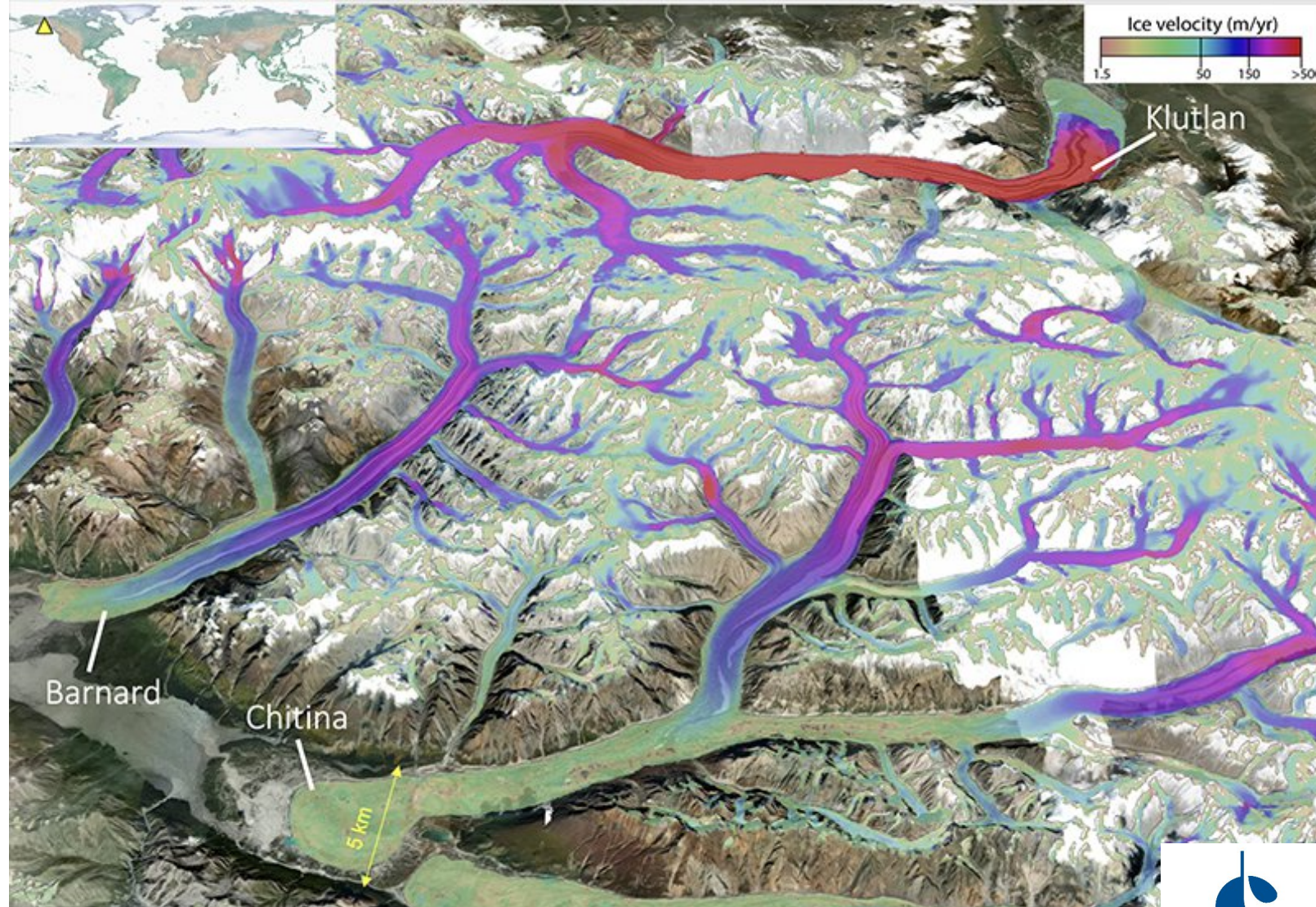


Apport de la mission Sentinel-2 pour le suivi des glaciers

Journées PNTS 2025

Laurane CHARRIER
Antoine RABATEL

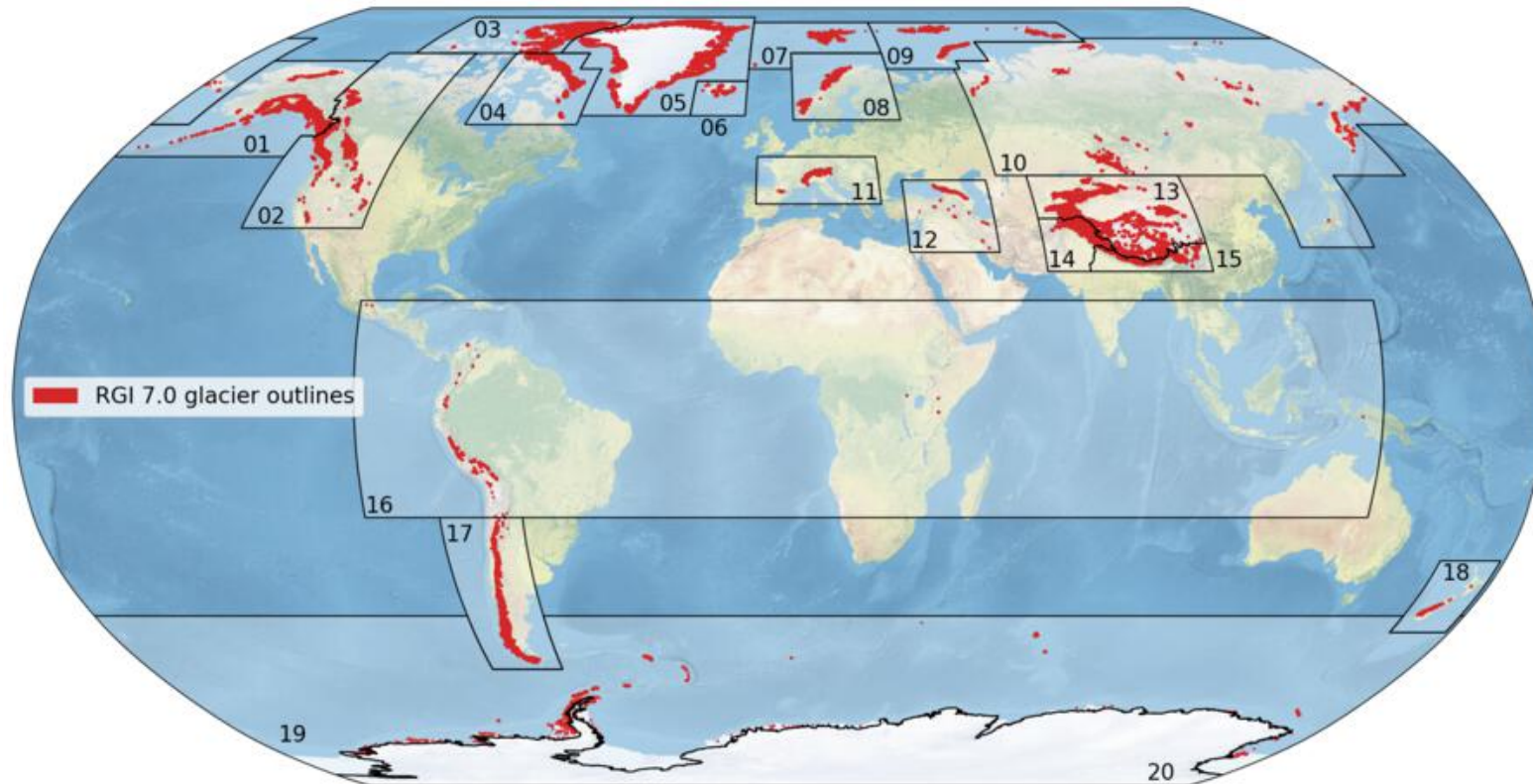


Vitesses d'écoulement des glaciers d'Alaska

© Romain Millan, Jean-Baptiste Barré / CNRS / IGE – données cartographiques : Mapbox / OpenStreetMap / Maxar

Glaciers de montagne et calottes polaires

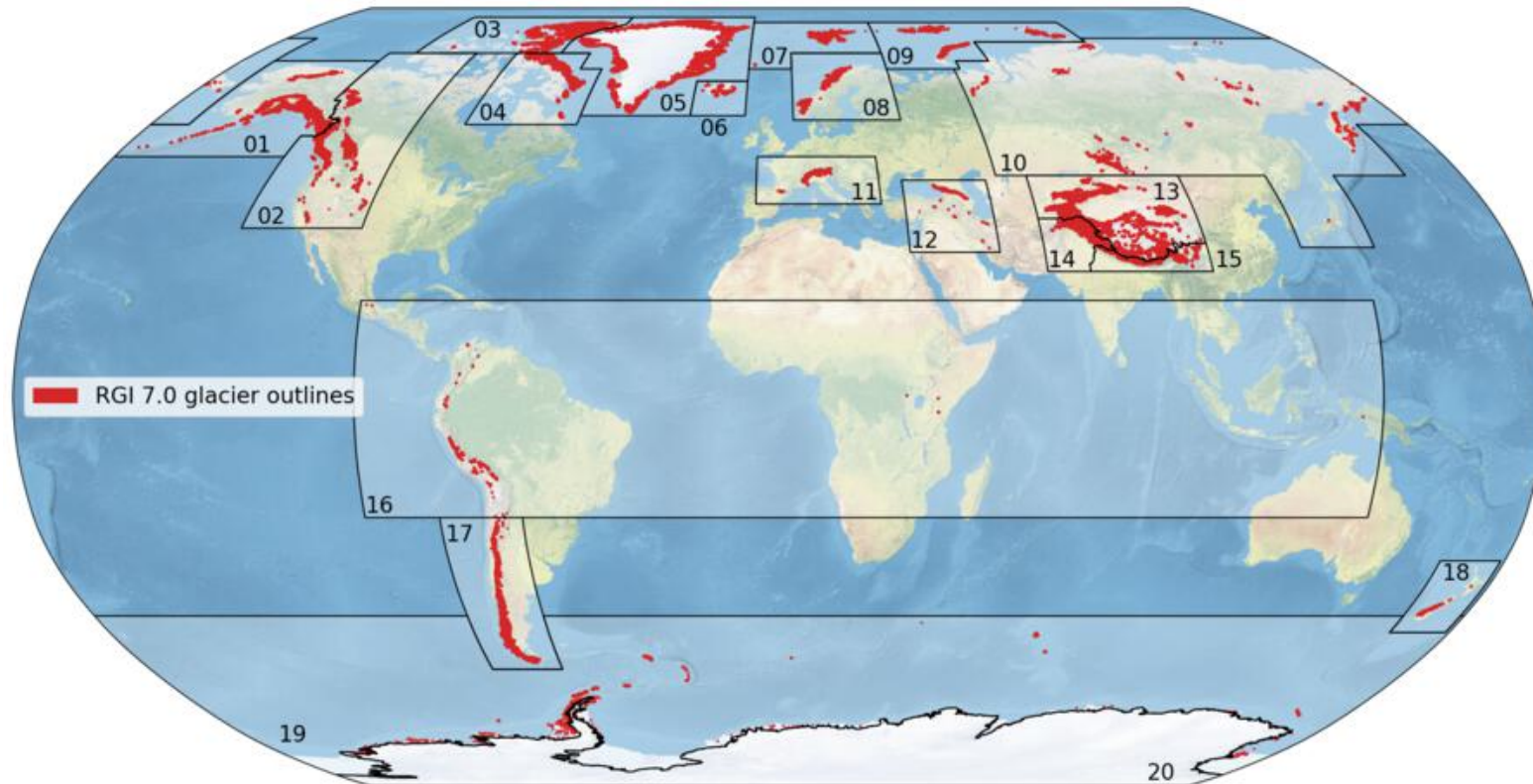
glaciers : masse de glace **pérenne** montrant une évidence d'**écoulement présent ou passé**



