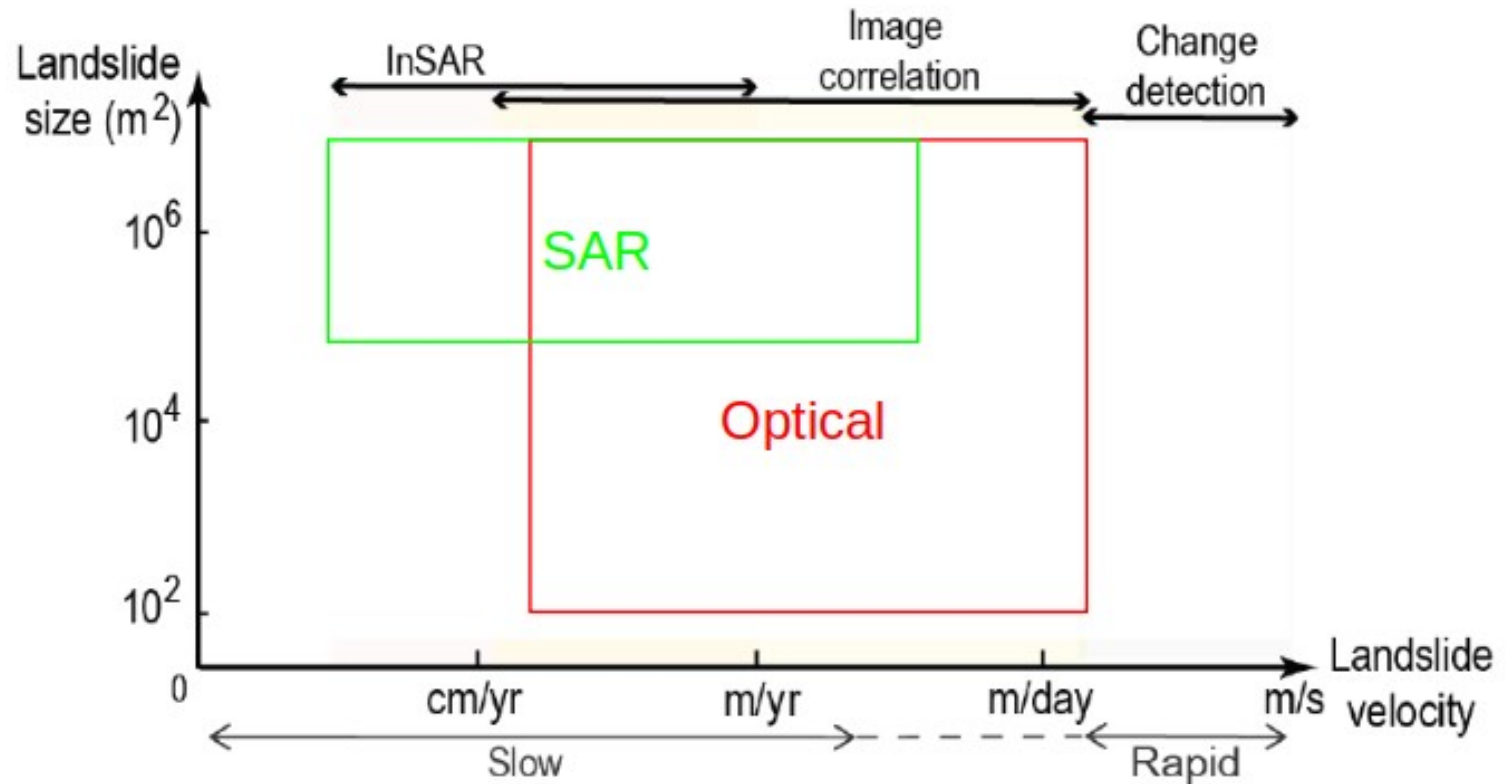
## InSAR



## Optique



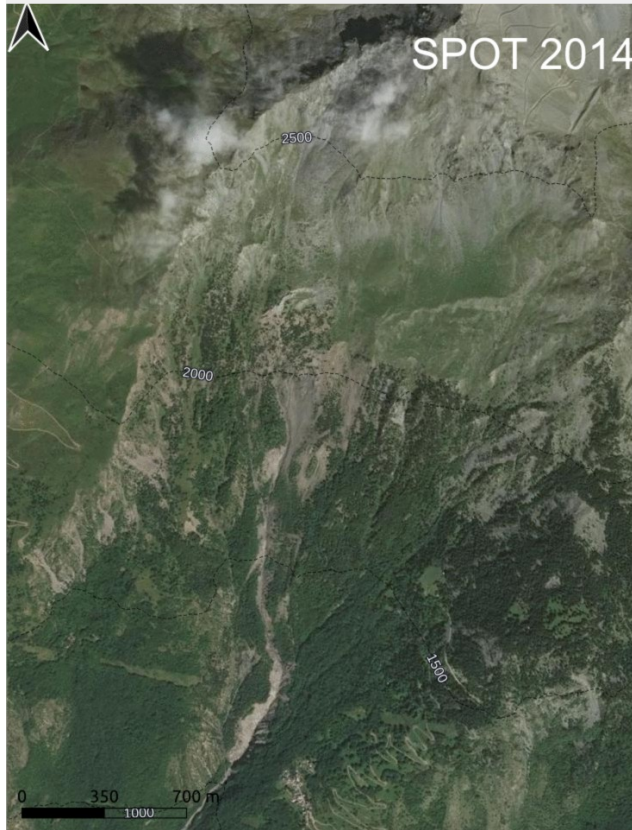
# Outils et données | Complémentarité des approches



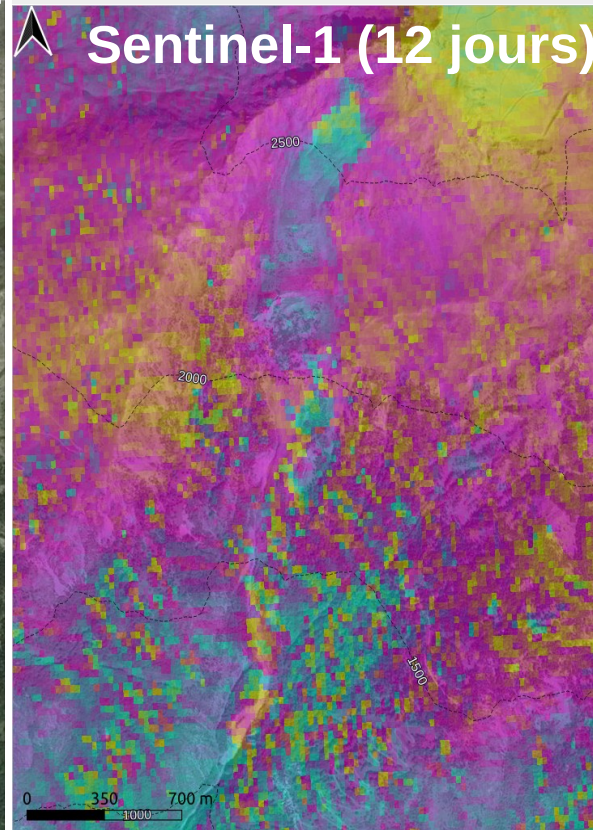
