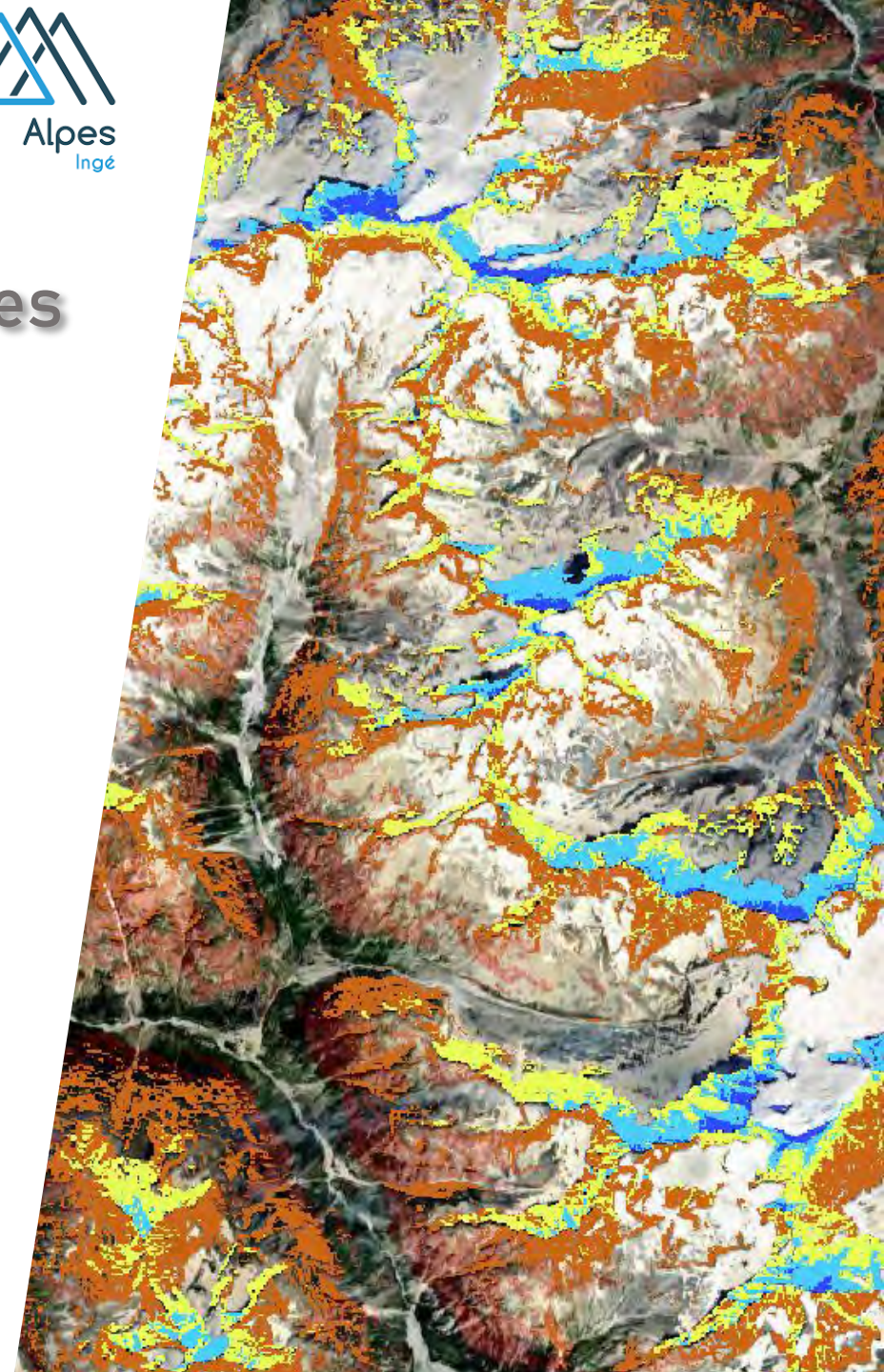


Cartographie du permafrost des Alpes françaises et distribution des écoulements rocheux en fonction du permafrost de paroi

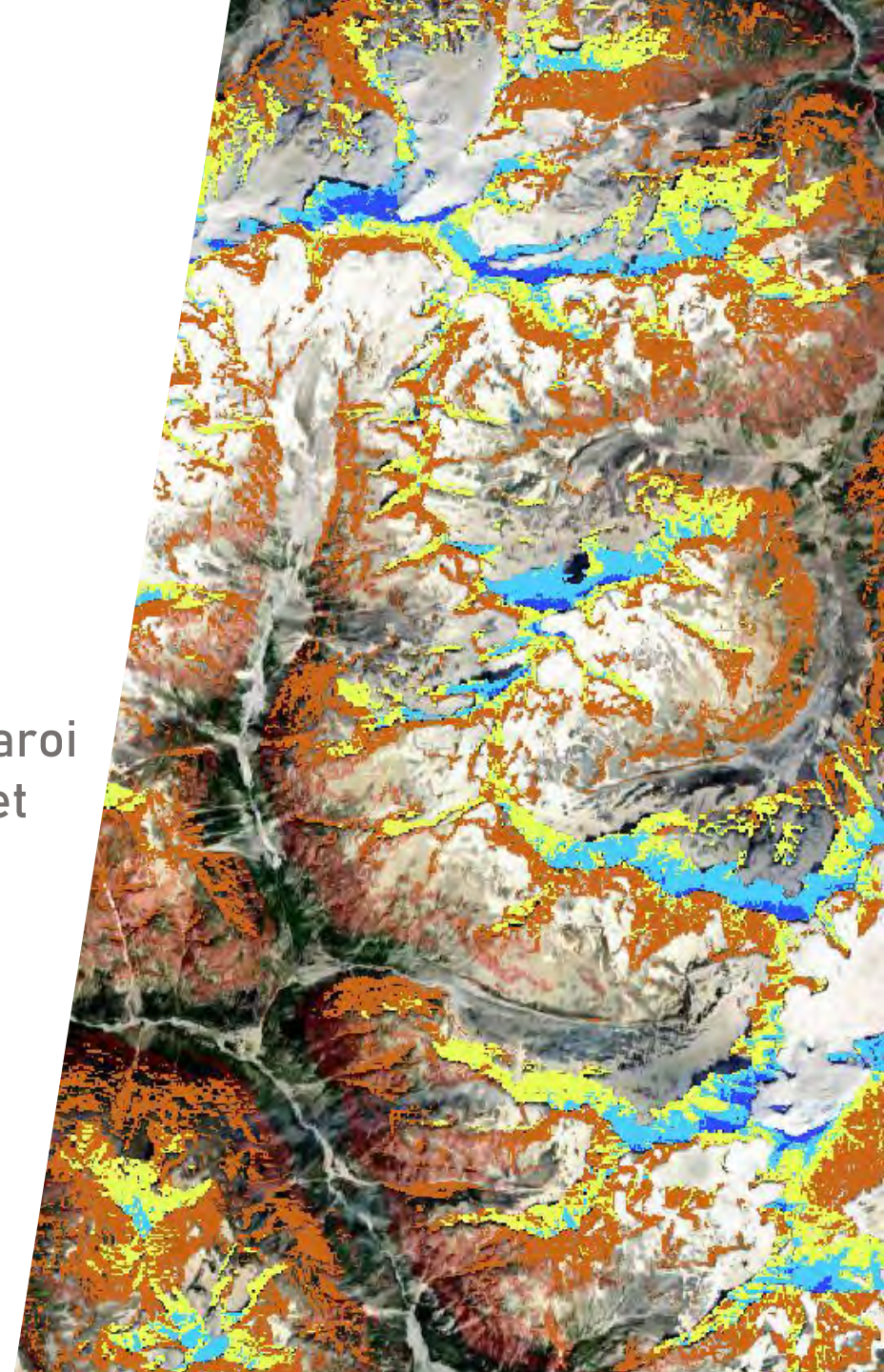
Florence Magnin

Maëva Cathala, Benjamin Lehmann, Tristan Fribault,
Feras AbdulSamad, Eric Larose, Meven Philippe, Tom
Larrue et la contribution de nombreux collègues



Structure de la présentation

- 1) Comment cartographier le permafrost alpin ?
- 2) Cartes de permafrost existantes et leurs limites
- 3) Nouvelle carte de permafrost de paroi
- 4) Développements en cours pour généraliser la cartographie à tous les terrains alpins
- 5) Distribution des écroulements en fonction du permafrost de paroi
- 6) De l'espace au temps : comprendre l'évolution du permafrost et les conditions de déclenchements des écroulements



1) Comment cartographier le permafrost alpin

Permafrost : toute portion de lithosphère dont la température $\leq 0^{\circ}\text{C}$ pendant au moins 2 ans consécutifs

➔ Invisible

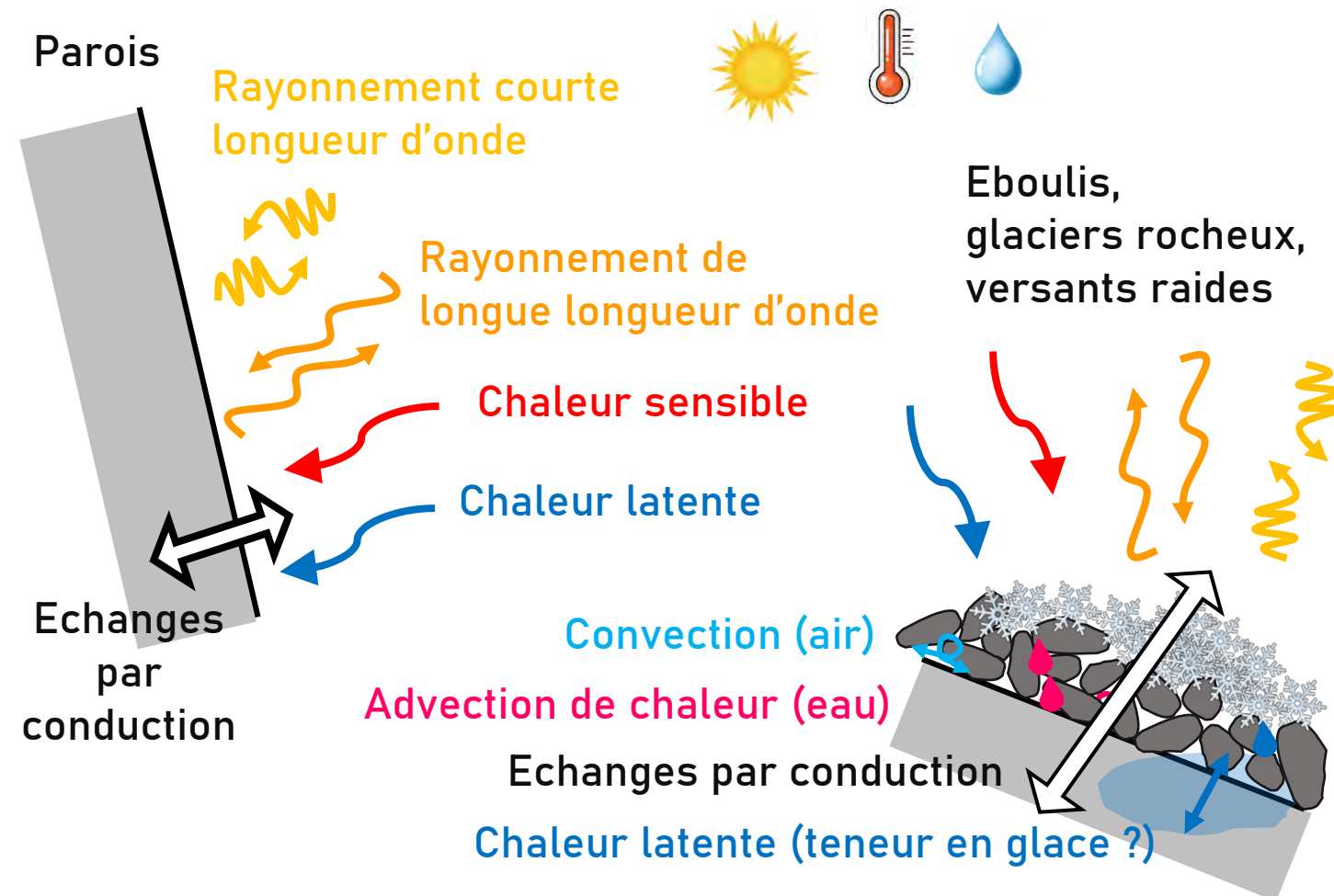


1) Comment cartographier le permafrost alpin

Permafrost : toute portion de lithosphère dont la température $\leq 0\text{ °C}$ pendant au moins 2 ans consécutifs