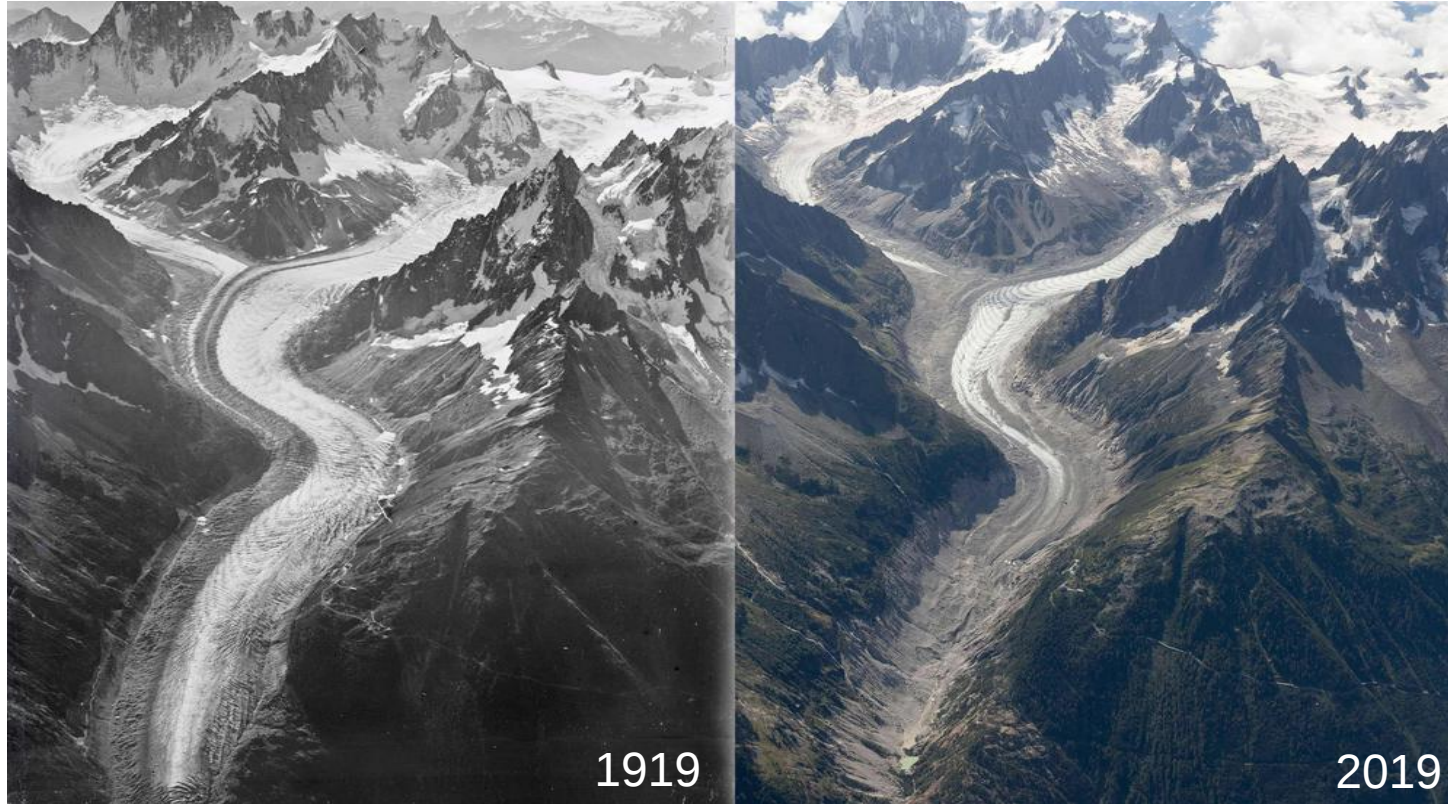
Glaciers de montagne et calottes polaires

Groenland & Antarctique, ~60-70 m SLR

Glaciers de montagne (~200,000) = ~700,000 km² , ~0,3 m SLR



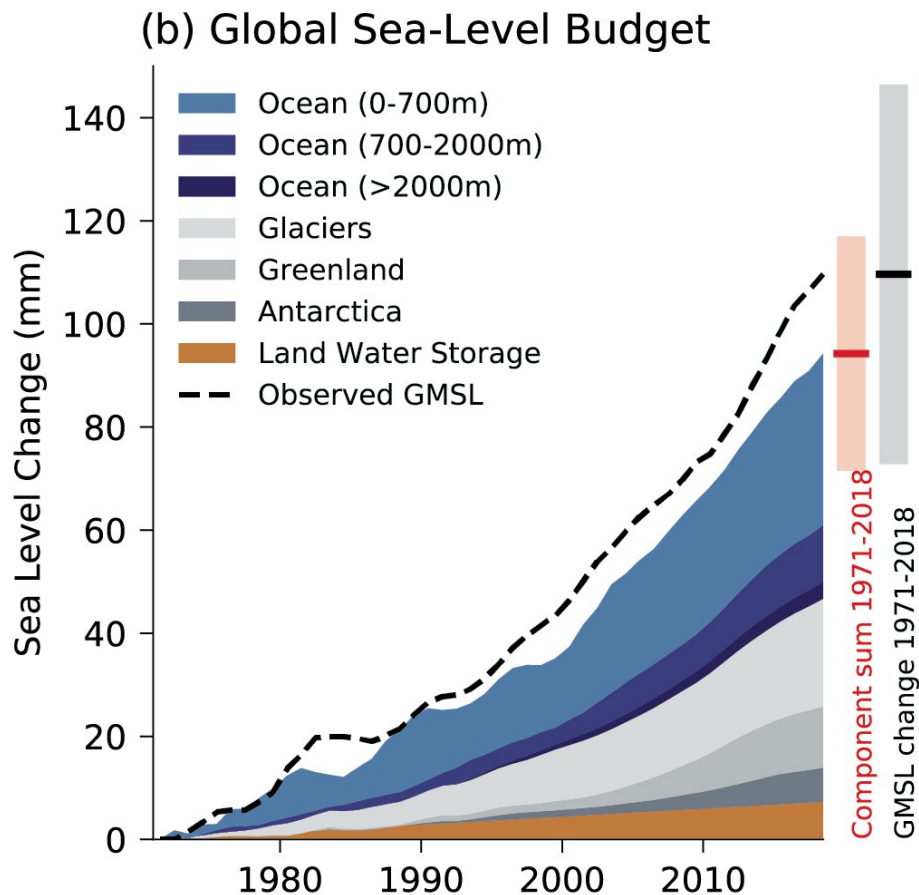
Glaciers : sentinel du climat



Mer de glace, Massif du Mont-Blanc



Montée du niveau des mers

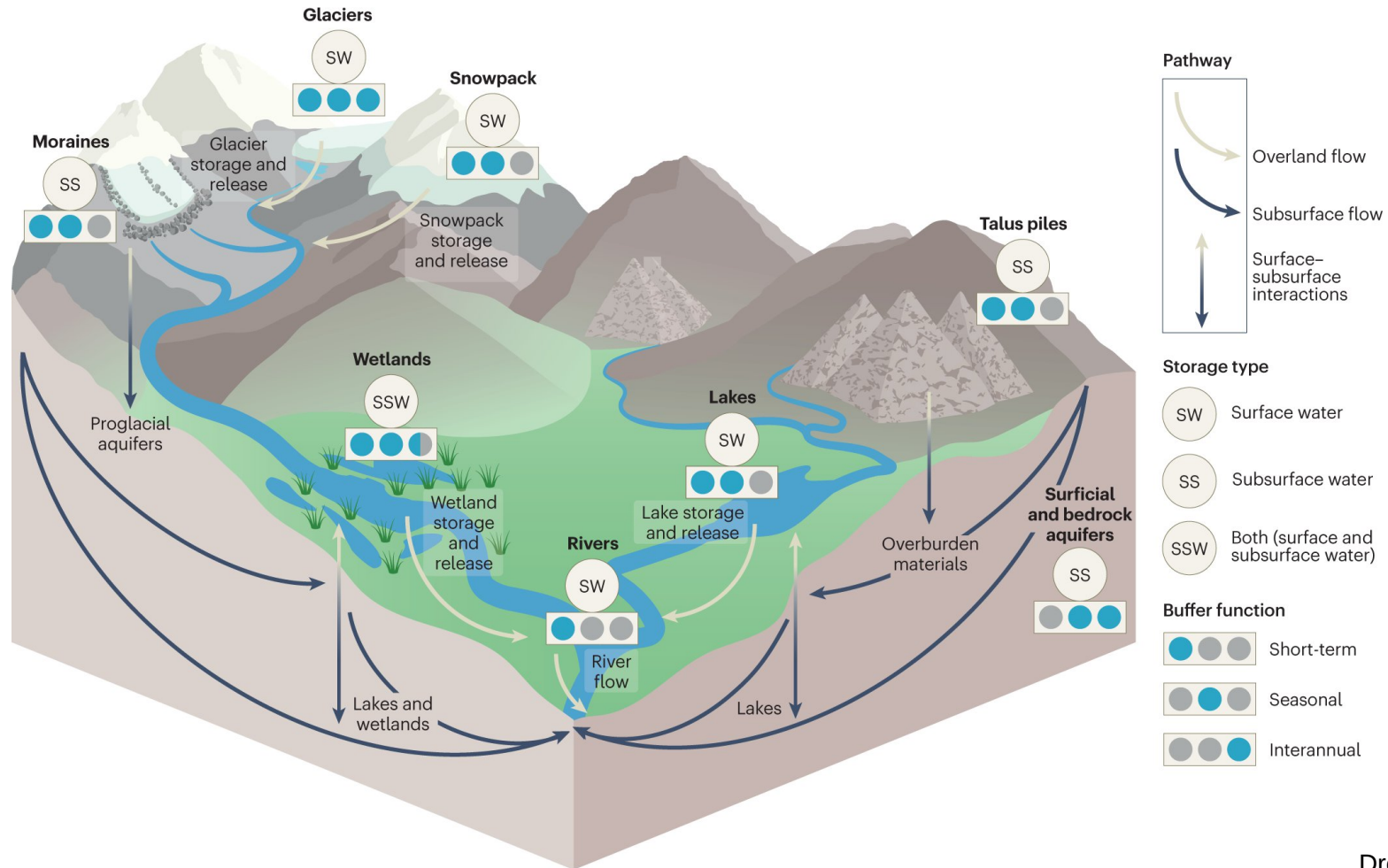


2000-2023: la **perte des glaciers de montagne** est **18% plus importante** que celle du **Groenland**, et plus 2 fois supérieure à celle de l'Antartique