*Lacroix et al., 2022*

# Outils et données | Complémentarité des approches

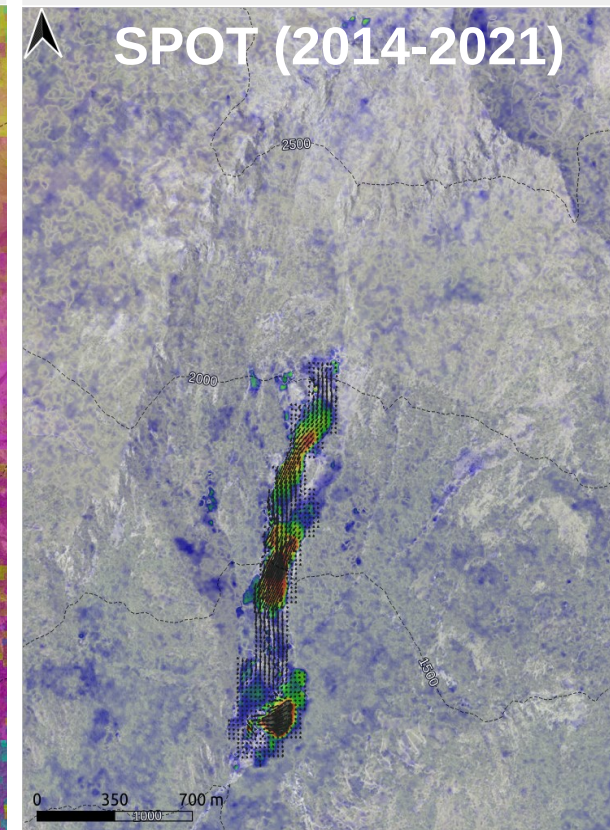
Massif de la Vanoise  
(Orelle)