➔ Invisible

Se forme quand le bilan d'énergie entre l'atmosphère et le terrain est négatif

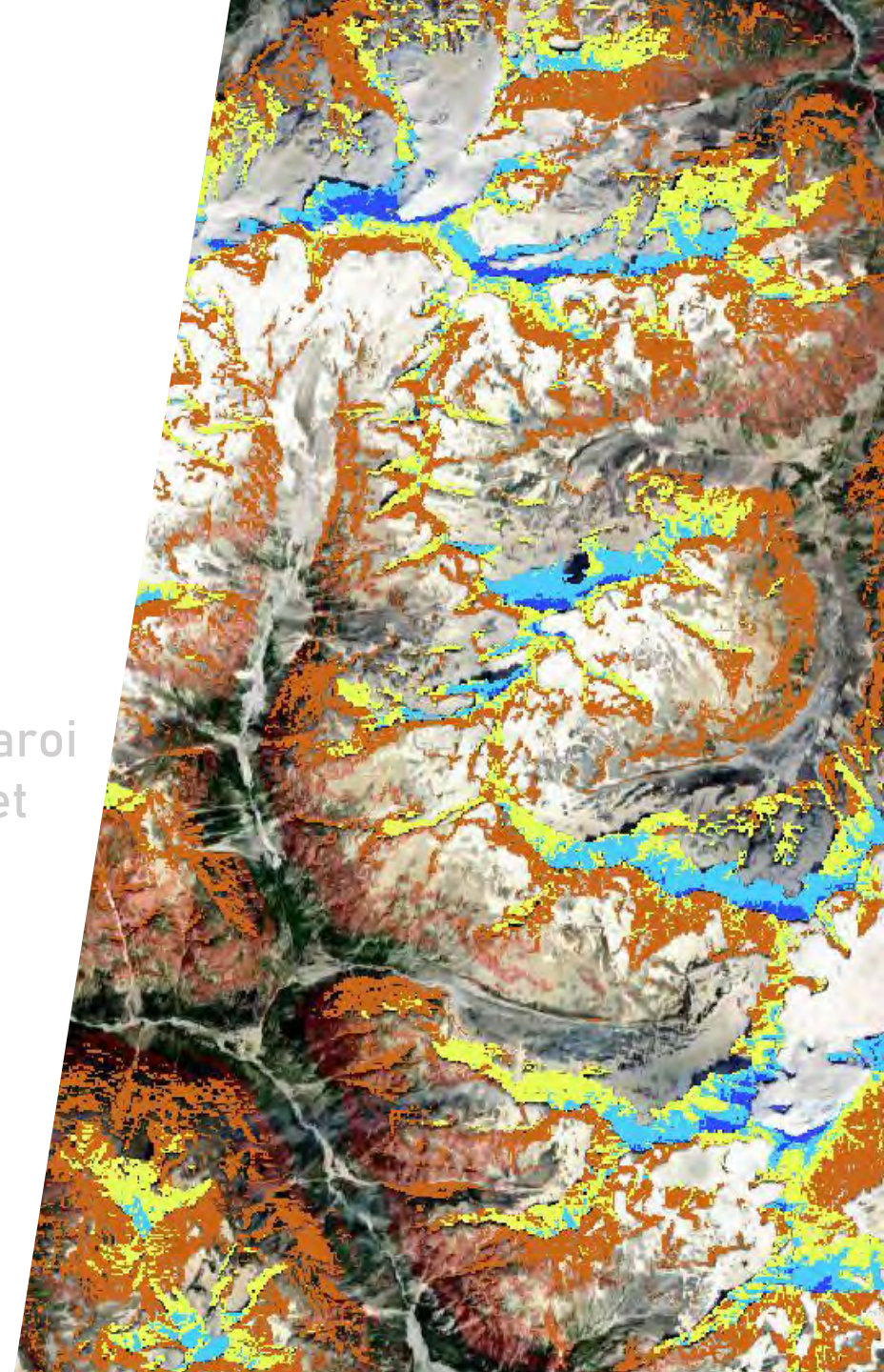


➔ Pour cartographier le permafrost il faudrait idéalement calculer les échanges thermiques (bilan d'énergie) Atmosphère ↔ Terrain

➔ Du fait de la difficulté de mettre au point, paramétrer et implémenter des modèles de bilan d'énergie, les cartes de permafrost utilisent généralement des modèles empirico-statistiques (basés sur des « évidences » de permafrost ou données de température)

Structure de la présentation

- 1) Comment cartographier le permafrost alpin ?
- 2) Cartes de permafrost existantes et leurs limites
- 3) Nouvelle carte de permafrost de paroi
- 4) Développements en cours pour généraliser la cartographie à tous les terrains alpins
- 5) Distribution des écroulements en fonction du permafrost de paroi
- 6) De l'espace au temps : comprendre l'évolution du permafrost et les conditions de déclenchements des écroulements



2) Cartes de permafrost existantes et limites

APIM : Alpine-wide Permafrost Index Map (Boeckli et al., 2012)

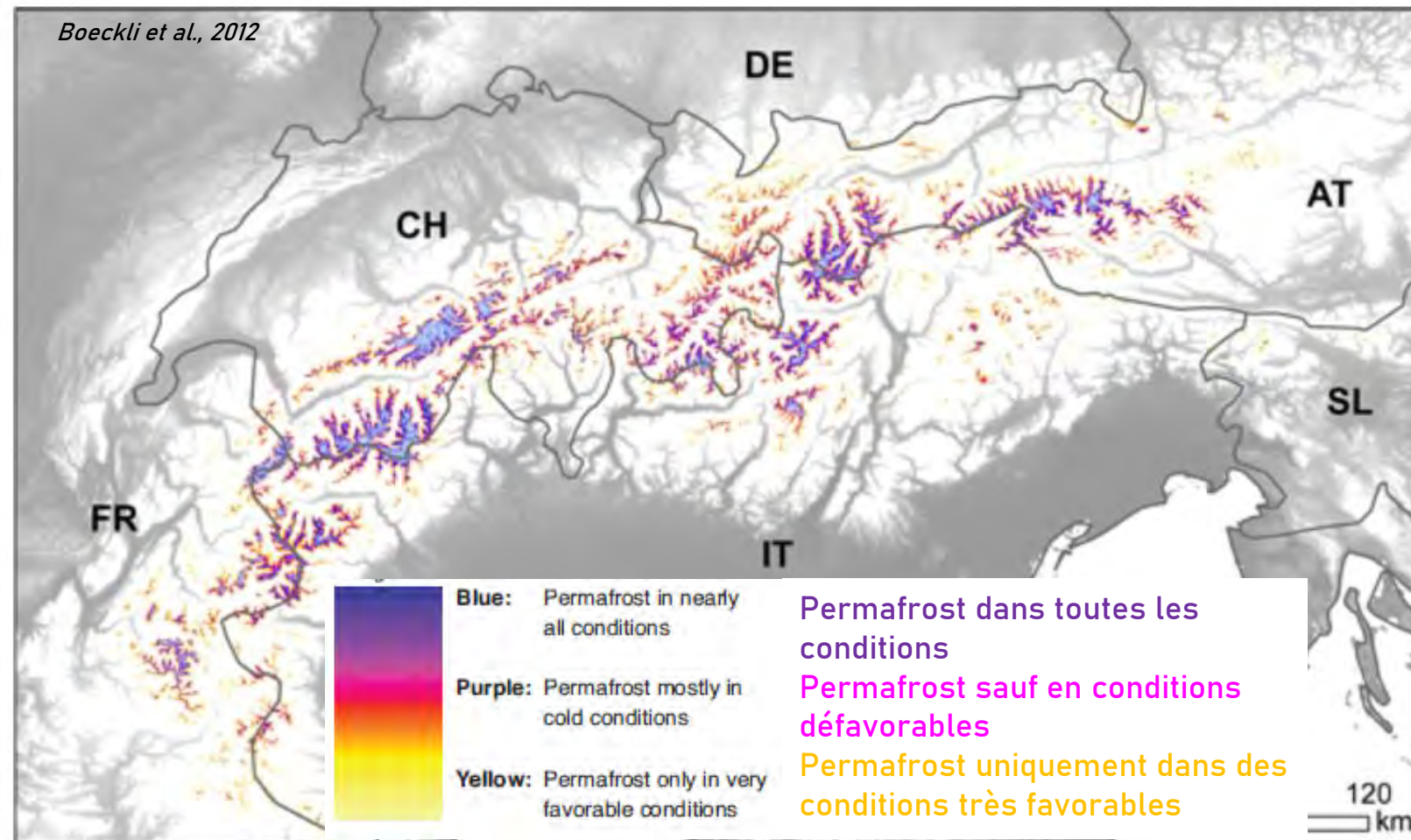
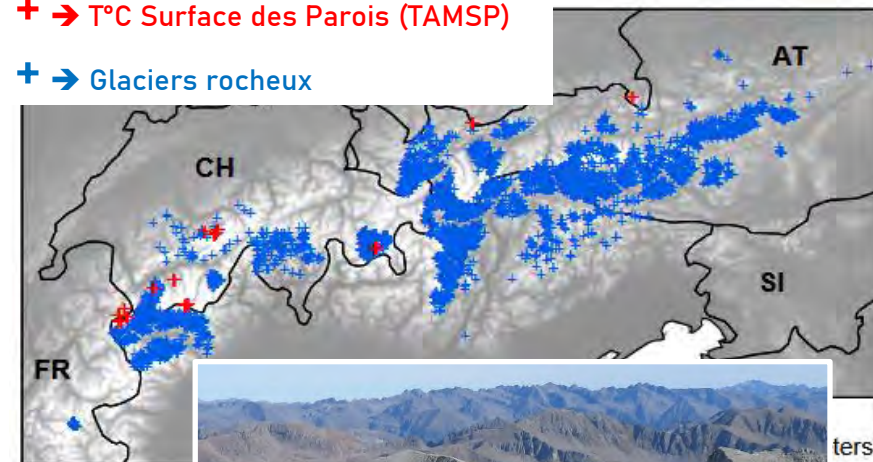
Combinaison de 2 modèles de régression : (1) glaciers rocheux et (2) T°C de Surface des Parois

→ indice de permafrost ; MNT ~30 m de résolution

- ~5% du territoire alpin
- 3 à 5 fois > superficie glaciers

+ → T°C Surface des Parois (TAMSP)