The GlaMBIE Team, 2025

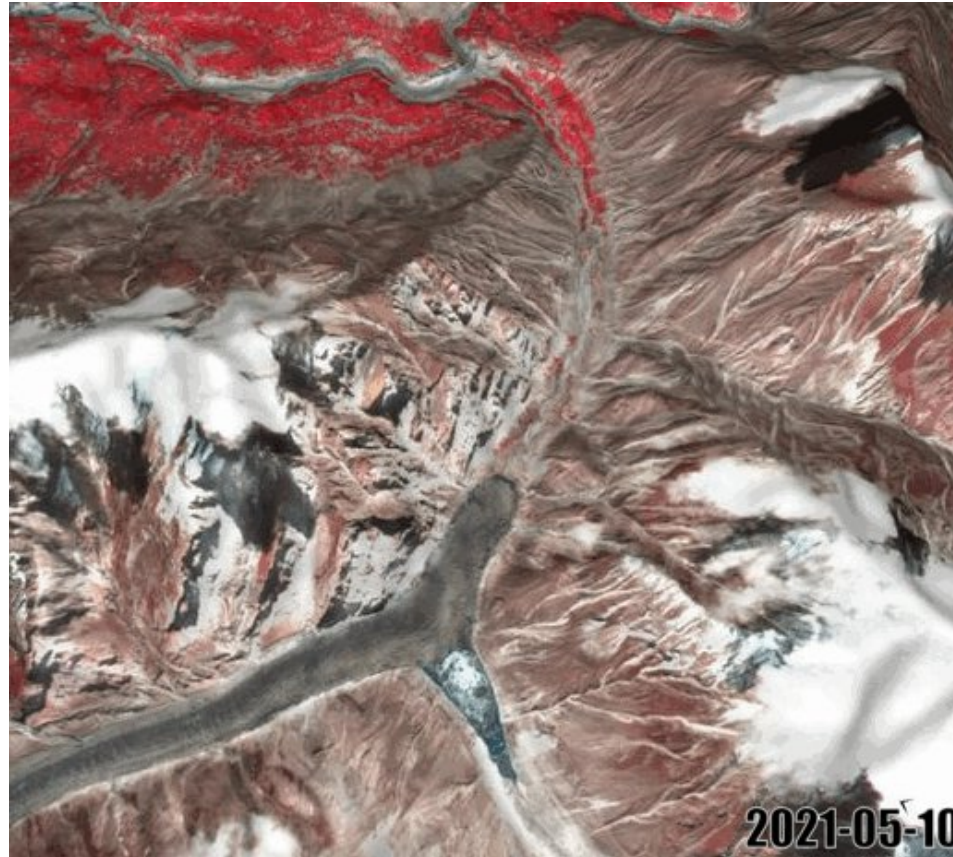


Ressources en eau





Risques naturels



Shispar glacier, Asia



Risques naturels

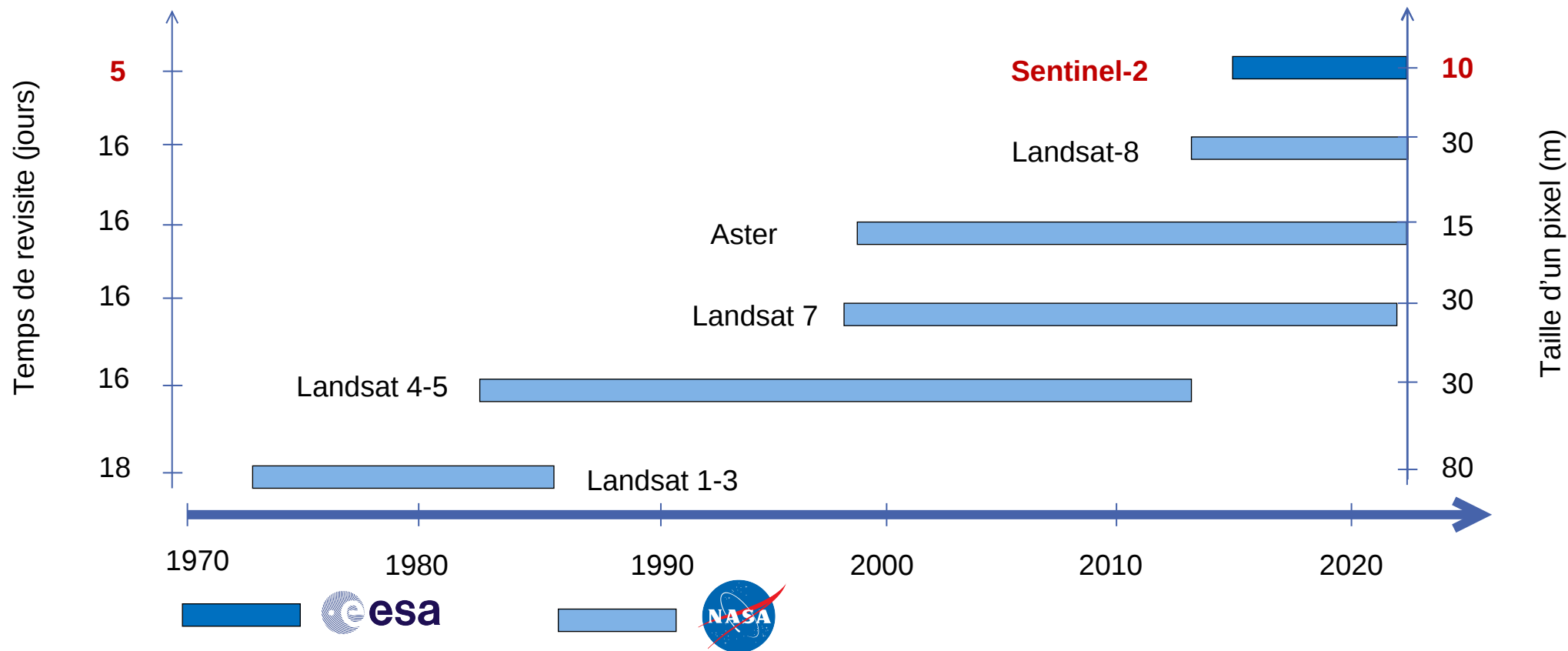
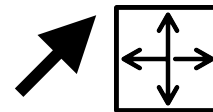
**Glacier Lake
Outburst Flood
(GLOF)**



Shispar glacier, Asia



Satellites optiques public utilisés pour l'étude des glaciers



Sentinel-2 images

Baltoro Glacier
High Mountain Asia



Sentinel-2 images

Baltoro Glacier
High Mountain Asia



Sentinel-2 images

Baltoro Glacier
High Mountain Asia



Sentinel-2 images

Baltoro Glacier
High Mountain Asia



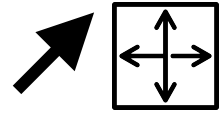
Données Sentinel-2 pour suivre l'évolution des glaciers

- Exemple 1: Inventaires
- Exemple 2 : Altitude de la ligne d'équilibre
- Exemple 3 : Vitesse d'écoulement de surface

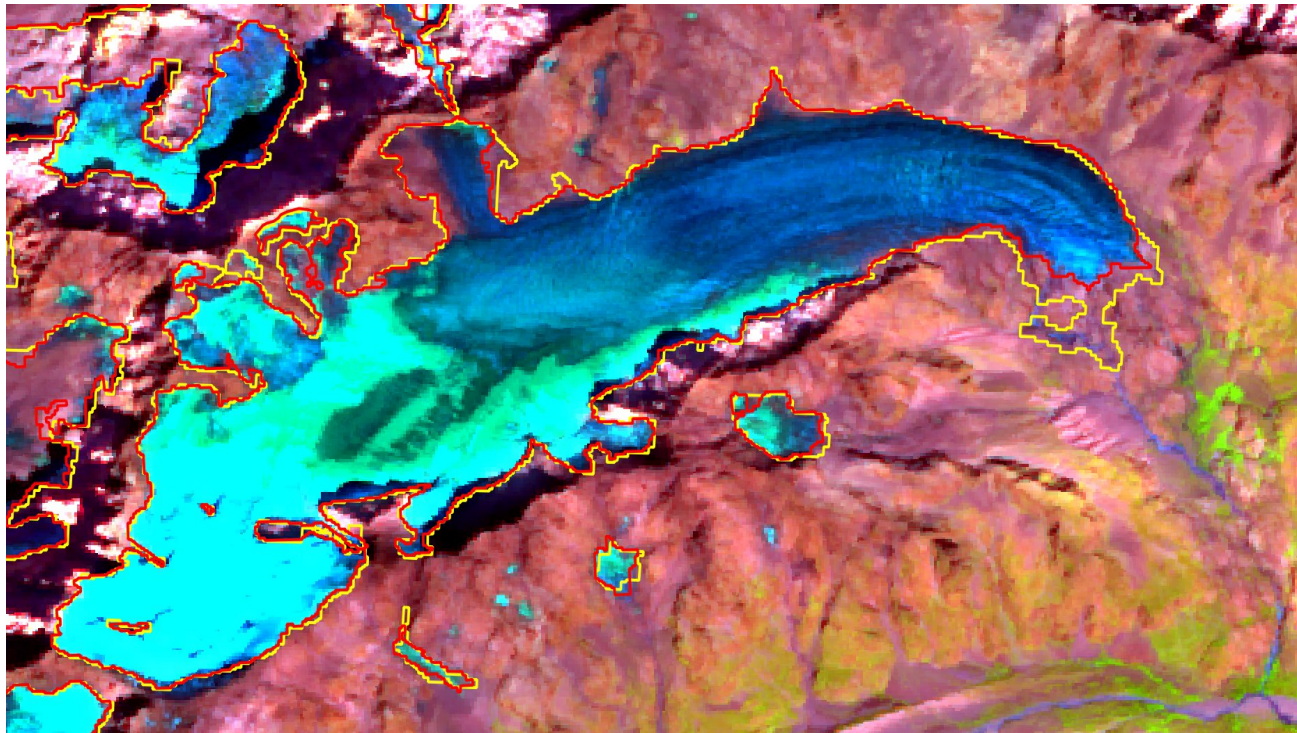
Etat des lieux des inventaires

- **1967-1971**, M. Gardent (PhD 2014, Univ. Savoie, EDyTEM). **Cartes IGN au 1/25000.**
- **1985-86**, A. Rabatel (UGA-OSUG, IGE). Images satellitaires **LANDSAT-5.**
- **2003**, A. Rabatel (UGA-OSUG, IGE), J.-P. Dedieu (CNRS, IGE), A. Charron (étudiant, Univ. Sherbrooke, Canada). Images satellitaires **LANDSAT-5 et -7.**
- **2006-2009**, M. Gardent (PhD 2014, Univ. Savoie, EDyTEM). **Photographies aériennes IGN.**
- **2015**, A. Rabatel (UGA-OSUG, IGE) et M. Ramusovic (étudiante, UGA). Images satellitaires **Sentinel-2.**
- **2022**, A. Rabatel (UGA-OSUG, IGE) et X. Klee (étudiant, UGA). Images satellitaires **Sentinel-2.**

Exemple du Glacier Blanc (massif des Ecrins)

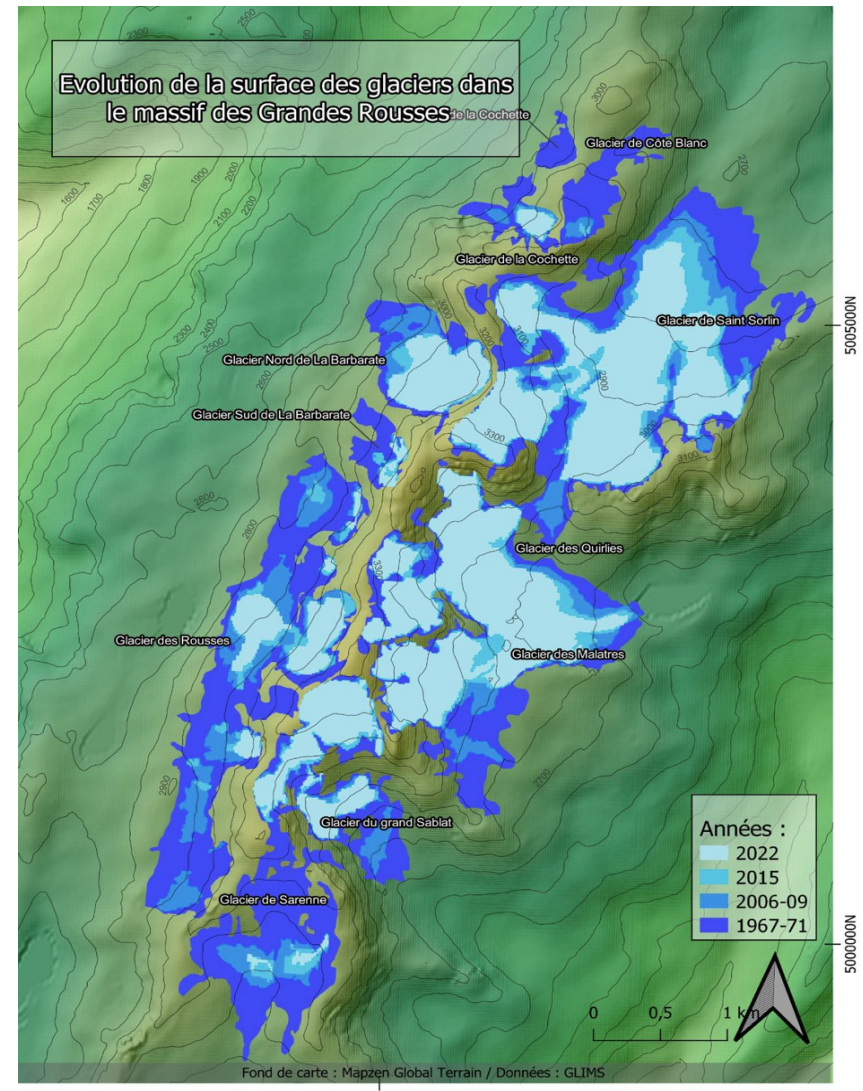
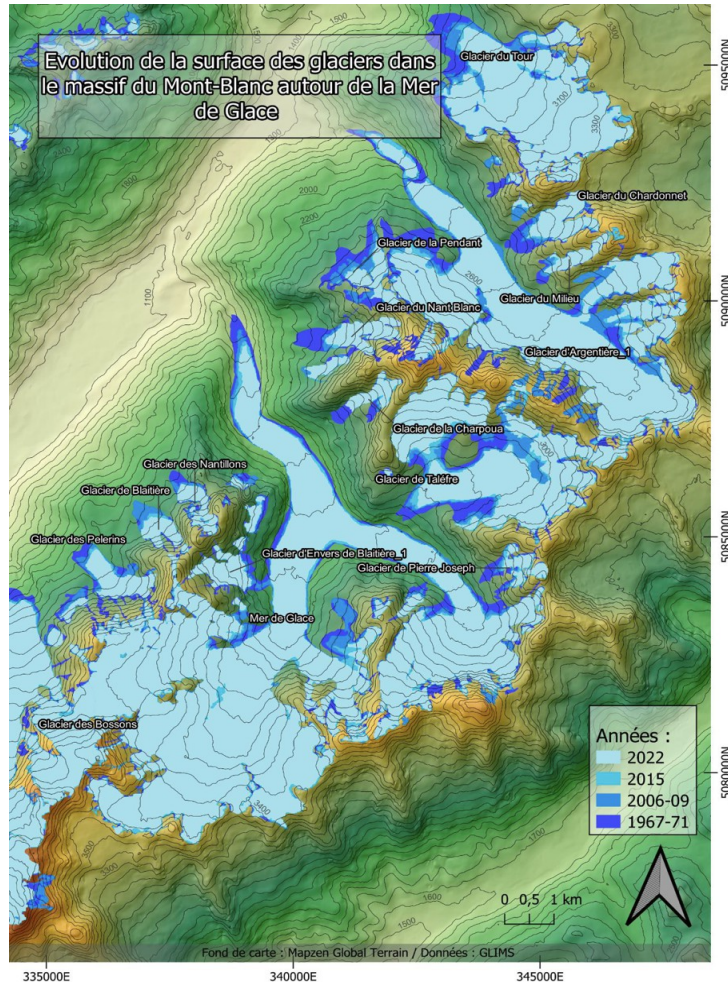


Combinaison de bandes spectrale de l'infra-rouge et du visible.