Interférométrie SAR  
(InSAR)



Corrélation d'images  
optiques



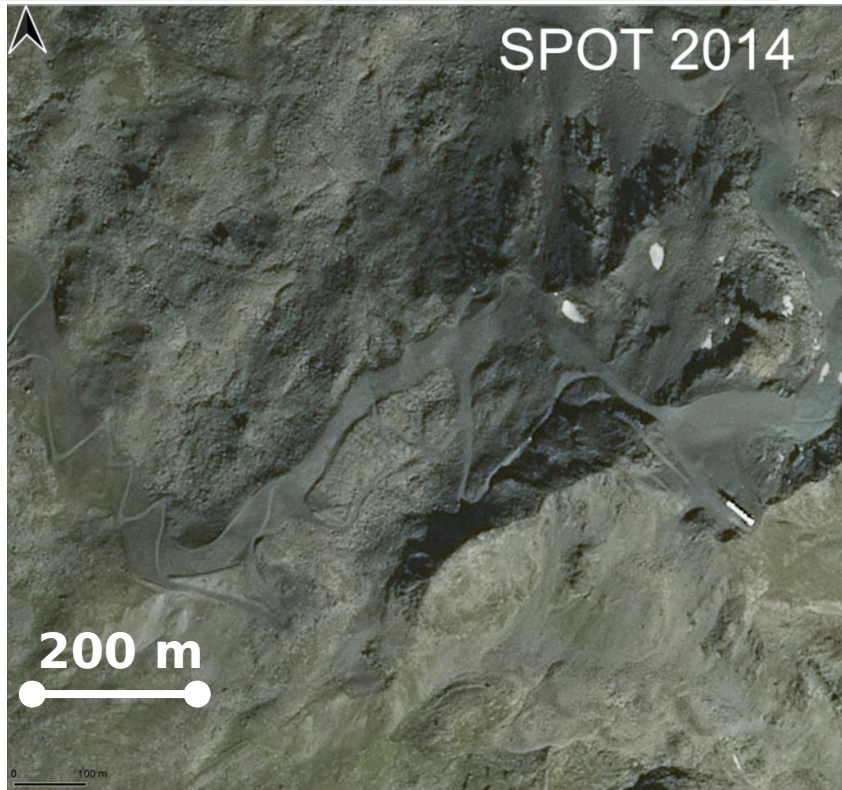
$-\pi$    $\pi$   
Différence de phase

$0$    $5$   
Vitesse de surface (m/an)

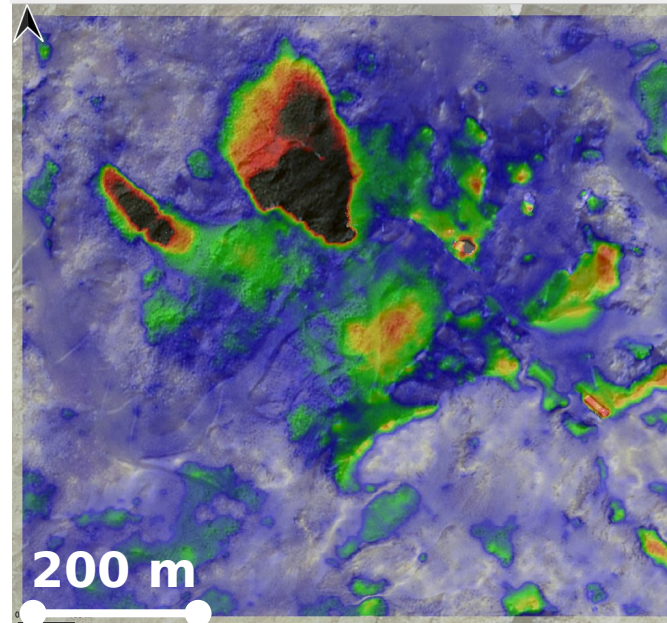
Images optiques / InSAR : des **données complémentaires**