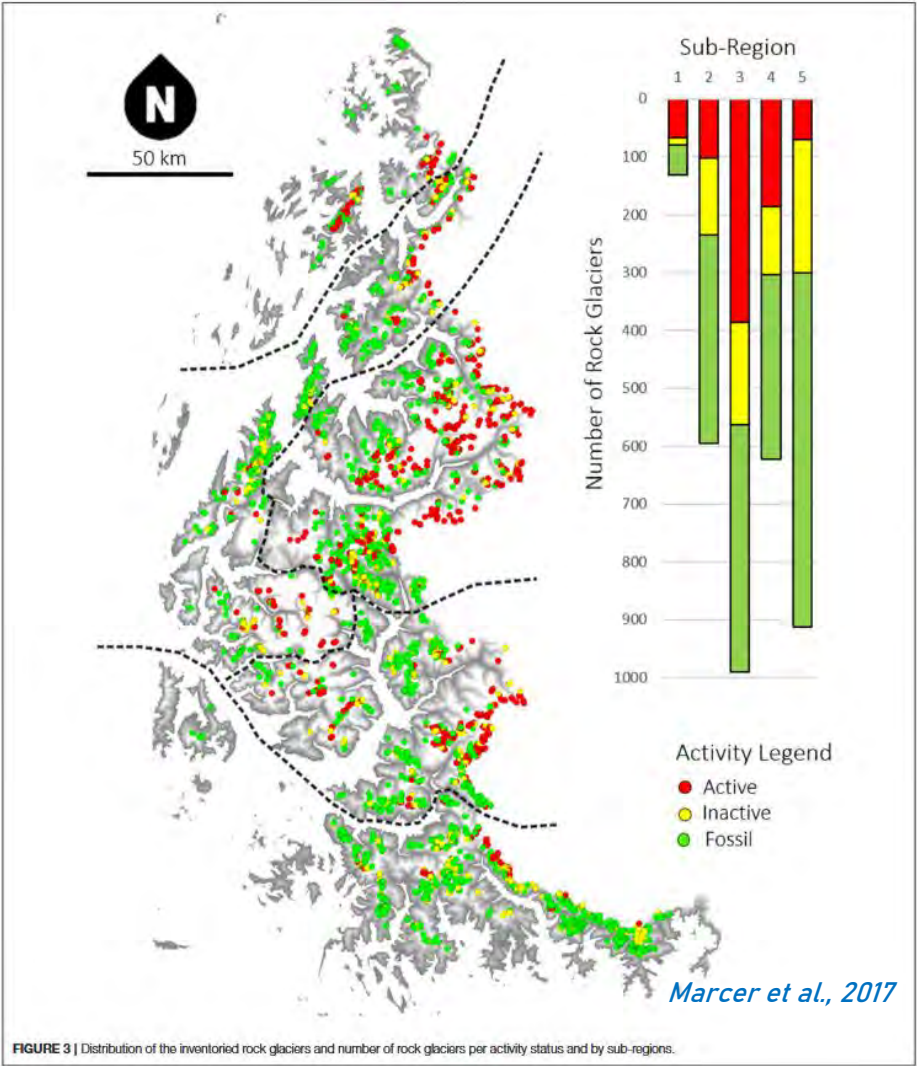
+ → Glaciers rocheux



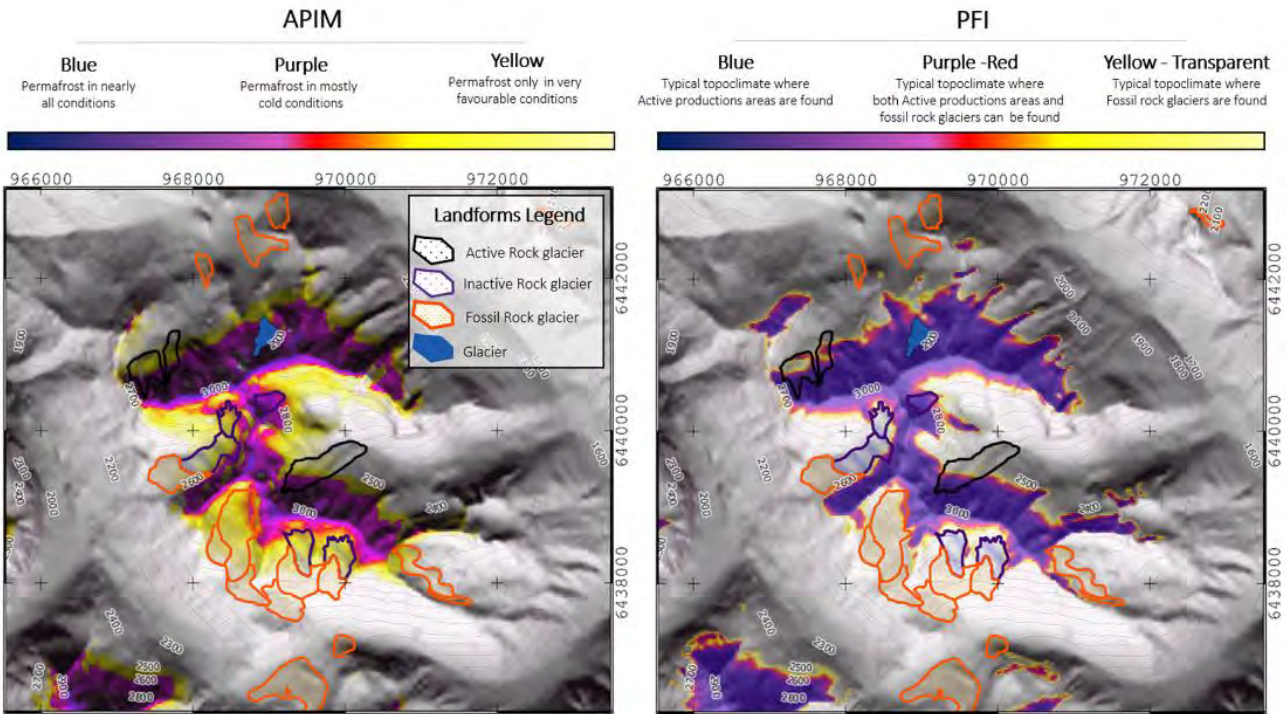
2) Cartes de permafrost existantes et limites

PFI : Permafrost Favourability Index map

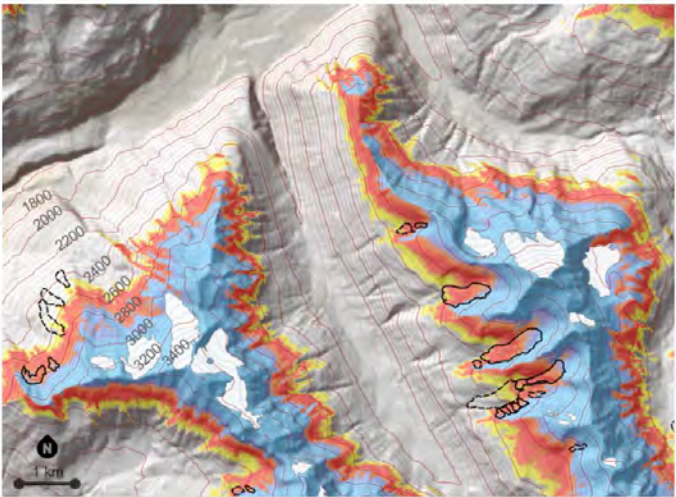
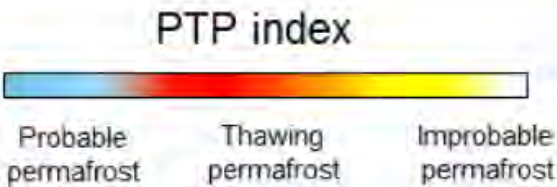
PTP : Potential Thawing Permafrost map



Marcer et al., 2017

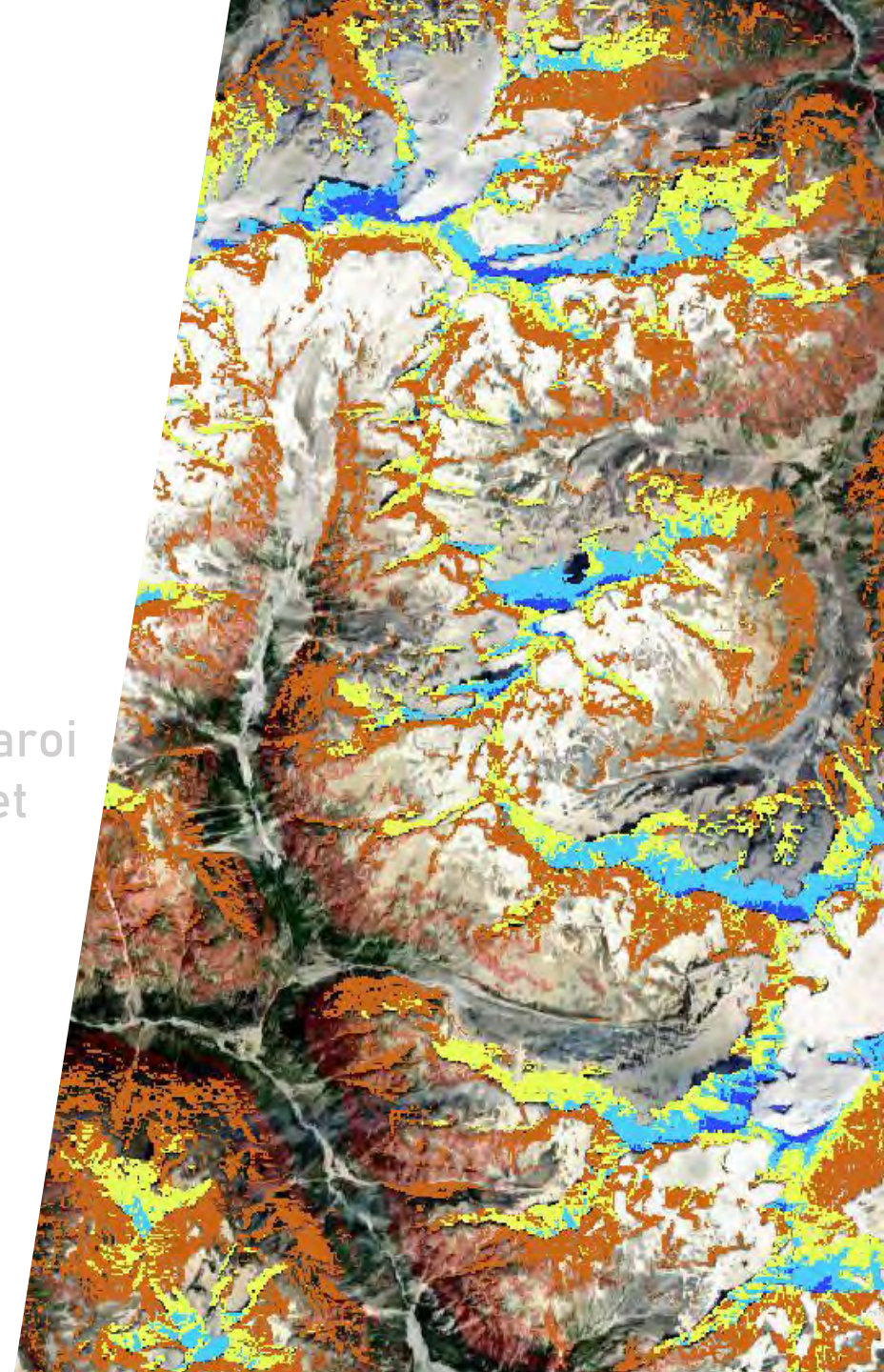


Marcer et al., 2019



Structure de la présentation

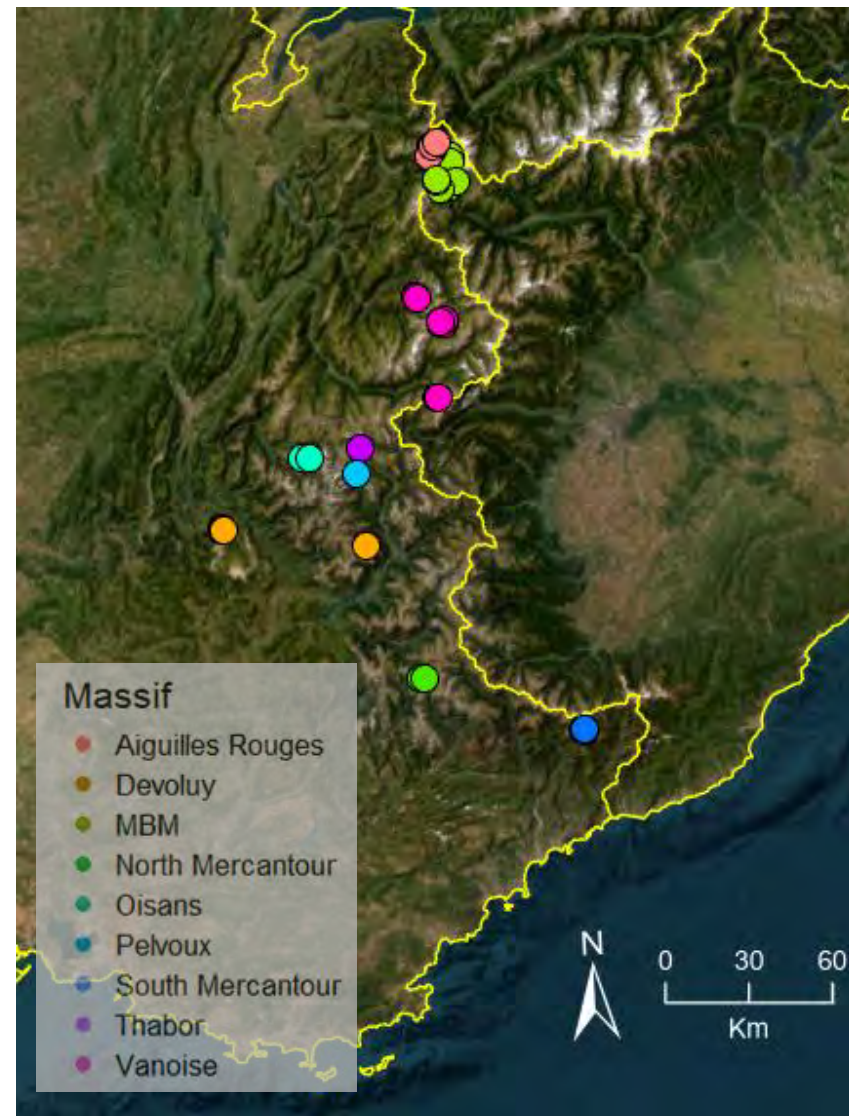
- 1) Comment cartographier le permafrost alpin ?
- 2) Cartes de permafrost existantes et leurs limites
- 3) Nouvelle carte de permafrost de paroi
- 4) Développements en cours pour généraliser la cartographie à tous les terrains alpins
- 5) Distribution des écroulements en fonction du permafrost de paroi
- 6) De l'espace au temps : comprendre l'évolution du permafrost et les conditions de déclenchements des écroulements