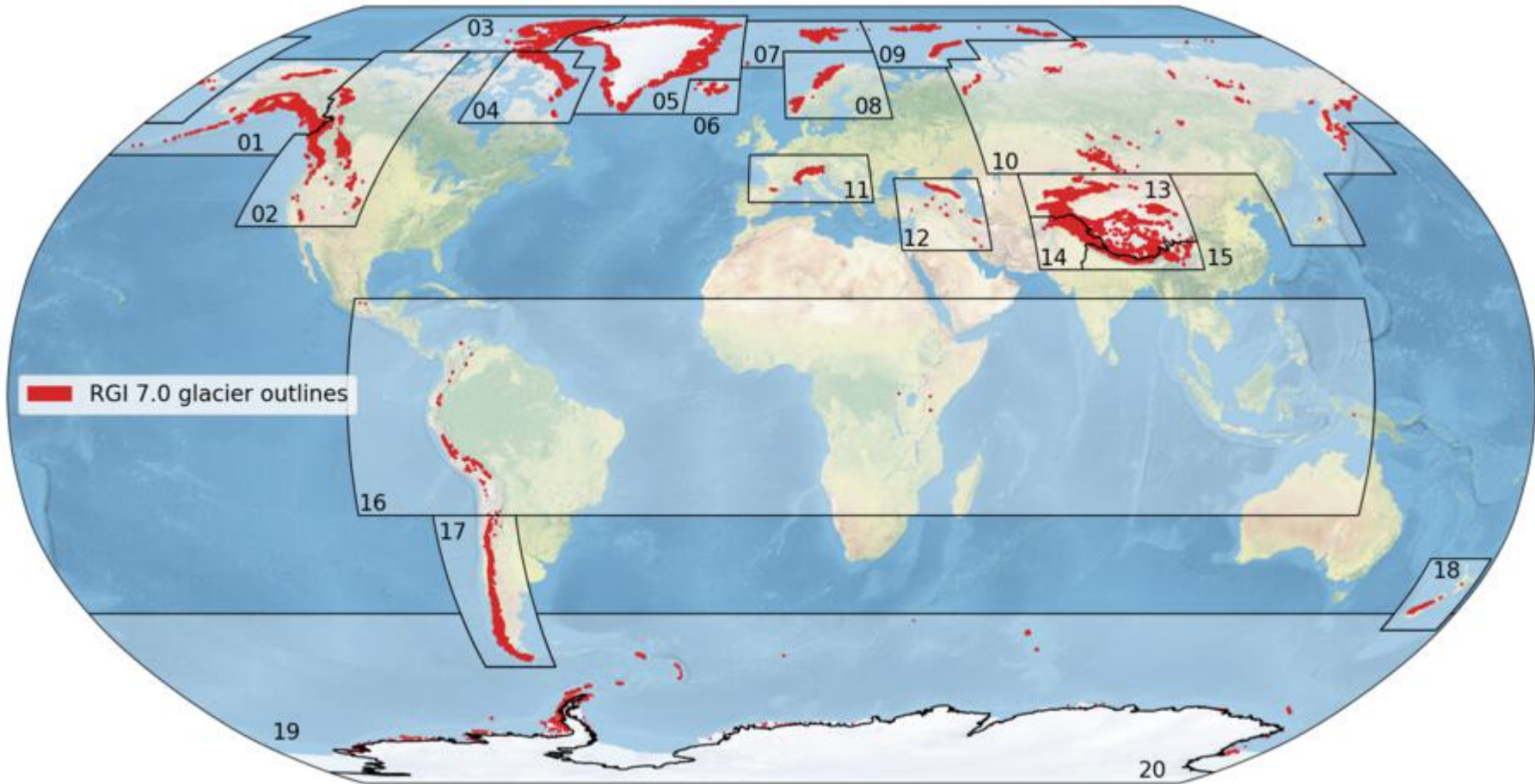


— contour de 2015
— contour de 2022

Evolution entre 1970 et 2022

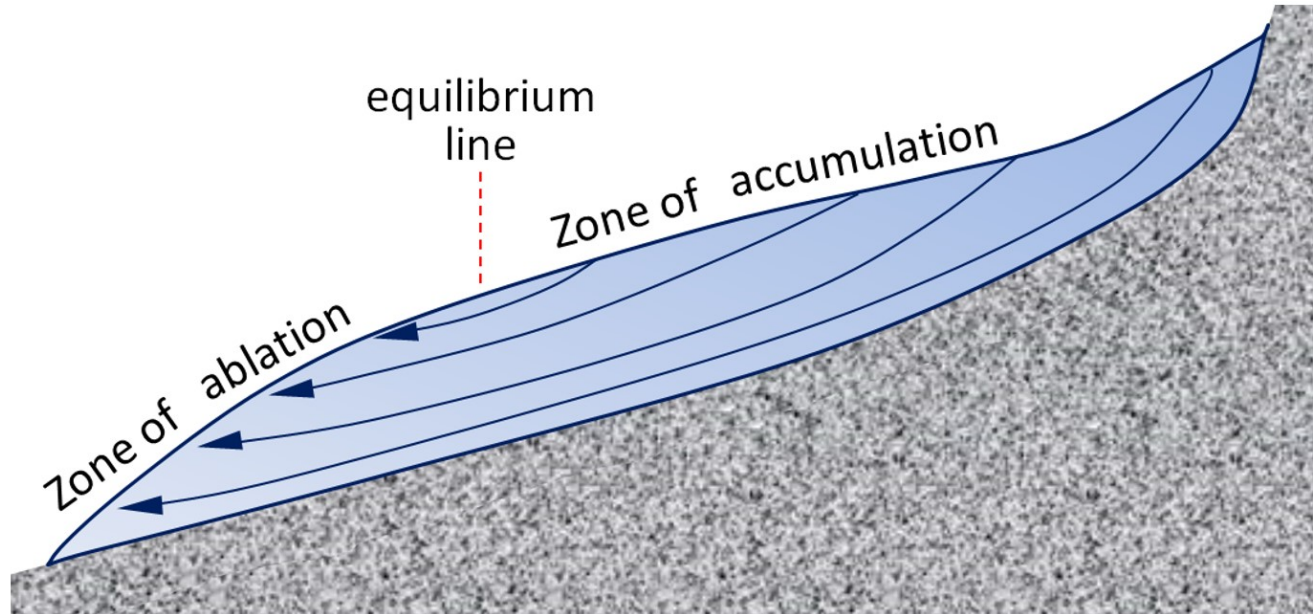


Randopli Glacier Inventory (échelle mondiale)



Ligne d'équilibre

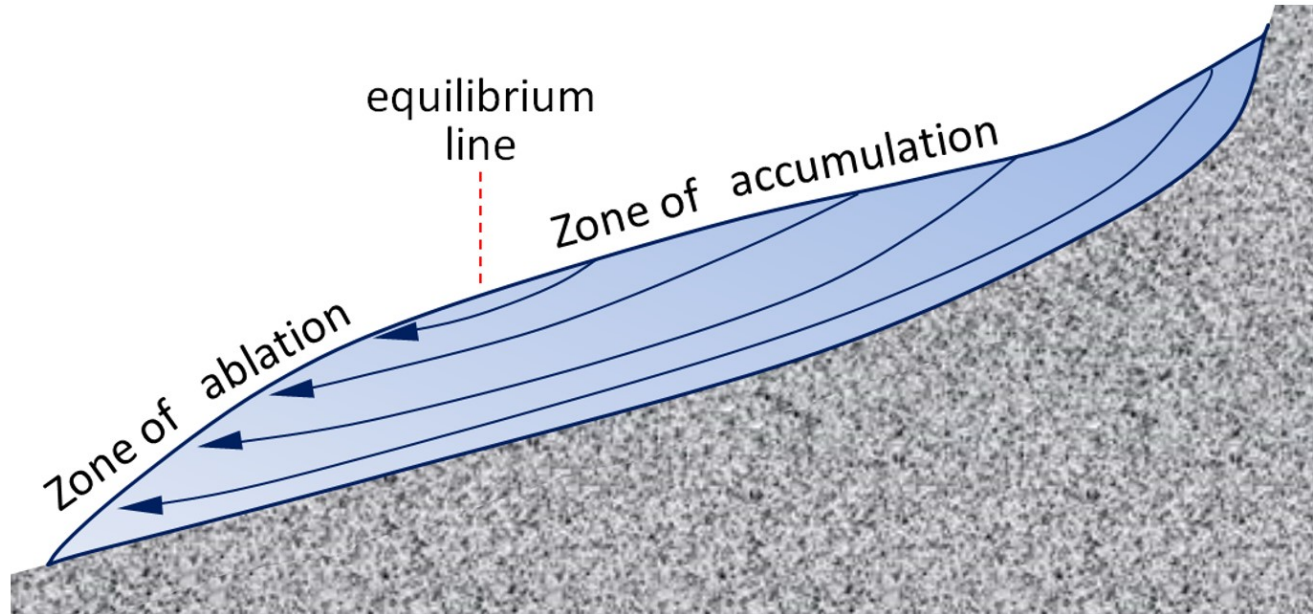
Transition entre une zone où le glacier gagne de la masse (**zone d'accumulation**) et une zone où il en perd (**zone d'ablation**)



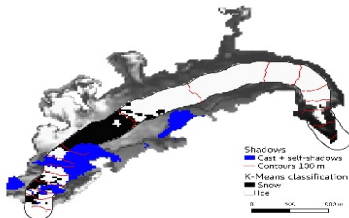
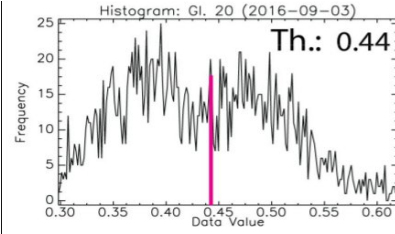
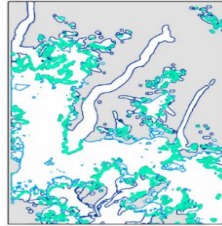
Ligne d'équilibre

Transition entre une zone où le glacier gagne de la masse (**zone d'accumulation**) et une zone où il en perd (**zone d'ablation**)