# Cas d'étude | Le secteur du Mont Vallon (Savoie)

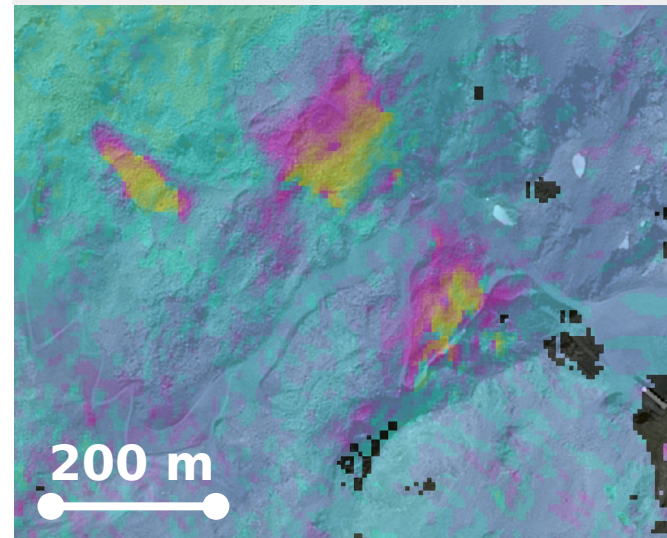
« Mont Vallon » station de sky



Corrélation d'images optiques



6 day InSAR Sentinel-1



0

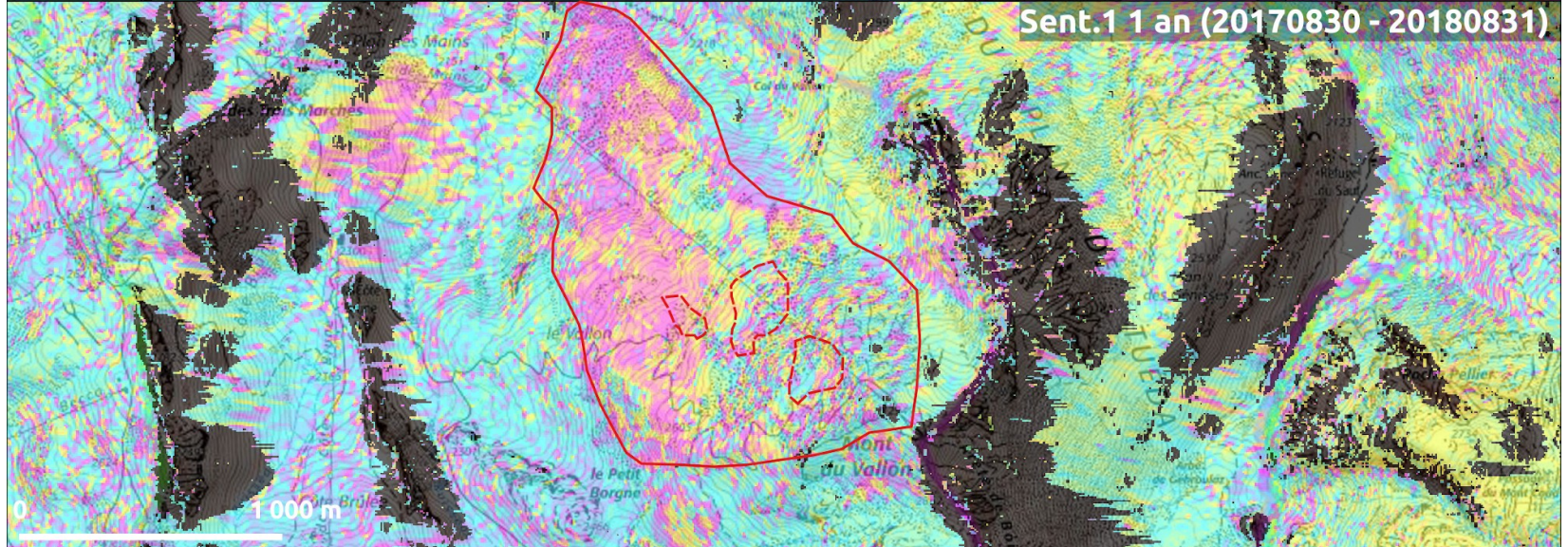
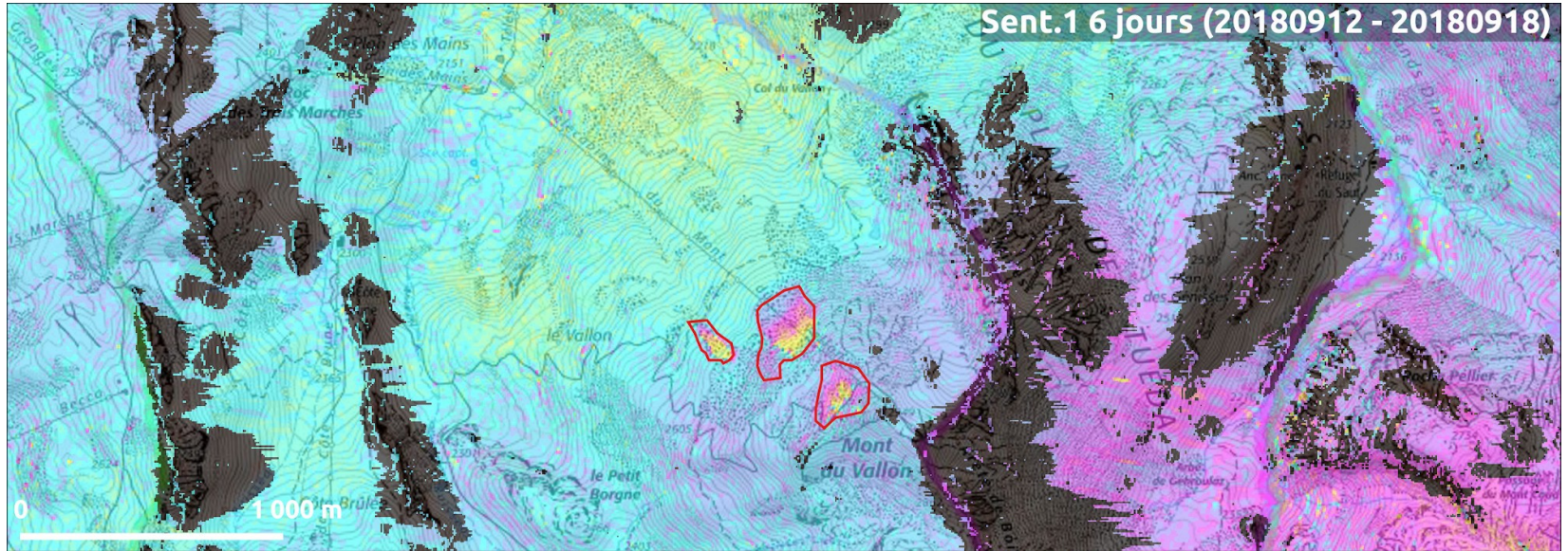


Vitesse de surface (m/an)

$-\pi$    $\pi$   
Différence de phase

This is a horizontal color scale legend for phase difference. It starts with  $-\pi$  on the left (red) and ends with  $\pi$  on the right (blue). The colors transition through orange, yellow, green, and cyan.