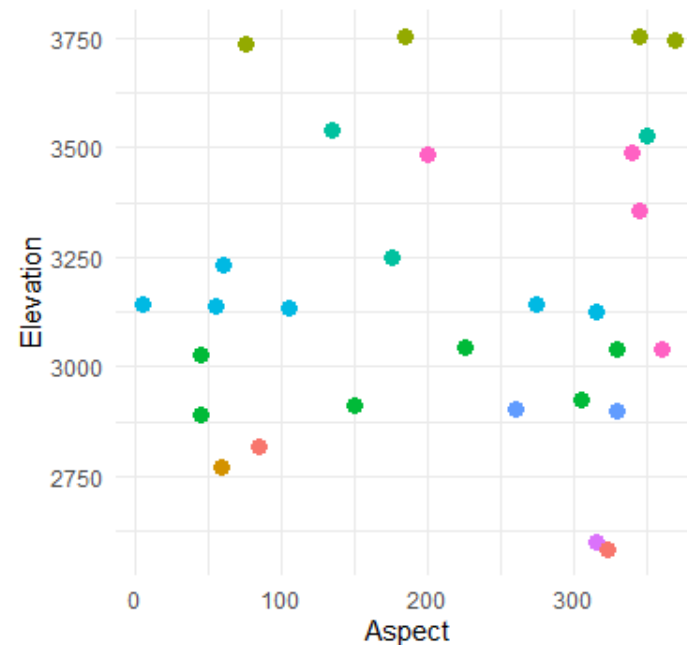
3) Nouvelle carte de permafrost de paroi

2019-2024 : Extension du réseau de mesure de température des parois

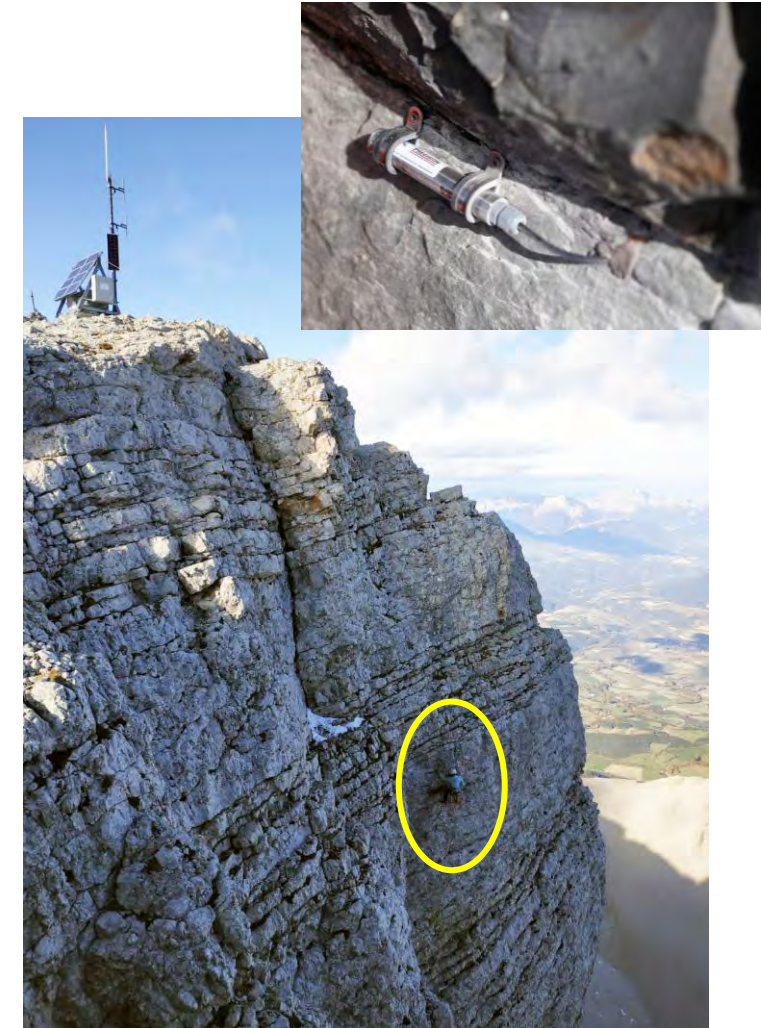
2025 : Nouveau modèle empirico-statistique calibré pour les Alpes Fr. et nouvelle carte de permafrost de paroi



- 29 capteurs
- 72 points de TAMSP utilisés



Réalisation M. Cathala



3) Nouvelle carte de permafrost de paroi

Calibration du modèle avec :

- TAMSP mesurée 2019-2024 :
- TAMA S2M-SAFRAN 2019-2024 (Météo France)
- RSIP (calcul SIG)

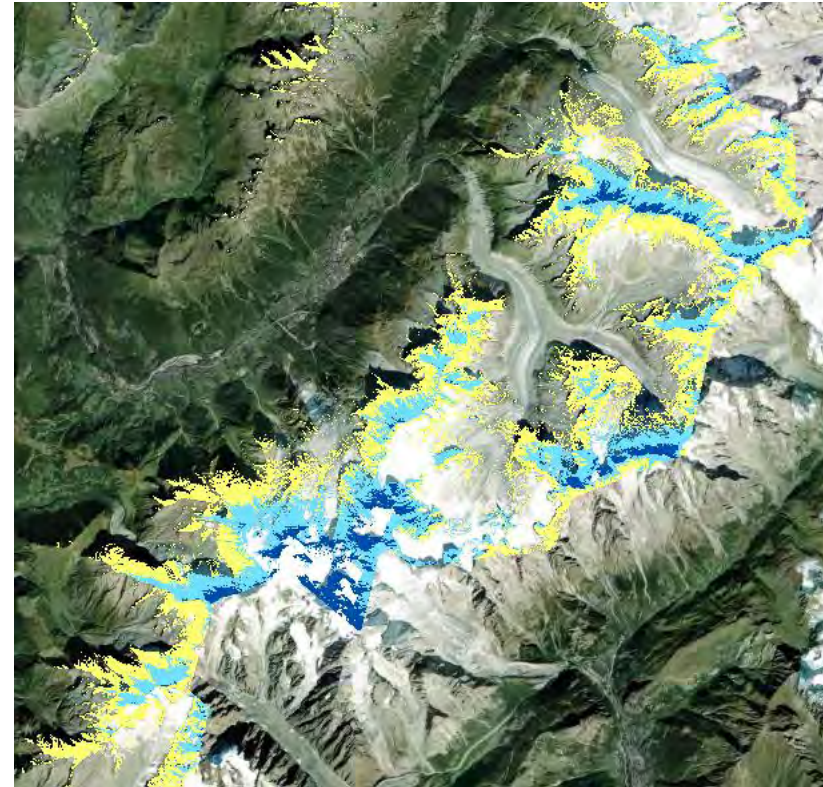
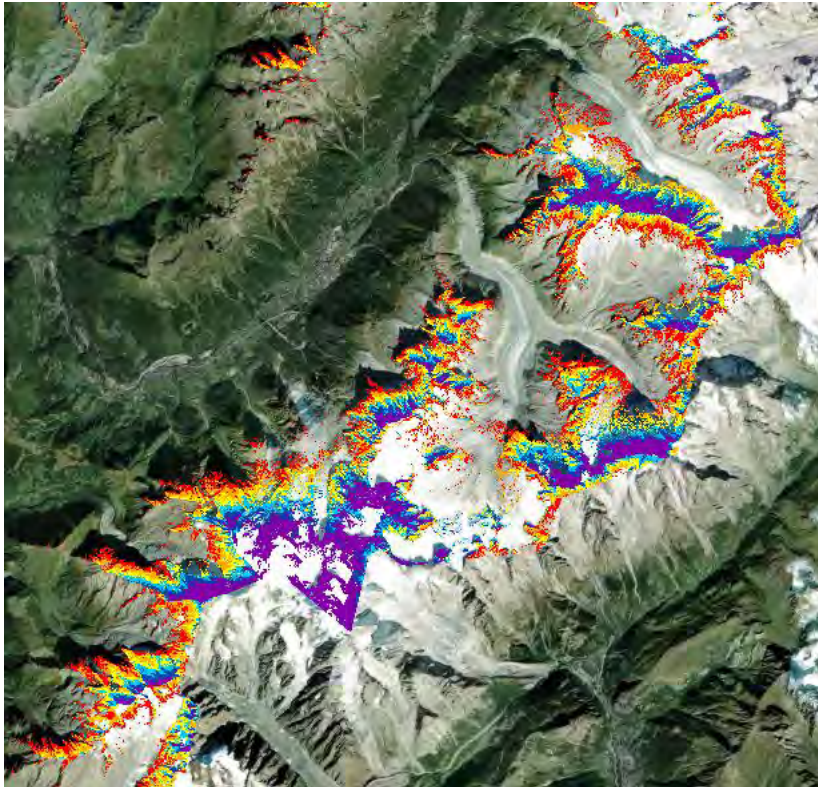
Cartographie avec :