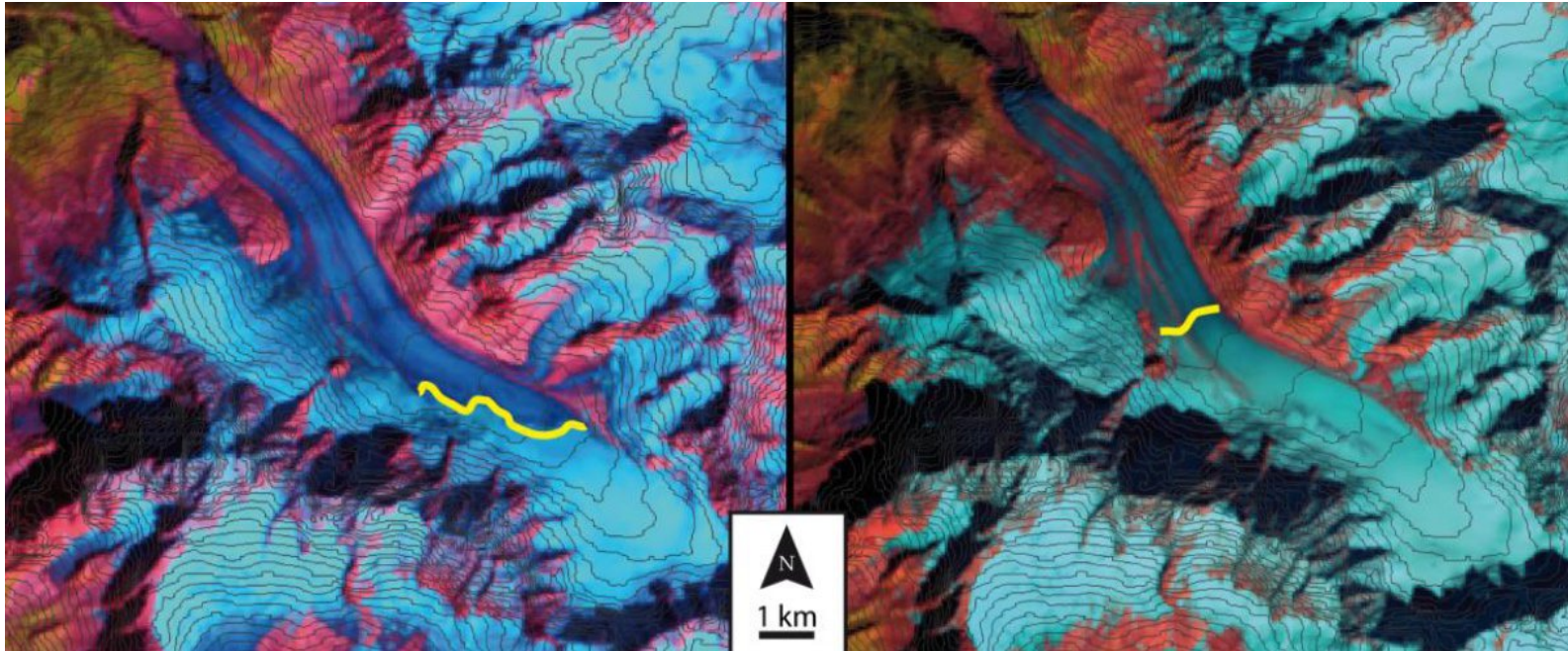
Mesurée à la fin de la saison hydrologique



Méthodes de délimitation automatique

	Davaze et al., 2020	Rastner et al., 2019	Racoviteanu et al., 2019
Illustration			
Méthode	Gradient	Histogramme	Partitionnement des différentes surfaces
Capteurs	Landsat 4-5-7-8 Sentinel 2A-2B ASTER	Landsat 4-5-7-8	Landsat 7-8
Traitements utilisés	Nuages, topographiques, ratio de bandes, classifications, post-traitement statistique et interpolation	Réflectance, nuages, topographiques, classification, post-traitement statistique	Nuages, ombres, ratio de bande, classification supervisée, post-traitement manuel
Limites	Filtrage manuel des images d'entrée. Nuages, topographie complexe	Pas d'application régionale, nuages, topographie complexe, peu de capteurs	Seuils et post-traitement manuel. Peu de capteurs, nuages, topographie complexe

Exemple du glacier d'Argentière



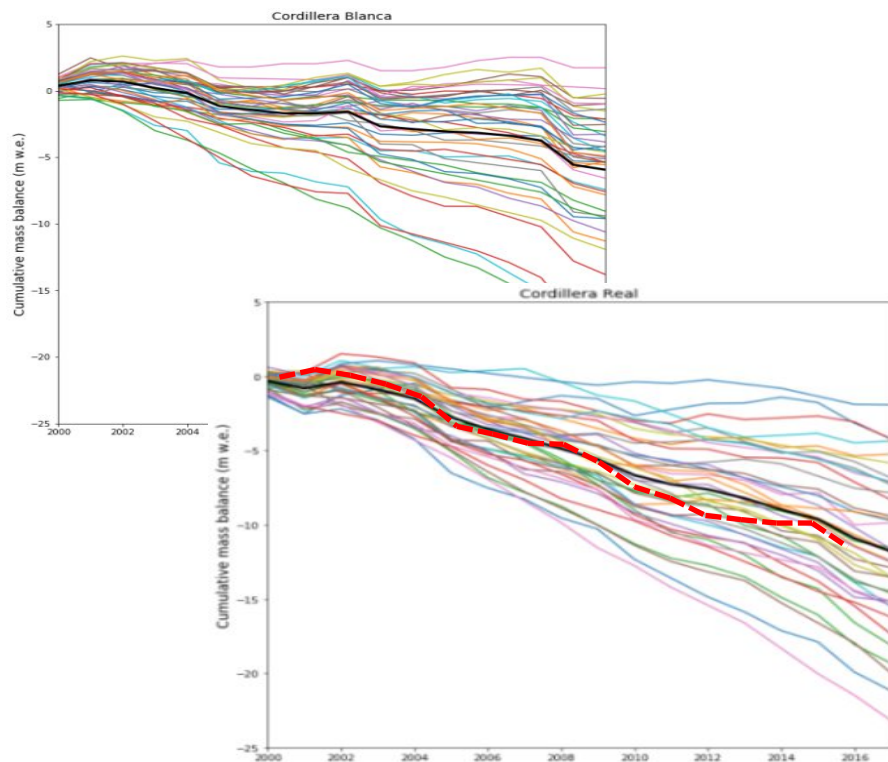
Glacier d'Argentière (French Alps)

Rabatel et al., 2016

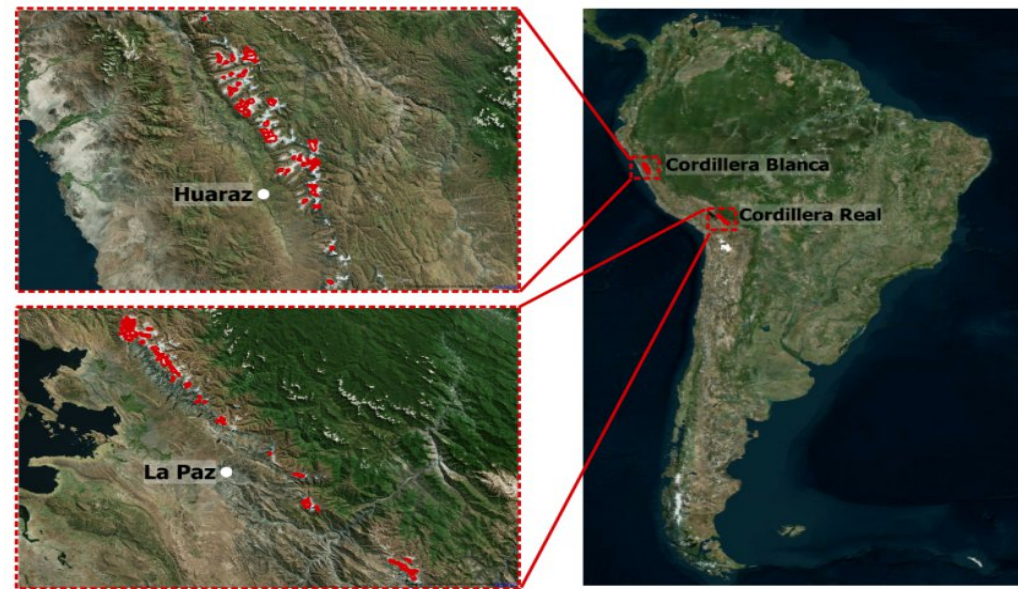
Reconstruction les bilans de masse de surface

Reconstruction of annual mass balance time series [2000-2017]

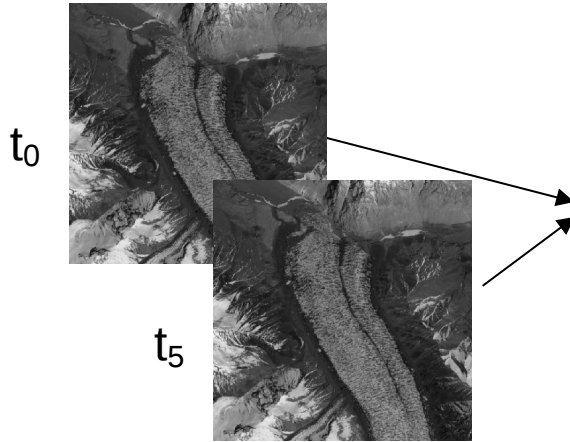
82 glaciers (Peruvian & Bolivian Andes)



Only 4 glaciers have *in situ* measurements over this period



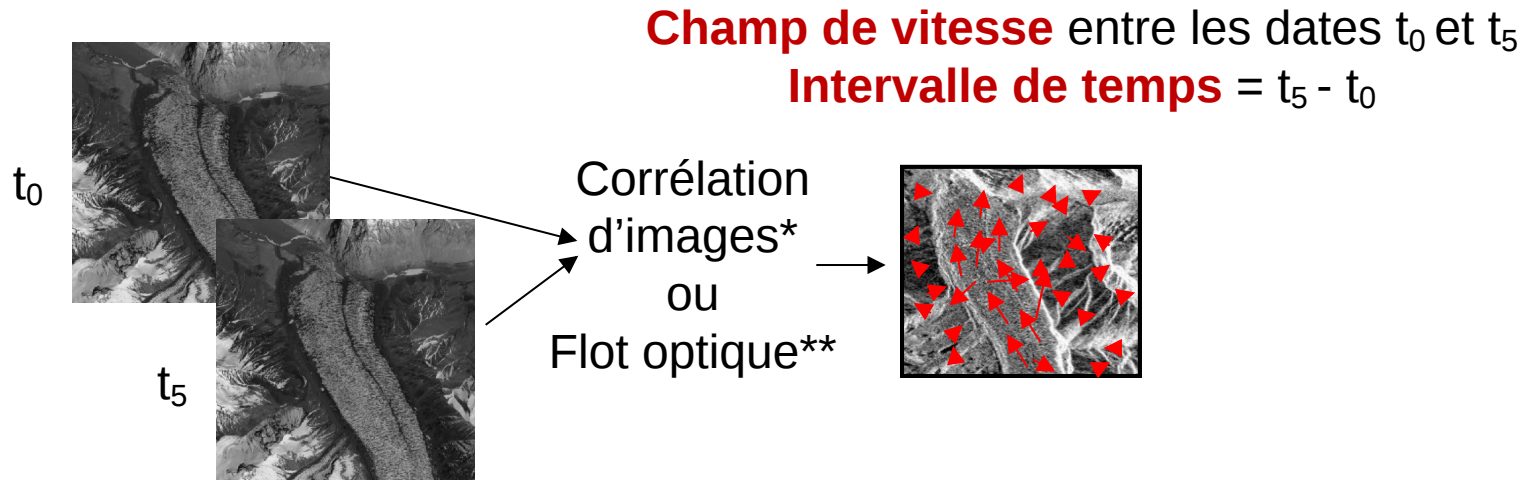
Internship of Léna Gurriaran (ENS – Ulm, 2018-19)

Estimation

**(Dehecq et al., 2015; Gardner et al., 2018; Millan et al., 2019; Friedl et al., 2021; Provost et al., 2022...)*

*** (Brigot et al., 2016; Charrier et al., 2020)*

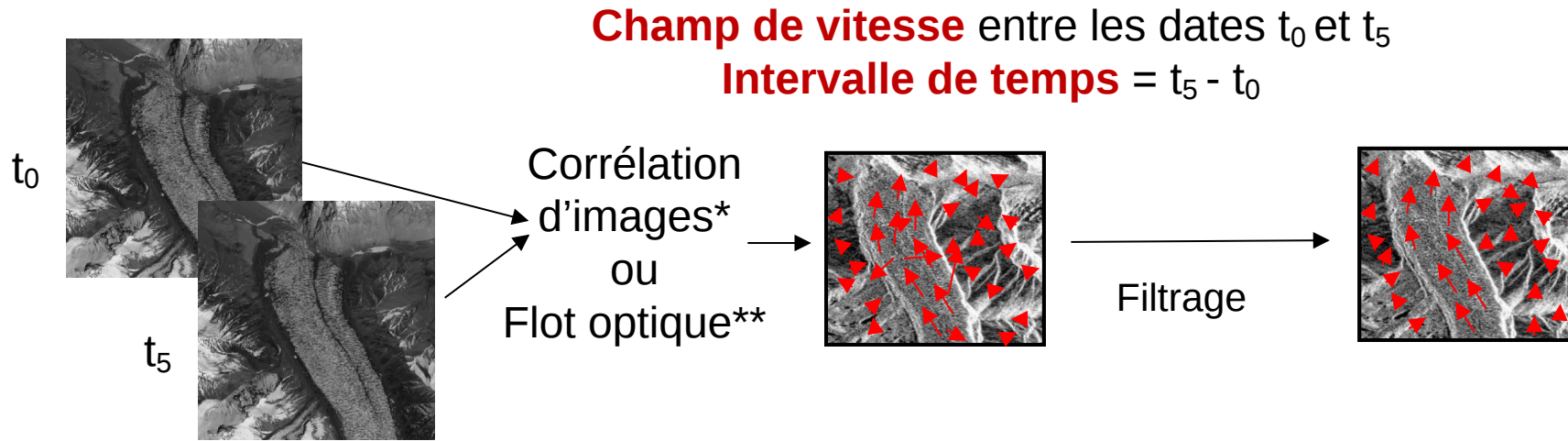
Estimation



*(Dehecq et al., 2015; Gardner et al., 2018; Millan et al., 2019; Friedl et al., 2021; Provost et al., 2022...)