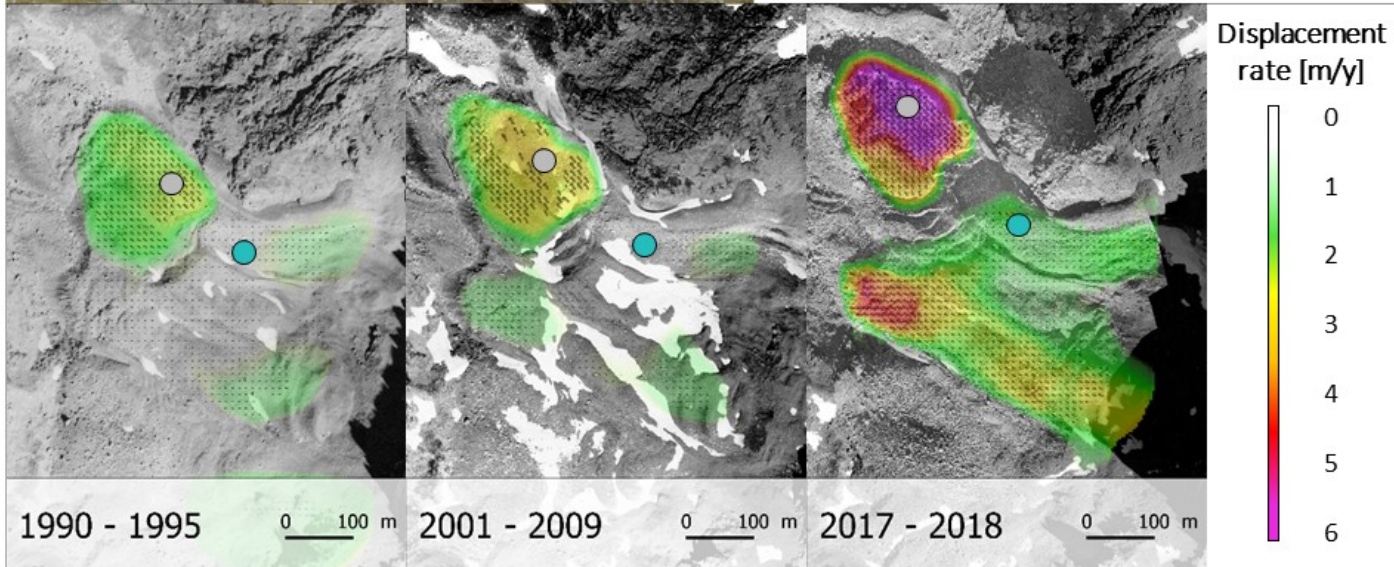
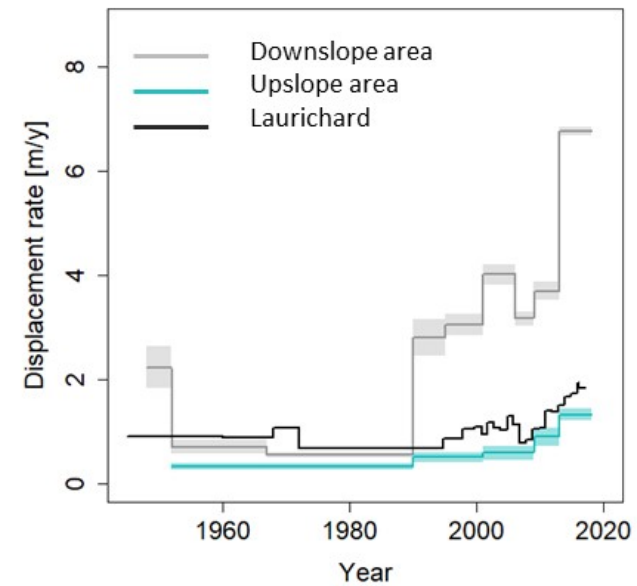
# Cas d'étude | Le secteur du Mont Vallon (Savoie)