- TAMA S2M SAFRAN 1991-2020
- MNT 10 m de résolution

Réalisation M. Cathala

TAMSP (°C)
1991-2020

- < -2
- 2 to -1
- 1 to 0
- 0 to 1
- 1 to 2
- 2 to 3



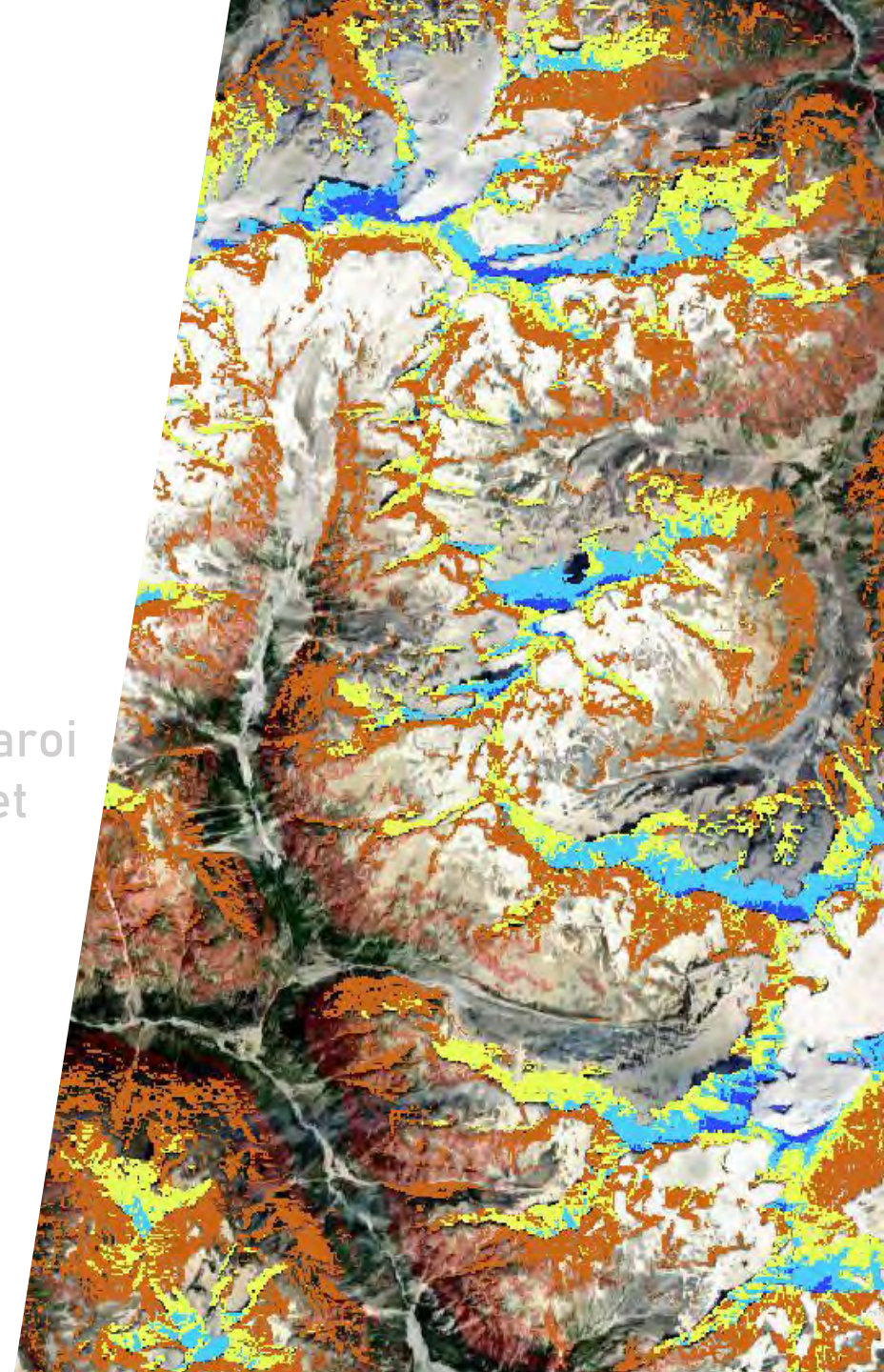
Indice

- 0,1 - 0,5
- 0,5 - 0,9
- 0,9 - 1

→ Plus d'informations dans le poster de M. Cathala

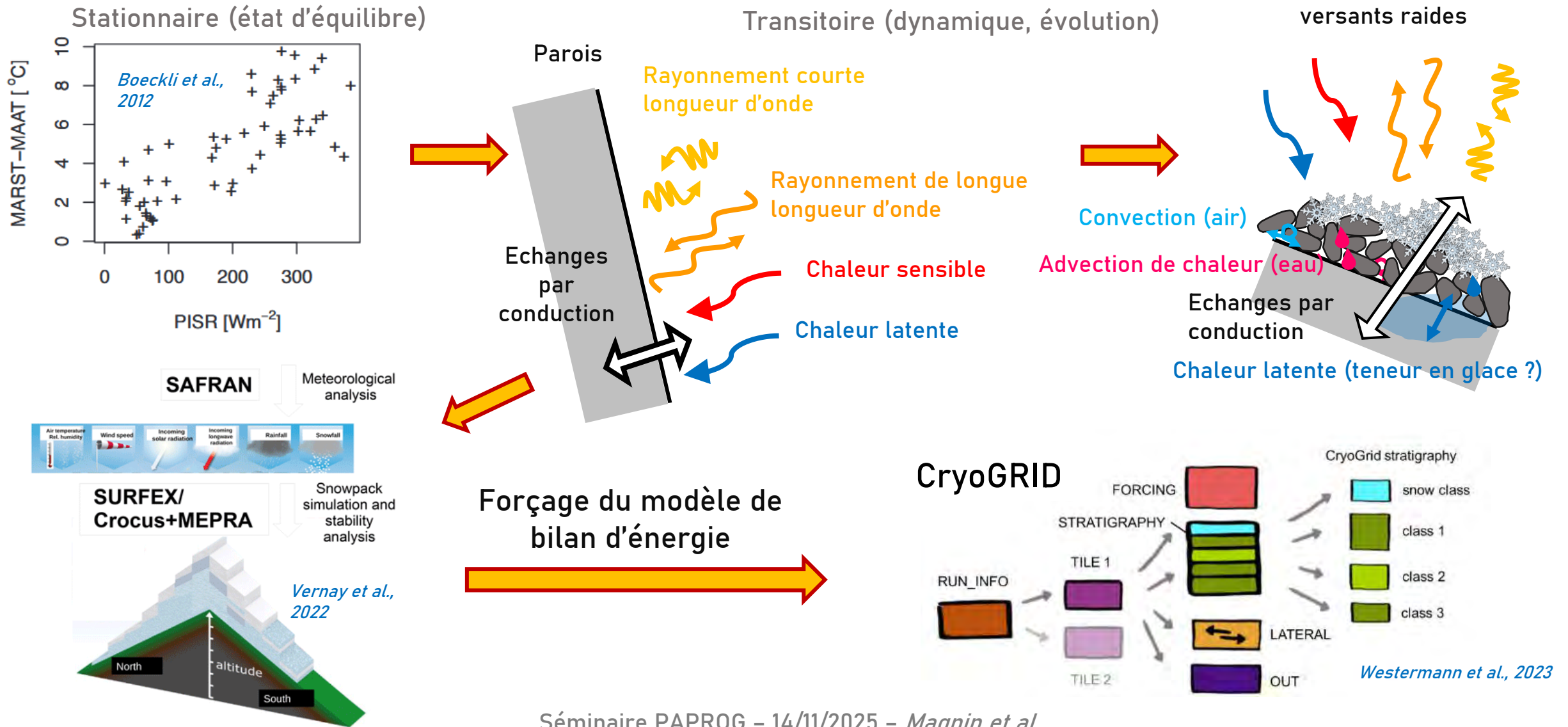
Structure de la présentation

- 1) Comment cartographier le permafrost alpin ?
- 2) Cartes de permafrost existantes et leurs limites
- 3) Nouvelle carte de permafrost de paroi
- 4) Développements en cours pour généraliser la cartographie à tous les terrains alpins
- 5) Distribution des écroulements en fonction du permafrost de paroi
- 6) De l'espace au temps : comprendre l'évolution du permafrost et les conditions de déclenchements des écroulements



4) Généraliser la cartographie à tous les terrains alpins

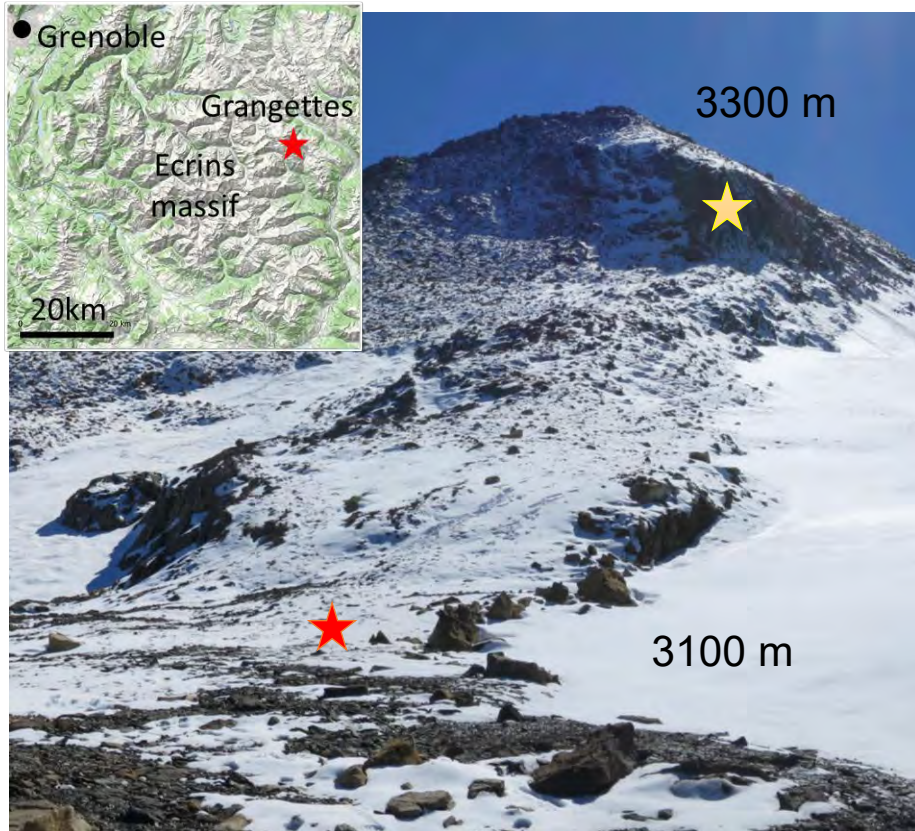
Des modèles statistiques aux modèles à base physique



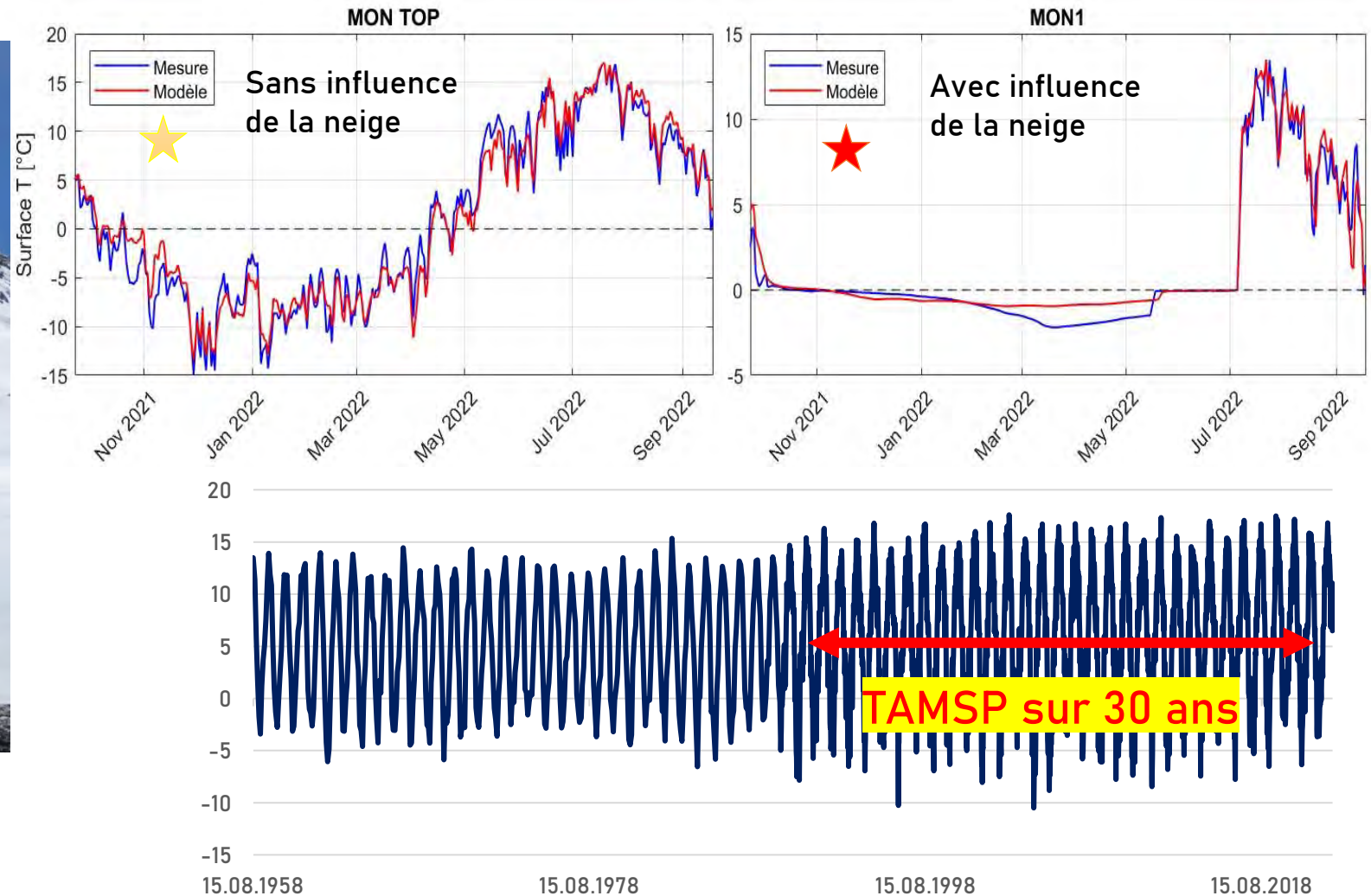
4) Généraliser la cartographie à tous les terrains alpins