** (Brigot et al., 2016; Charrier et al., 2020)

Estimation



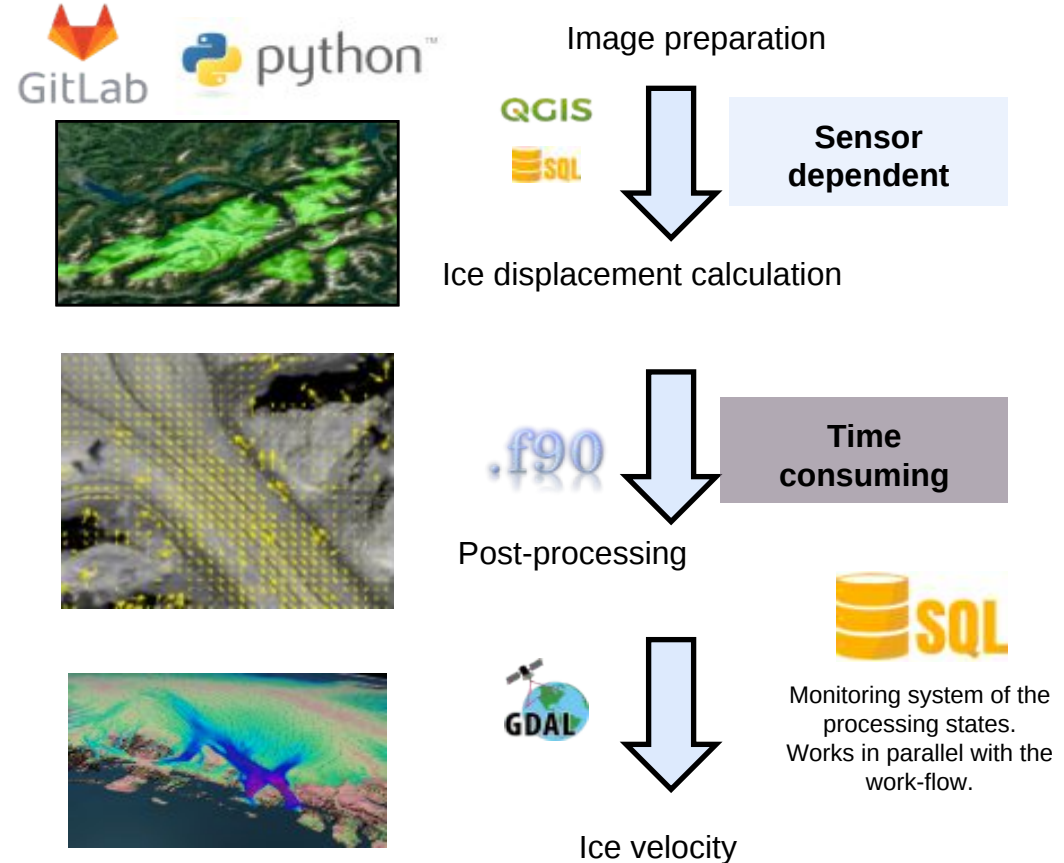
*(Dehecq et al., 2015; Gardner et al., 2018; Millan et al., 2019; Friedl et al., 2021; Provost et al., 2022...)

** (Brigot et al., 2016; Charrier et al., 2020)

Estimation de vitesse d'écoulement de surface

Chaîne de traitement développée à l'IGE-Grenoble.

Données : photographies aériennes, Pléiades, Sentinel-1/2, Landsat-1-8, Venµs



Produits disponibles à l'échelle globale

ITS_LIVE
a NASA MEaSUREs project

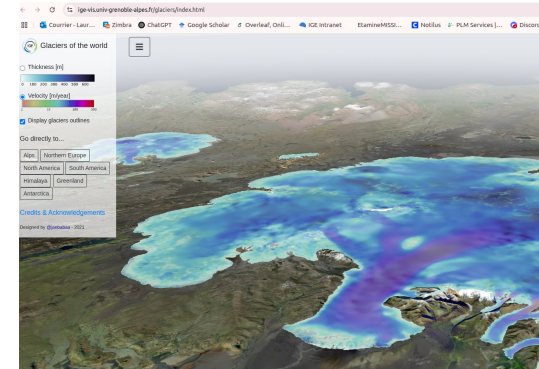


- Champ de vitesse annuel à 120 m

Limitations:

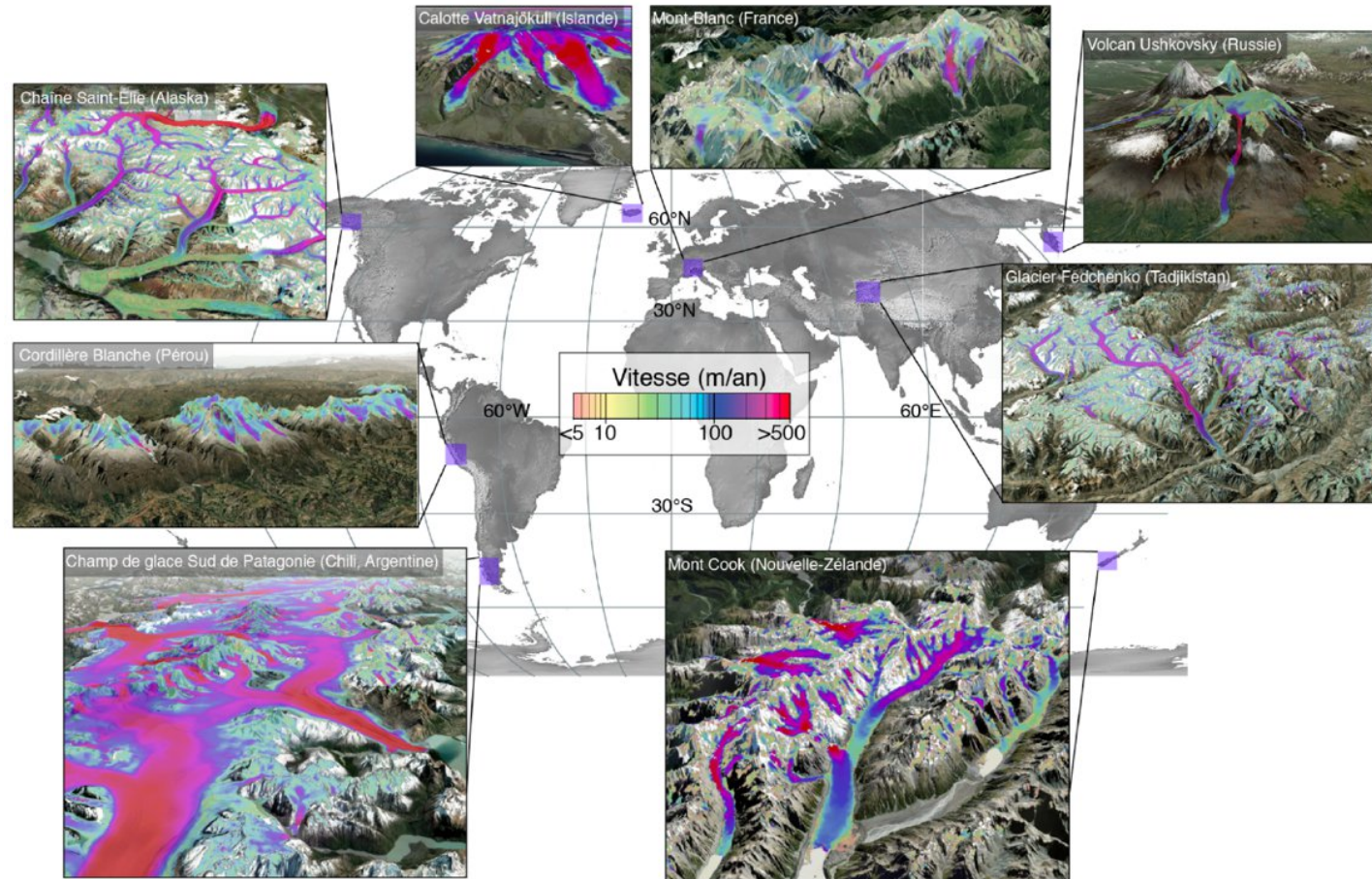
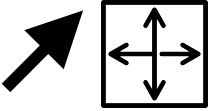
- Résolution spatiale (240 m interpolé à 120 m)
- Couverture spatiale incomplète
- Politique Trump

- Champs de vitesse annuel à 50 m
- 2017-2018 : échelle globale (Millan et al., 2022)
- 2016-2023 ou 2024
 - Alpes (Rabatel et al., 2023)
 - Andes tropicales (Ducasse et al., 2025)

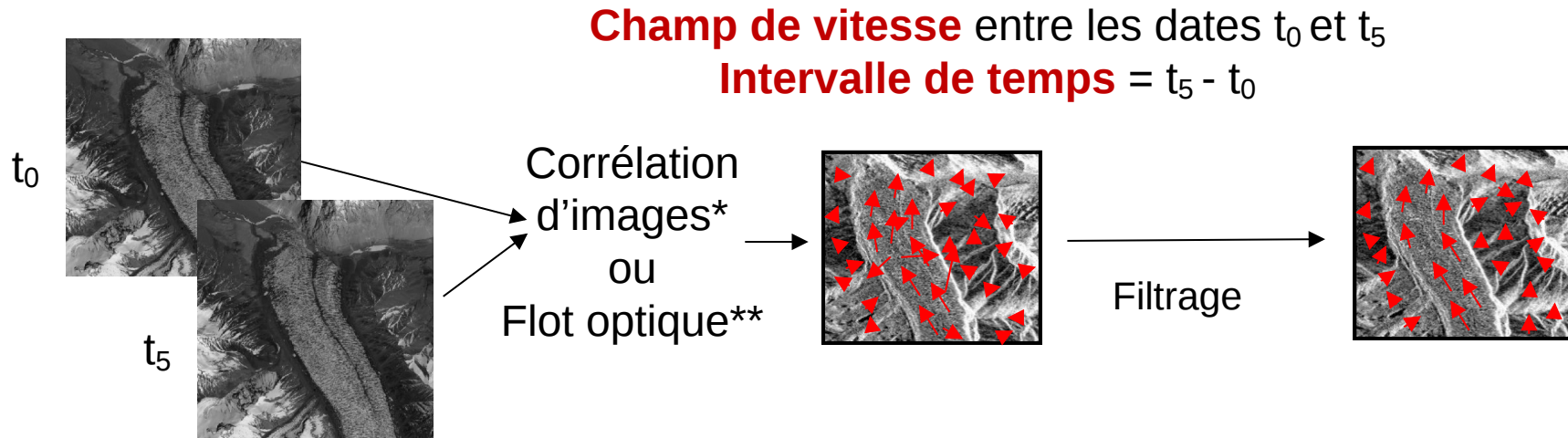


THEIA
CES glacier

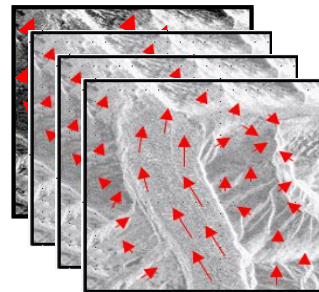
Champ de vitesse annuel à échelle mondiale