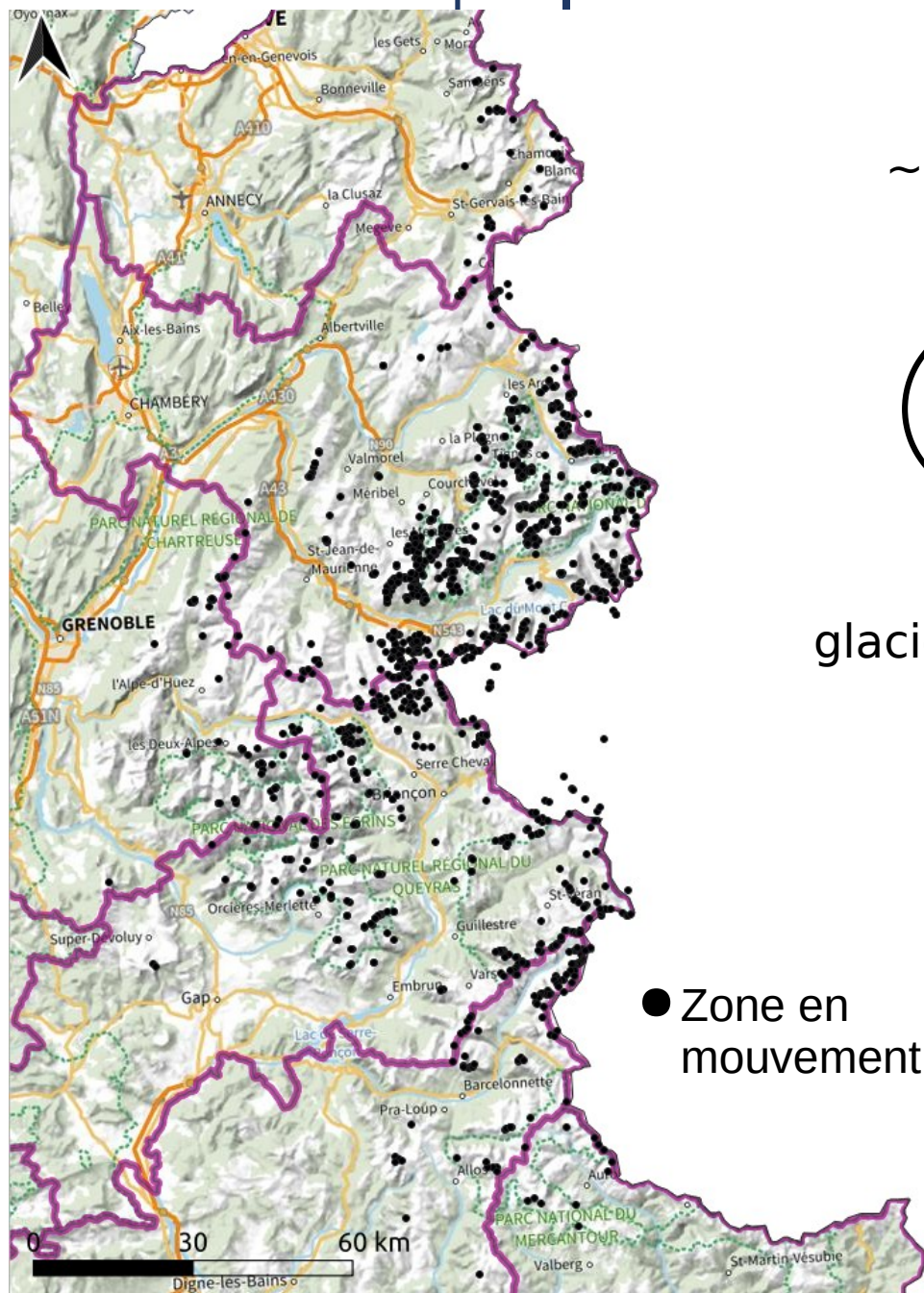
$-\pi$    $\pi$   
Différence de phase



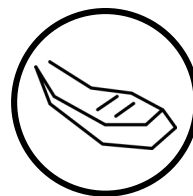
# Cas d'étude | Le glacier rocheux déstabilisé de Pierre Brune