Exemple d'application de CryoGRID

Calibration : reproduire au mieux les valeurs mesurées



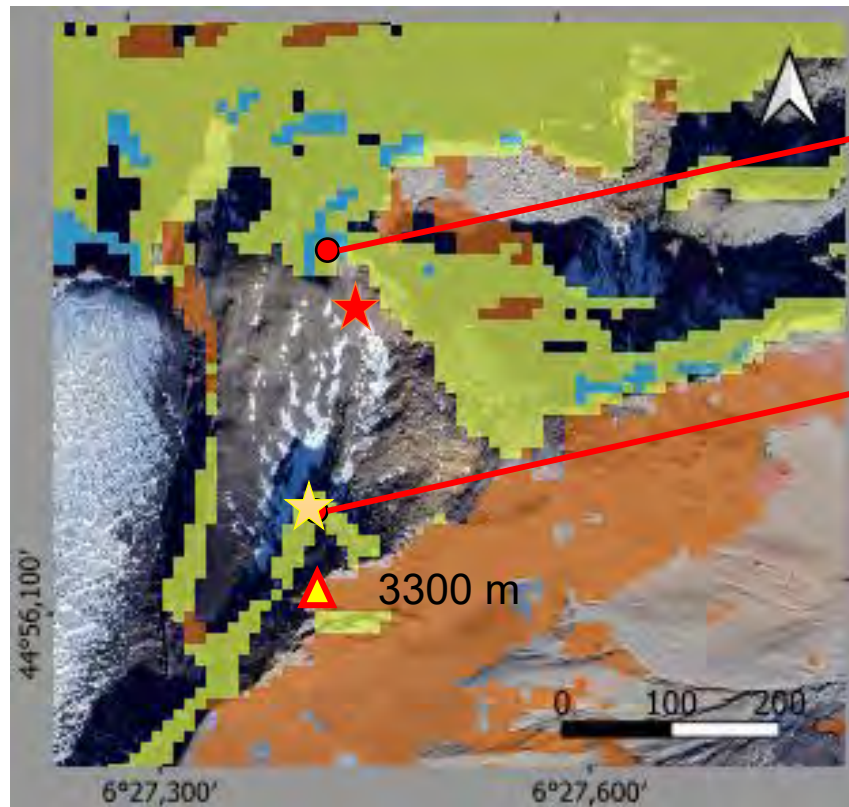
Réalisation B. Lehmann



4) Généraliser la cartographie à tous les terrains alpins

Travaux en cours :

- Comparaison de les TAMSP (1991-2020) calculées avec le modèle empirico-statistique et celles calculées avec le bilan d'énergie (CryoGRID)
- Automatisation de la calibration de CryoGRID avec les données disponibles dans les Alpes françaises (trouver la meilleure combinaison de paramètre : neige, albédo, ...)



Cathala et al., in prep

T°C Annuelle Moyenne de
Surface des Parois (1991-2020)

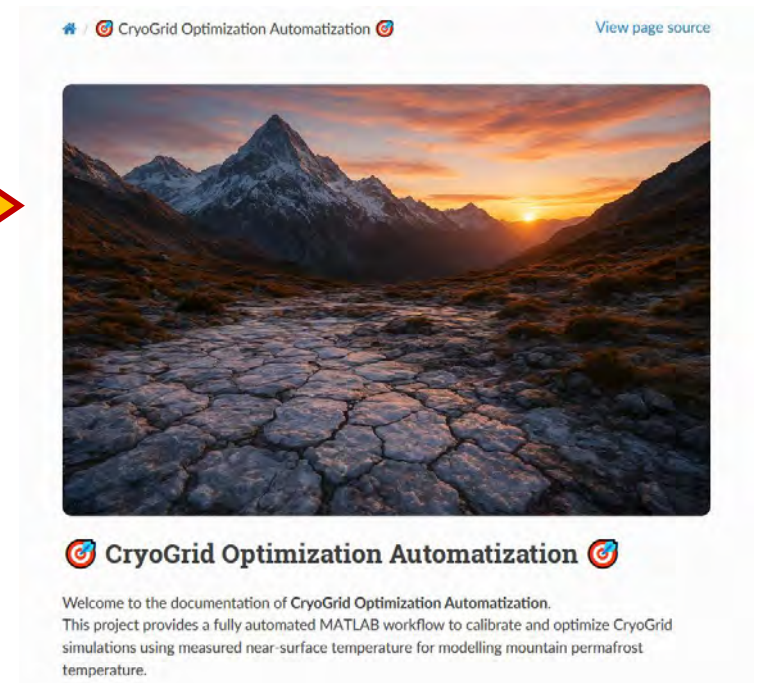
- Cathala et al., in prep : -0.21°C
- Boeckli et al., 2012 : 0.06°C
- CryoGRID : -0.24°C

- Cathala et al., in prep : 0.04°C
- Boeckli et al., 2012 : 0.31°C
- CryoGRID : -0.36°C

TAMSP (°C)



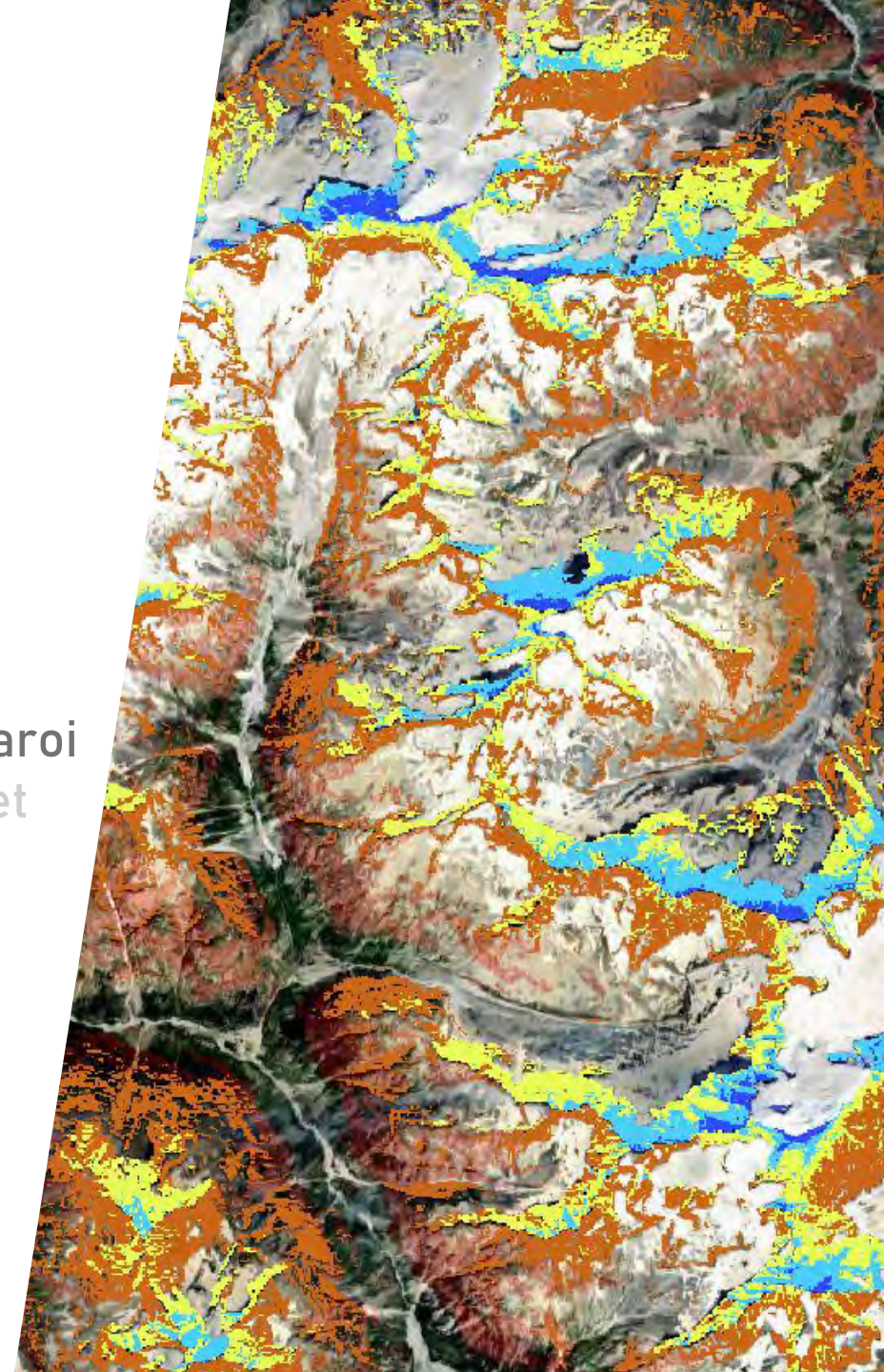
Spatialisation sur
tout type de terrain



*Réalisation T. Fribault
et B. Lehmann*

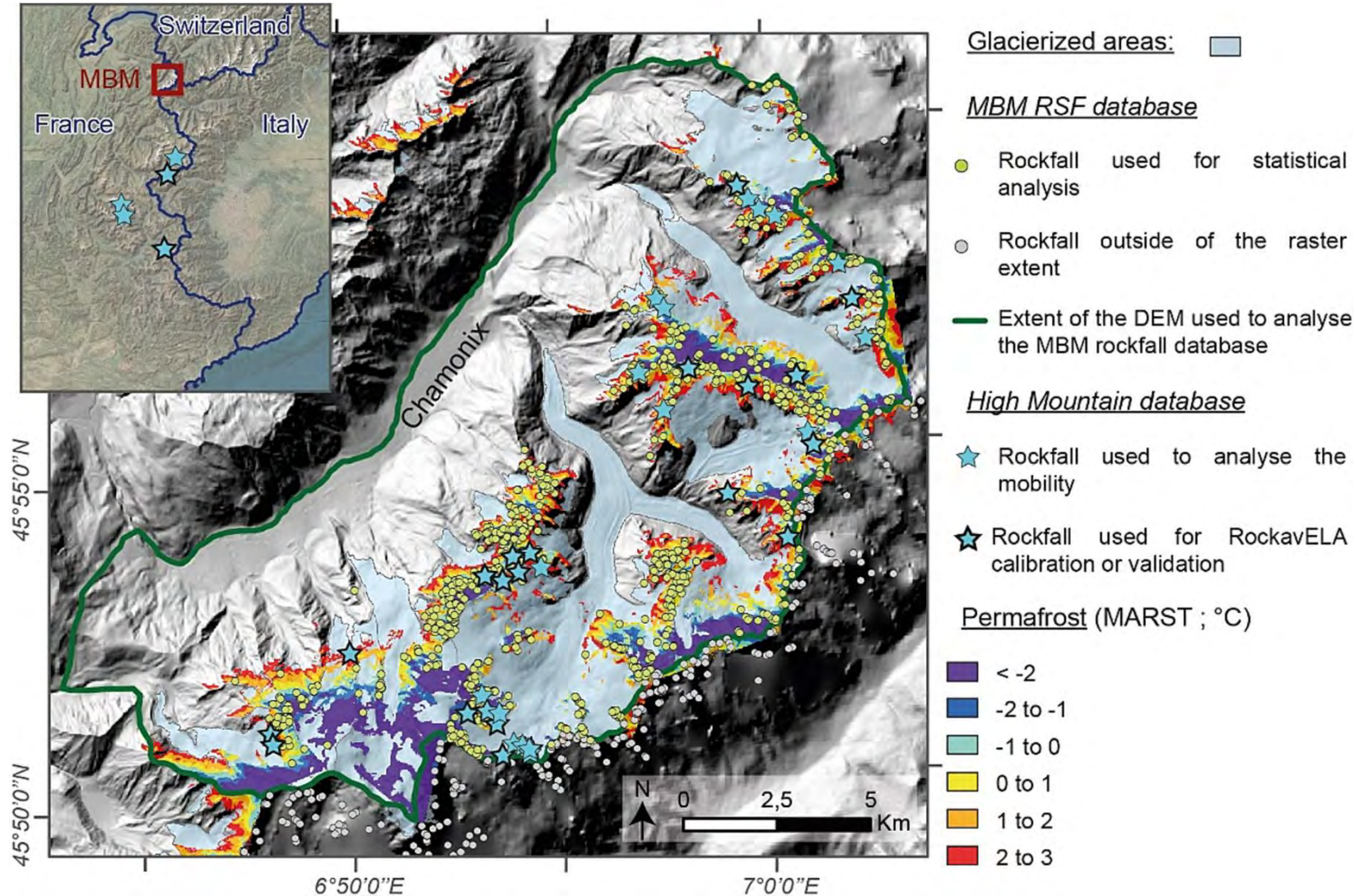
Structure de la présentation

- 1) Comment cartographier le permafrost alpin ?
- 2) Cartes de permafrost existantes et leurs limites
- 3) Nouvelle carte de permafrost de paroi
- 4) Développements en cours pour généraliser la cartographie à tous les terrains alpins
- 5) Distribution des écroulements en fonction du permafrost de paroi
- 6) De l'espace au temps : comprendre l'évolution du permafrost et les conditions de déclenchements des écroulements