Estimation

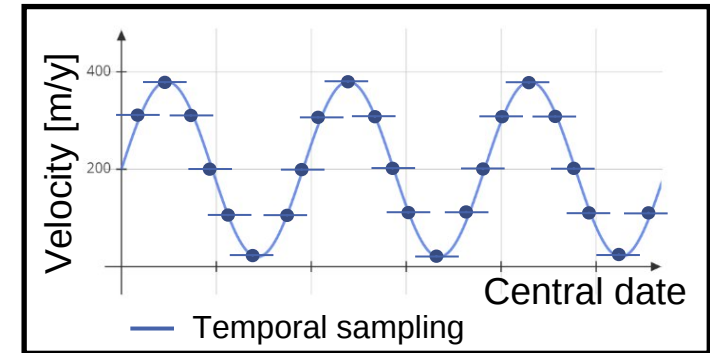


Fusion



Fermeture
temporelle ***

Séries temporelles

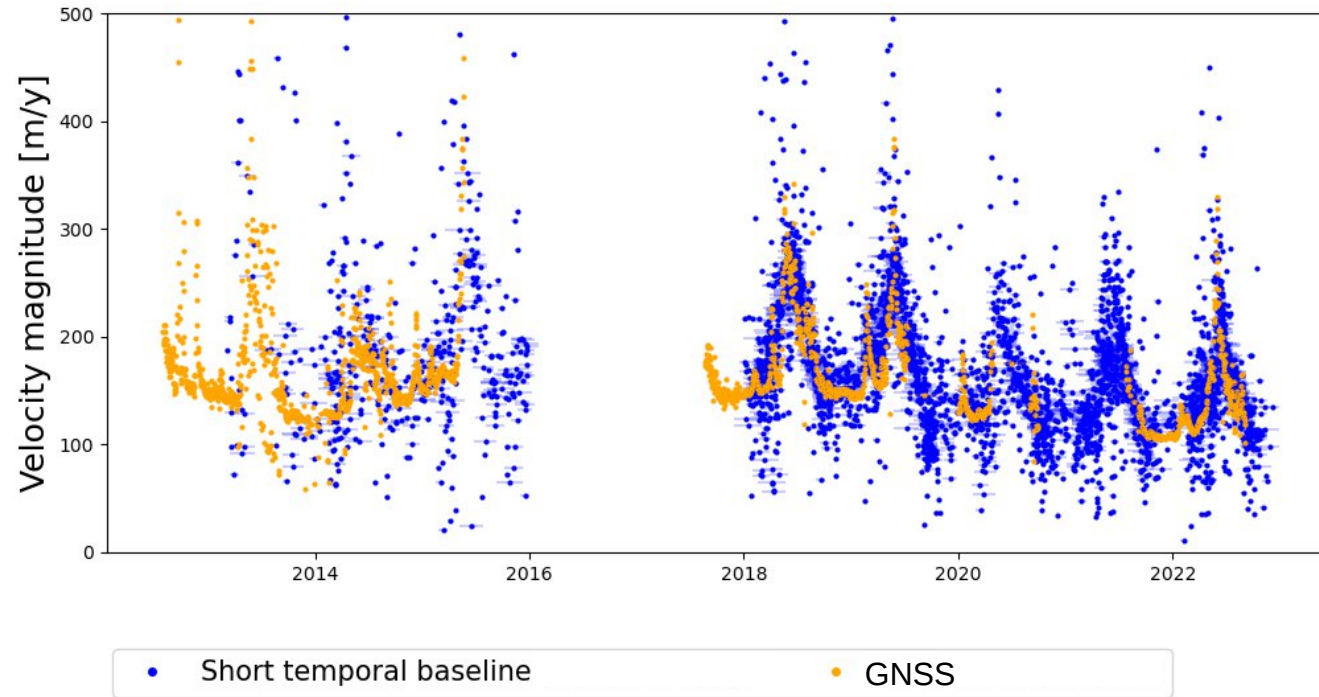


*(Dehecq et al., 2015; Gardner et al., 2018; Millan et al., 2019; Friedl et al., 2021; Provost et al., 2022...)

** (Brigot et al., 2016; Charrier et al., 2020)

*** (Bontemps et al., 2018; Altena et al., 2019; Charrier et al., 2022, 2024)

Fusion de données

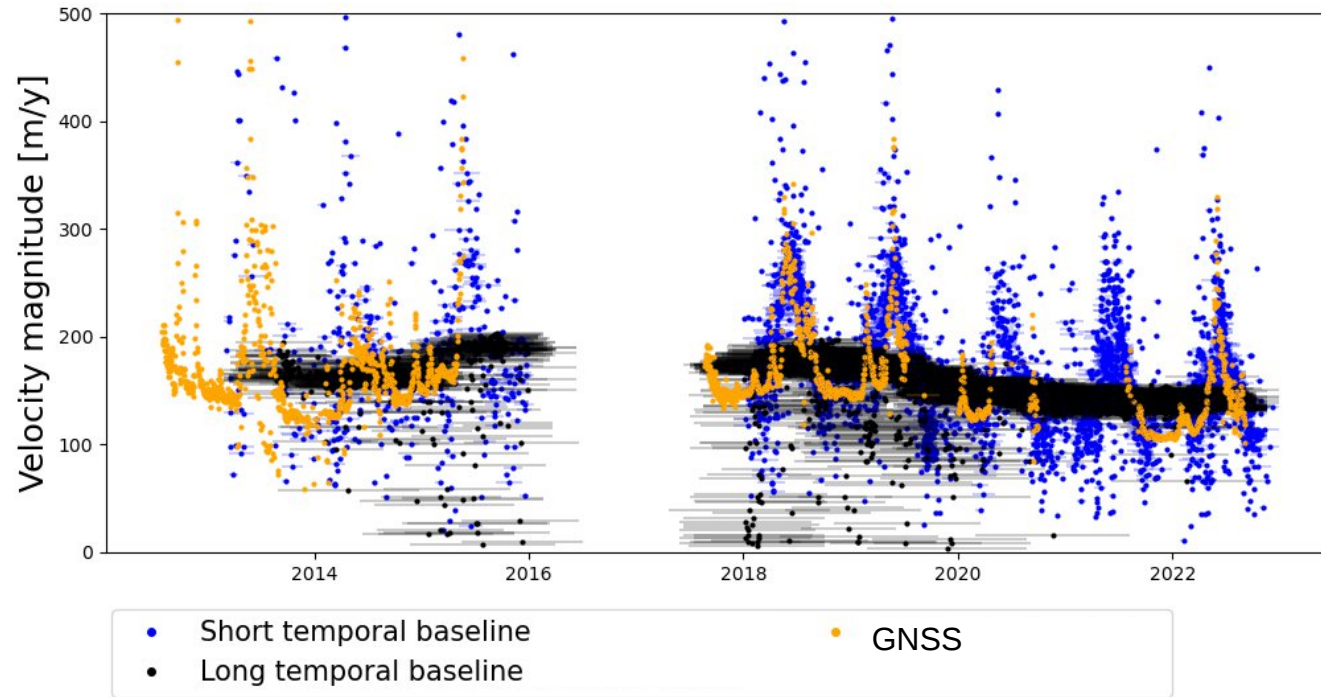


Intervalle de temps courts (<100 j)

- proche de la vitesse instantanée
- erreurs aléatoires importantes

Kaskawulsh glacier, Yukon, Canada

Fusion de données



Intervalle de temps courts (<100 j)

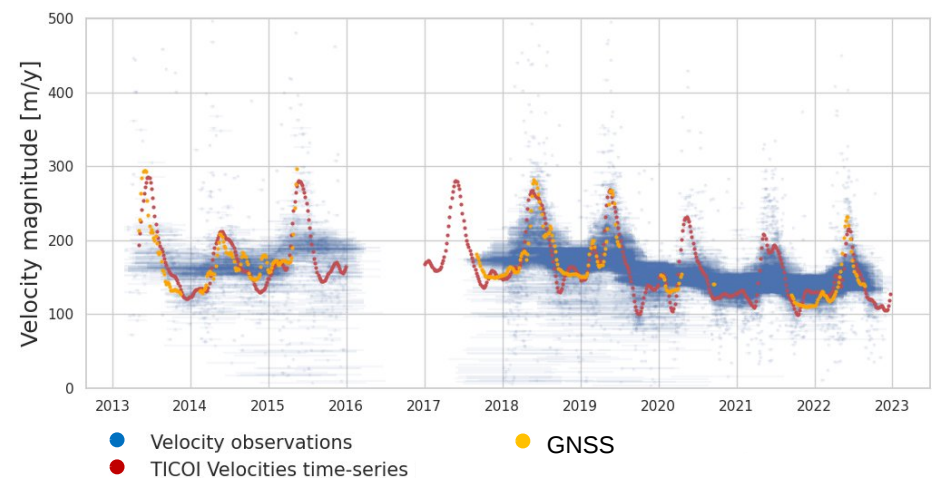
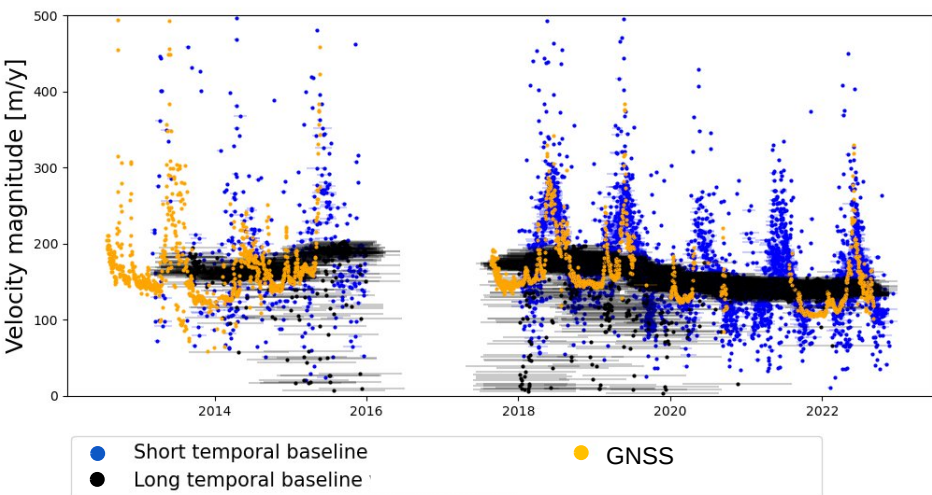
- proche de la vitesse instantanée
- erreurs aléatoires importantes

Intervalle de temps longs (300-400 j)

- moyenne annuelle du signal
- erreurs systematiques

Kaskawulsh glacier, Yukon, Canada

Fusion de données, extraction des séries temporelles mensuelles



ITS_LIVE
a NASA MEaSUREs project



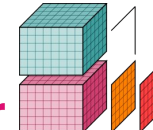
Any in-house
velocity products

**Temporal Inversion
using a Combination
of Observations and
Interpolation (TICOI)**



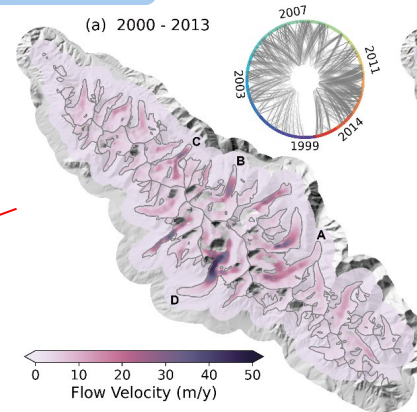
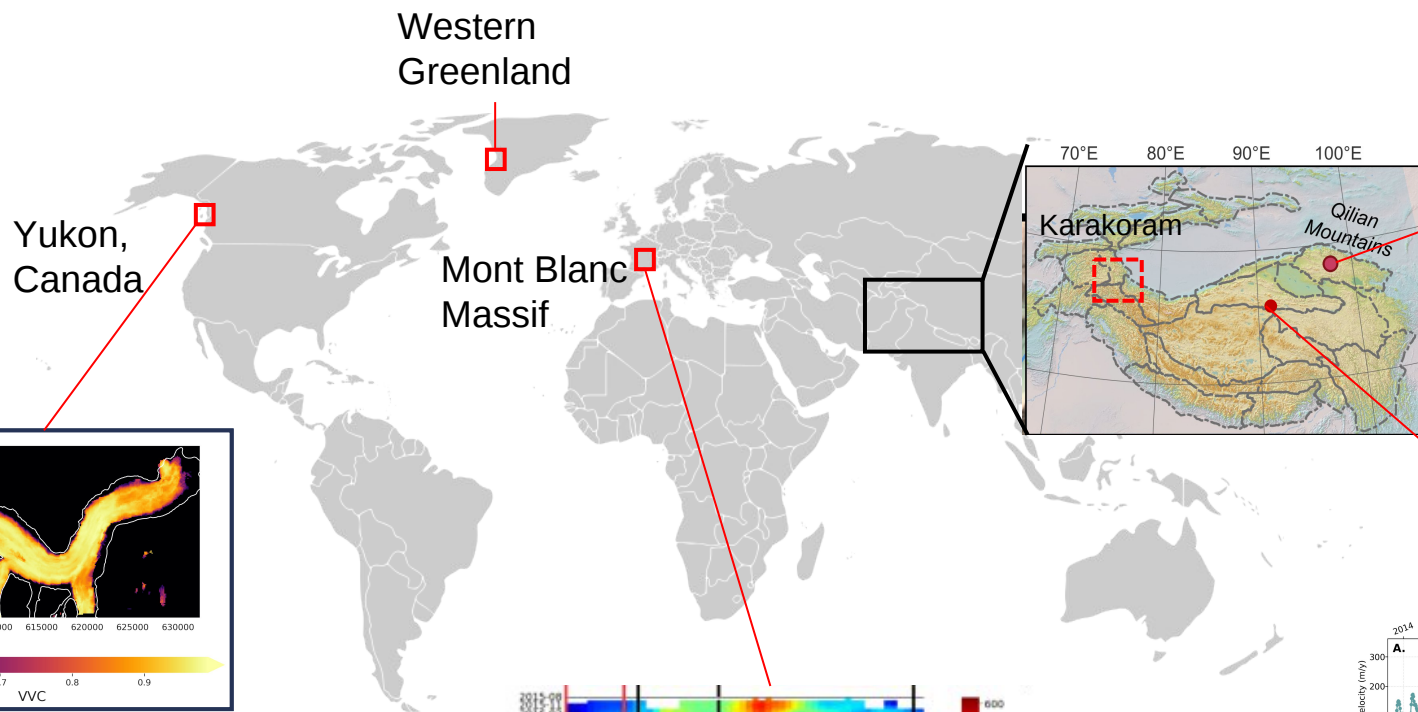
dask