# A l'échelle des Alpes | Résultat de l'inventaire InSAR



Base de données avec  
~ **1524 zones en mouvements**  
**détectées**



73 %  
glaciers rocheux



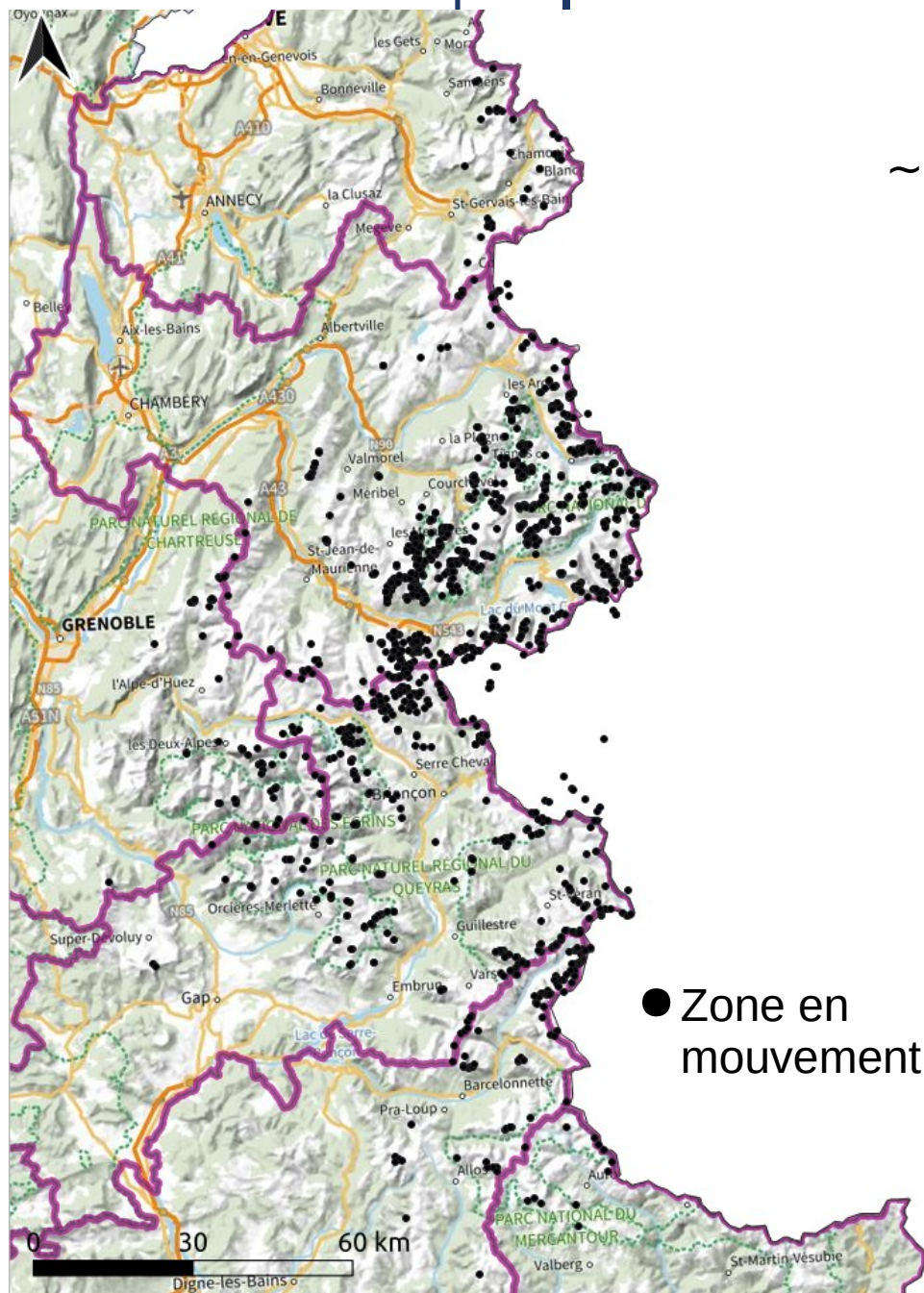
10 %  
glissements de terrain



17 %  
D'autre mouvements de masse

● Zone en  
mouvement

# A l'échelle des Alpes | Résultat de l'inventaire InSAR



Base de données avec  
**~1524 zones en mouvements  
détectées**



Vitesse estimée



- > 100 cm/a
- 30-100 cm/a
- 10-30 cm/a
- 3-10 cm/a
- 1-3 cm/a
- < 1 cm/a

● Zone en mouvement

## Conclusion

- **Risques émergents** : des tendances régionales à l'accélération des glaciers rocheux, avec des variations locales
- **Téledétection** : bonne complémentarité InSAR / Optique pour observer, suivre et étudier les phénomènes, et anticiper les risques
- **Evolution** : de plus en plus d'outils et données accessibles, avec des applications qui peuvent s'orienter d'avantage vers l'aide à la décision