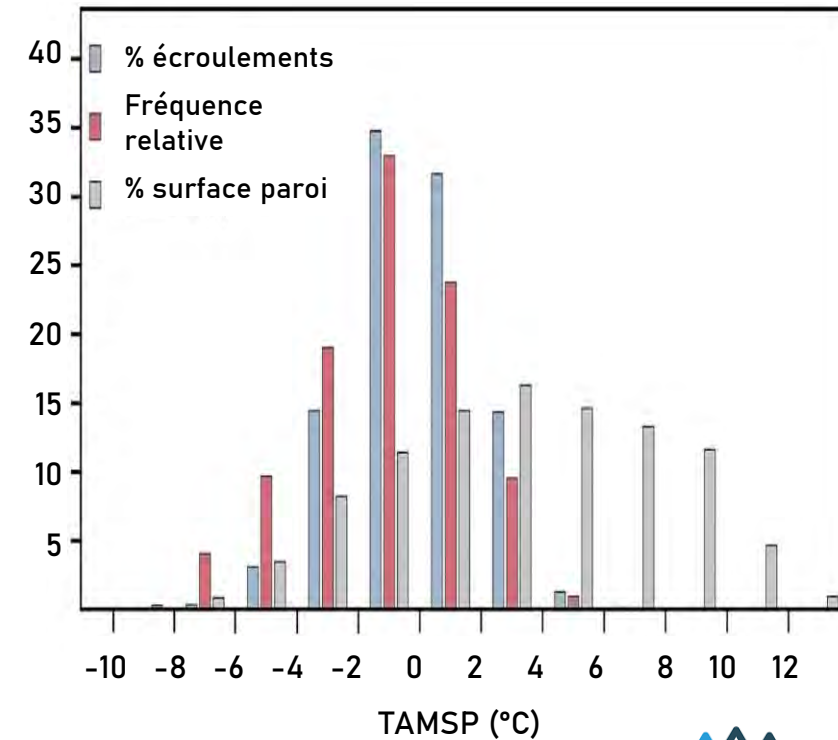
5) Distribution du permafrost de paroi et écoulements rocheux

Carte de permafrost basée sur le modèle de *Boeckli et al., 2012*
MNT à 25 m de résolution



Cathala et al., 2024

Analyse de la distribution de
1087 écoulements (L. Ravel, 2007-2021, massif Mont Blanc)
en fonction de la TAMSP

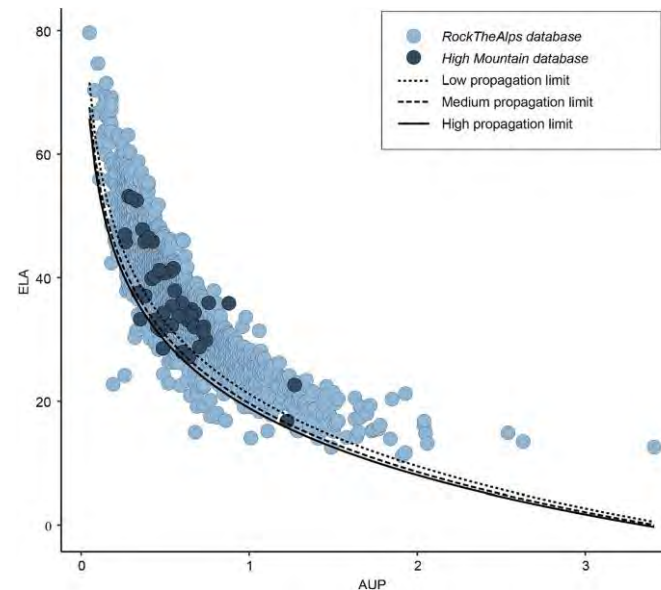
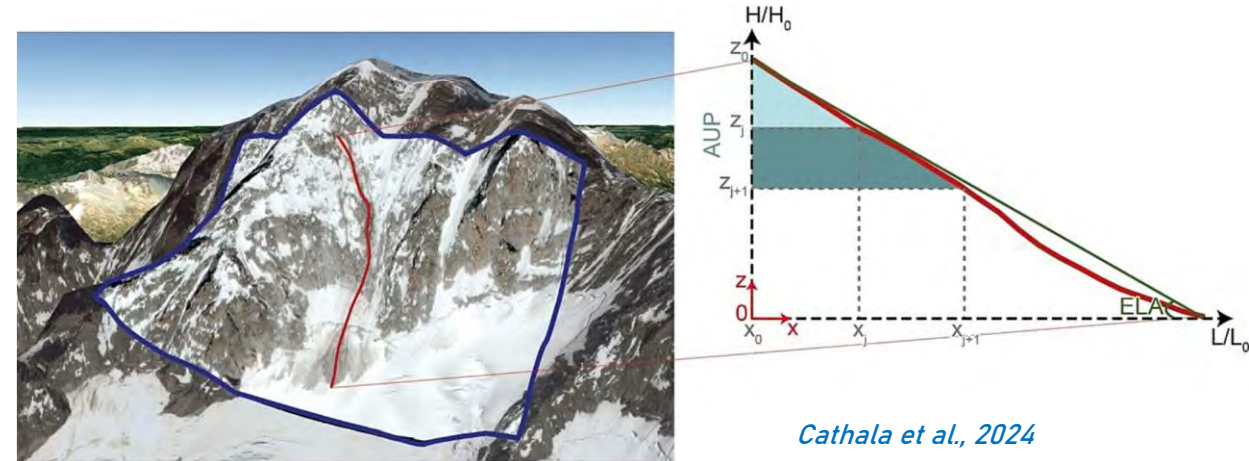
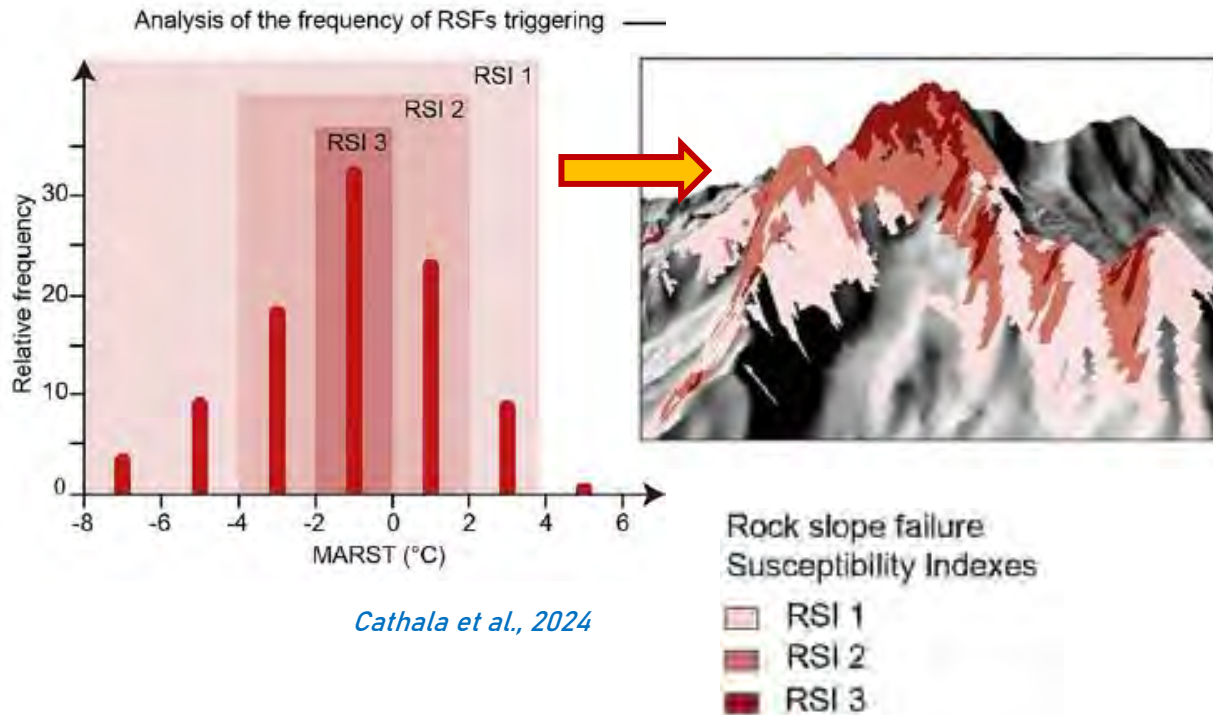


5) Distribution du permafrost de paroi et écoulements rocheux

Cartographie des zones de propagation potentielles

→ Phase 1 (Cathala et al., 2024) :

- 3 scénarios de zones de départ
- calibration des paramètres de propagation

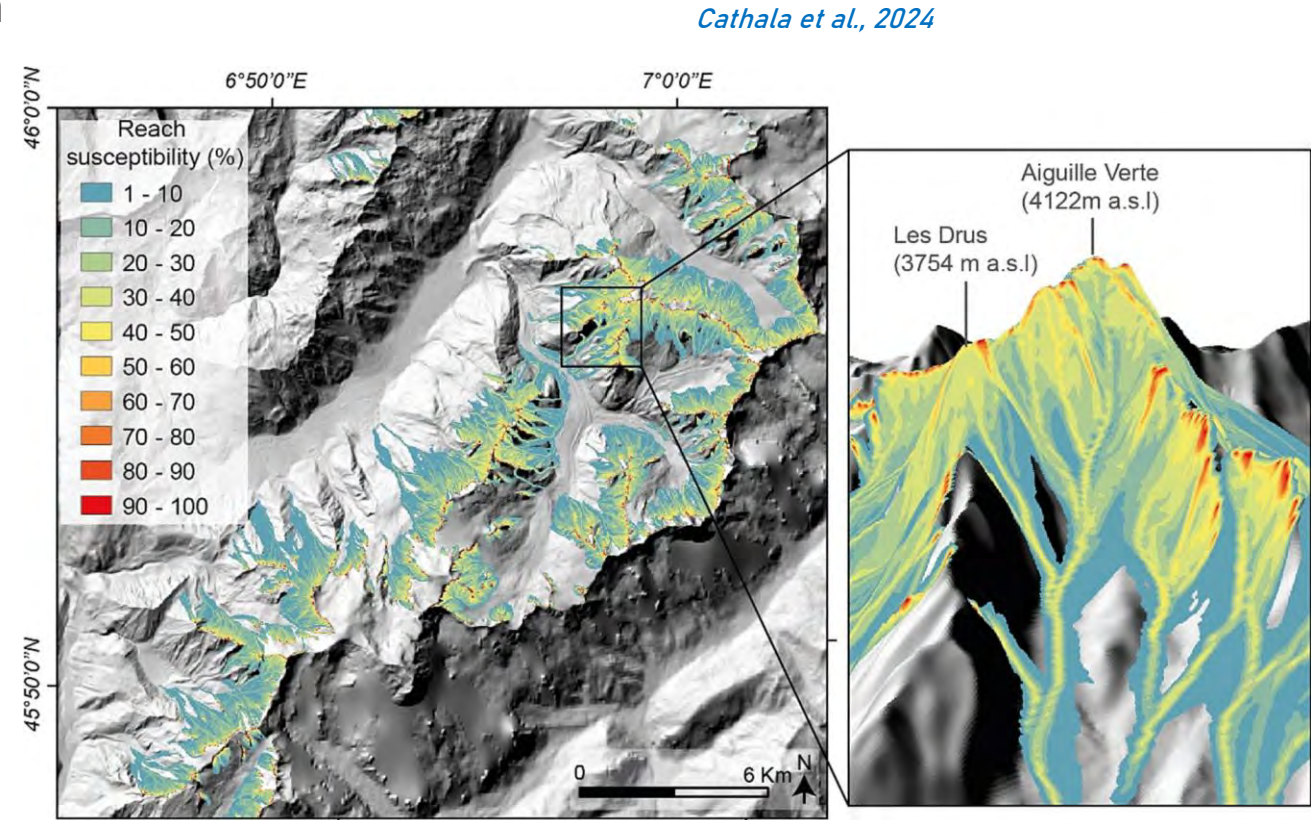


5) Distribution du permafrost de paroi et écoulements rocheux

Cartographie des zones de propagation potentielles

→ Phase 1 (Cathala et al., 2024) :