Zarr

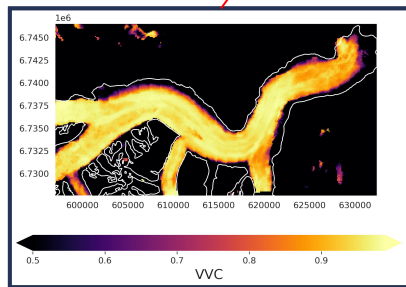


xarray

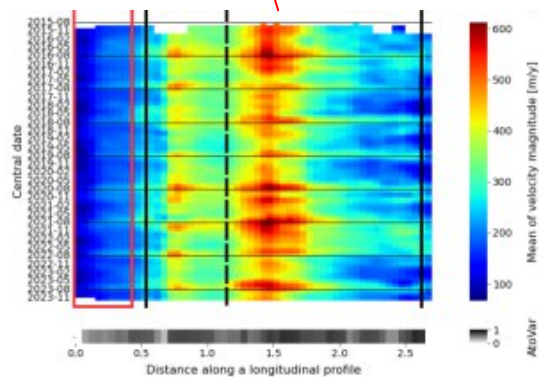




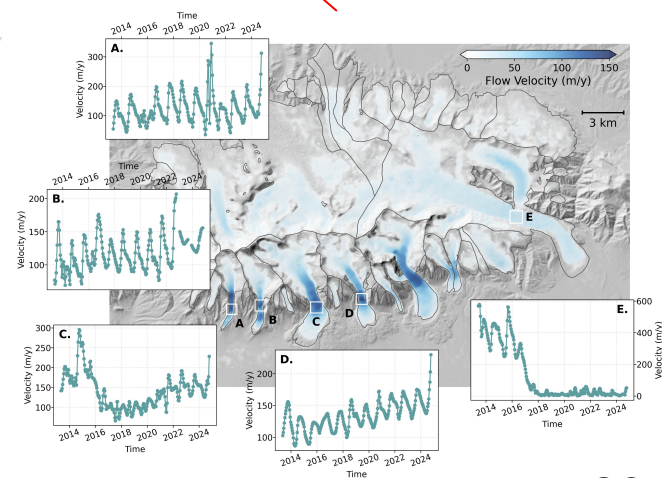
Guo et al (in review)



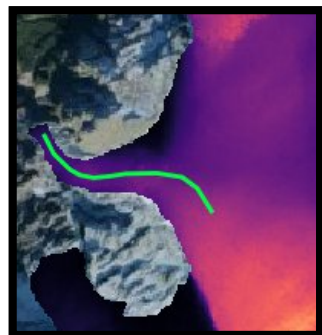
Charrier et al. 2025



Charrier et al (in prep)

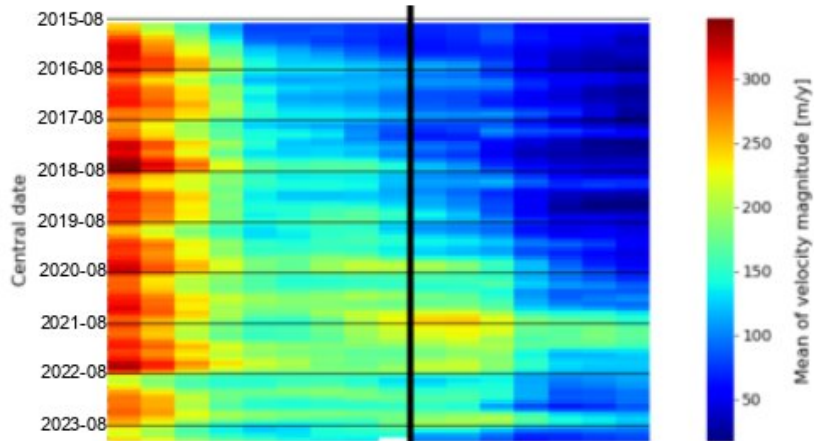


Guo et al (in prep)



Instabilités glaciaires, e. g.
glaciers surge

Mini-surge du glacier des Bossons

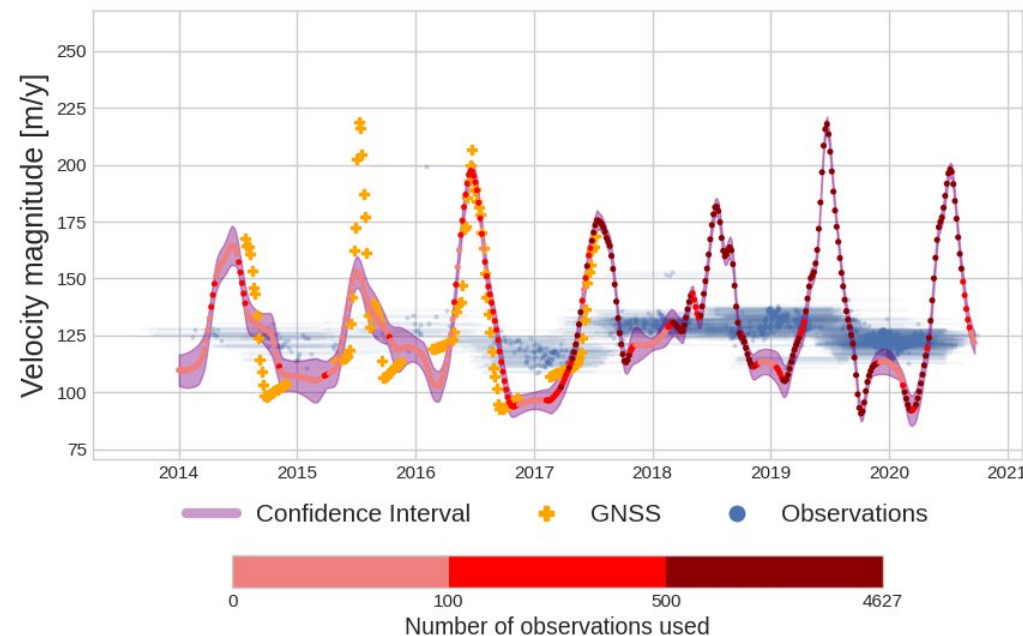


Distance along a longitudinal profile

PFE Nathan Lioret

-> validation de théorie de surge
thèse de Luc Béraud, IGE

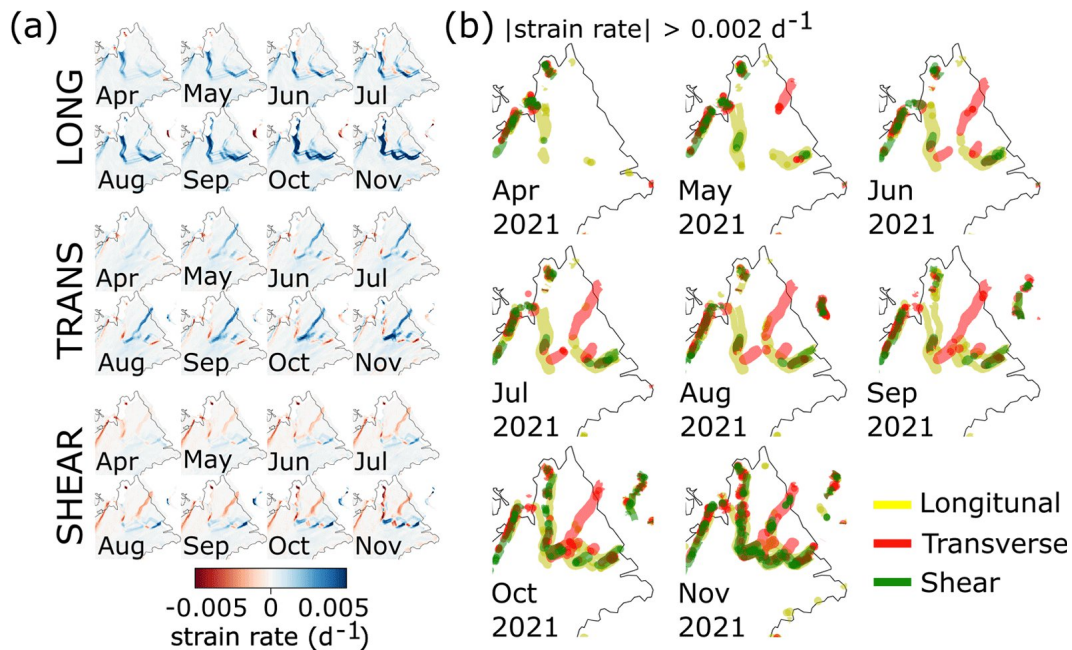
Hydrologie sous-glaciaire et conditions basales



Charrier et al. 2025

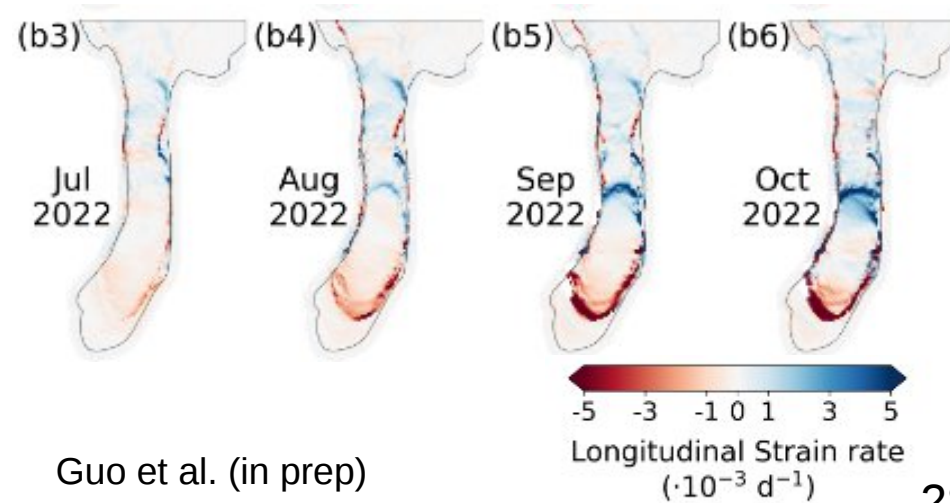
-> lien entre date du pic de saisonnalité et géométrie
des glaciers
thèse de Marie Zeiller, IGE

Fracturations des plateformes de glace

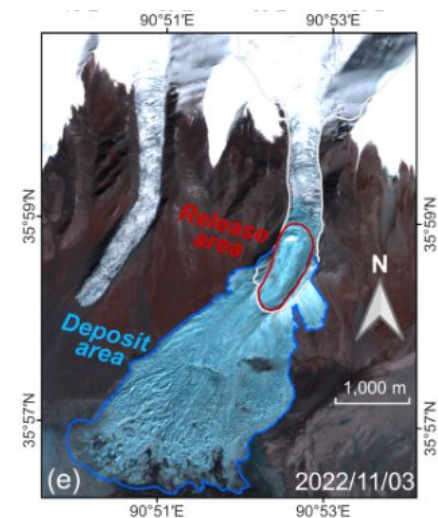


Provost et al., 2024

Détachement glaciaire



Guo et al. (in prep)



Conclusion

- S2 = Plus value en terme de résolution temporelle, spatiale, et radiométrique.
- Des produits disponible sur le **CES glacier**: <https://www.theia-land.fr/ces-cryosphere/glaciers/>
- Autres applications: cartographie de crevasses (Fernandes-shahateet et al., in prep) ou de dunes (Poizat et al., 2024)

Conclusion et perspectives

- Production systématique des vitesses via CDOS THEIA, en cours d'implémentation
- Vers une meilleure intégration des séries temporelles de vitesse de surface dans les modèles de dynamique glaciaire
- Il ne manque qu'une chose à Sentinel-2 : **la stéréo** !! => 4D Earth !





Thanks!