- 3 scénarios de zones de départ
- calibration des paramètres de propagation
- 3 scénarios de propagation
- simulations avec RoackavELA



✓ RockavELA - Energy line based rock avalanche model

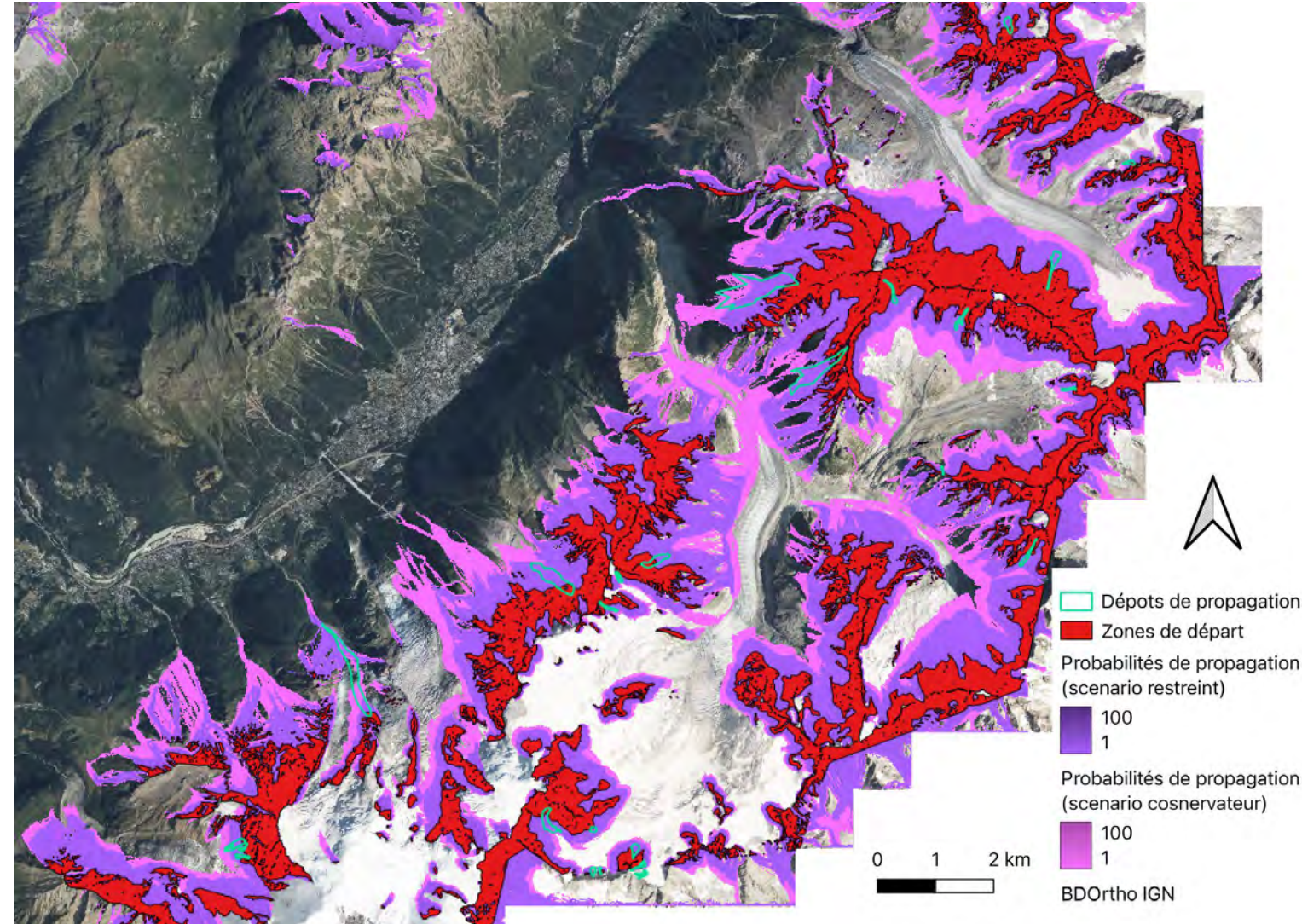
RockavELA is a rock avalanche runout modelling tool which is based on a trajectory specific energy line angle (ELA). For each trajectory the ELA is adjusted for the normalised area under the trajectory profile. More details on the usage and background of the model will follow in the course of 2023. RockavELA can be used for free and can be downloaded here: [RockavELA_install\(11.33 MB\)](#)

5) Distribution du permafrost de paroi et écoulements rocheux

Cartographie des zones de propagation potentielles

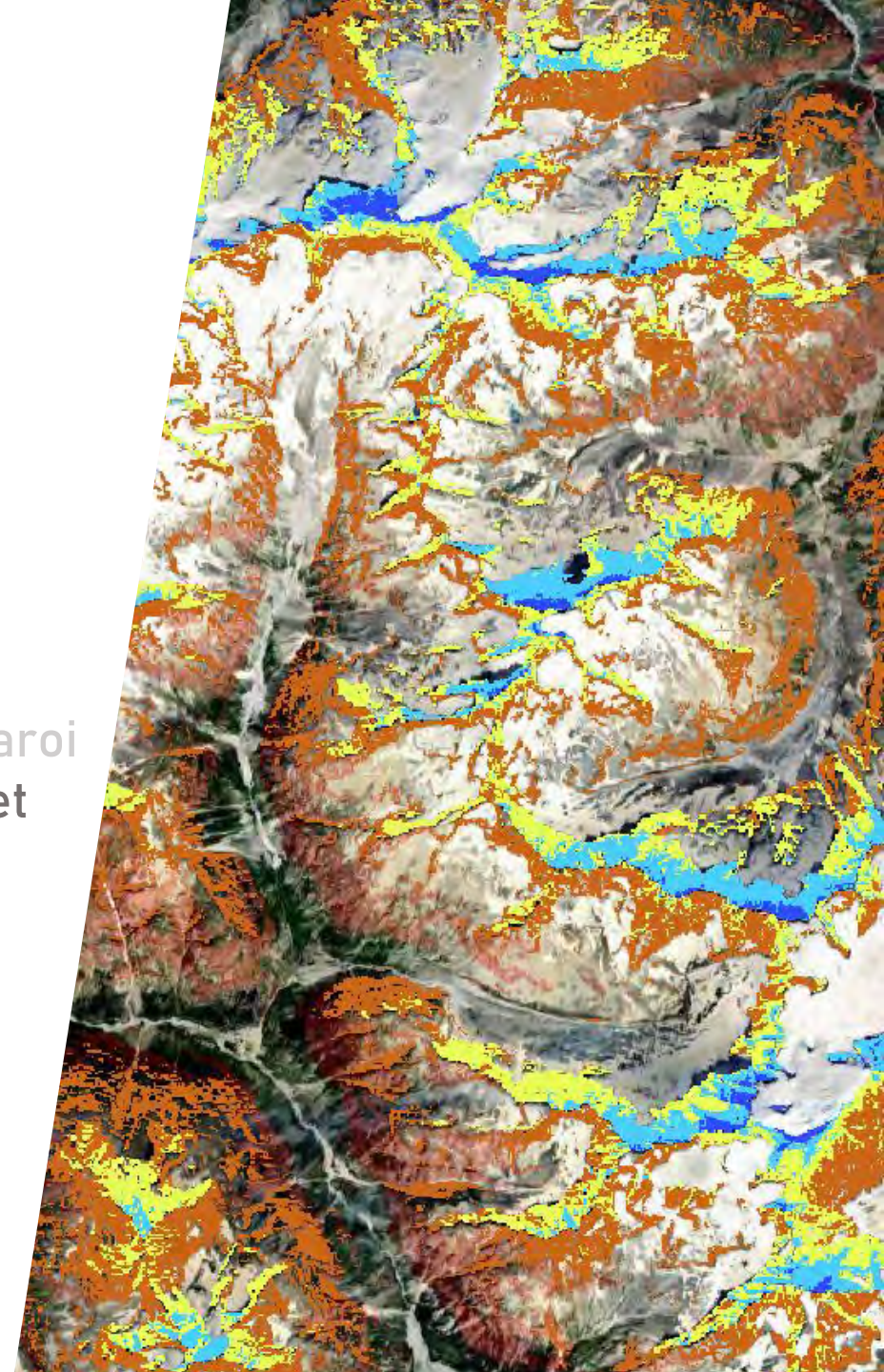
Réalisation T. Larrue

- Phase 2 (T. Larrue, Action PAPROG) :
 - Nouvelle carte de permafrost de paroi avec le modèle basé sur les données des Alpes Fr. (Cathala et al., *in prep*)
 - MNT à 10 m de résolution
 - 1 scénario de zones de départ, 2 scénarios de propagation



Structure de la présentation

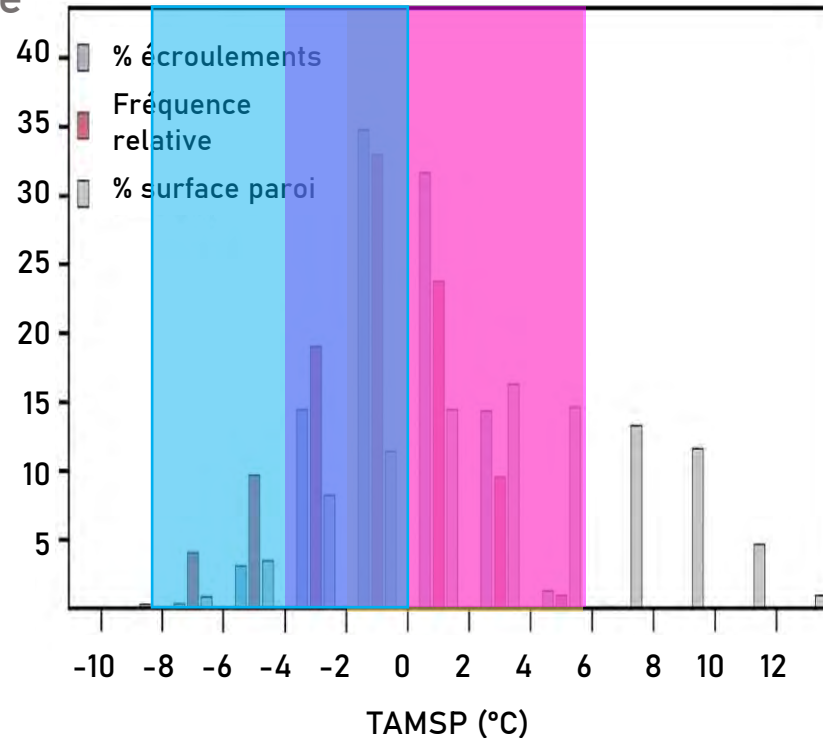
- 1) Comment cartographier le permafrost alpin ?
- 2) Cartes de permafrost existantes et leurs limites
- 3) Nouvelle carte de permafrost de paroi
- 4) Développements en cours pour généraliser la cartographie à tous les terrains alpins
- 5) Distribution des écroulements en fonction du permafrost de paroi
- 6) De l'espace au temps : comprendre l'évolution du permafrost et les conditions de déclenchements des écroulements



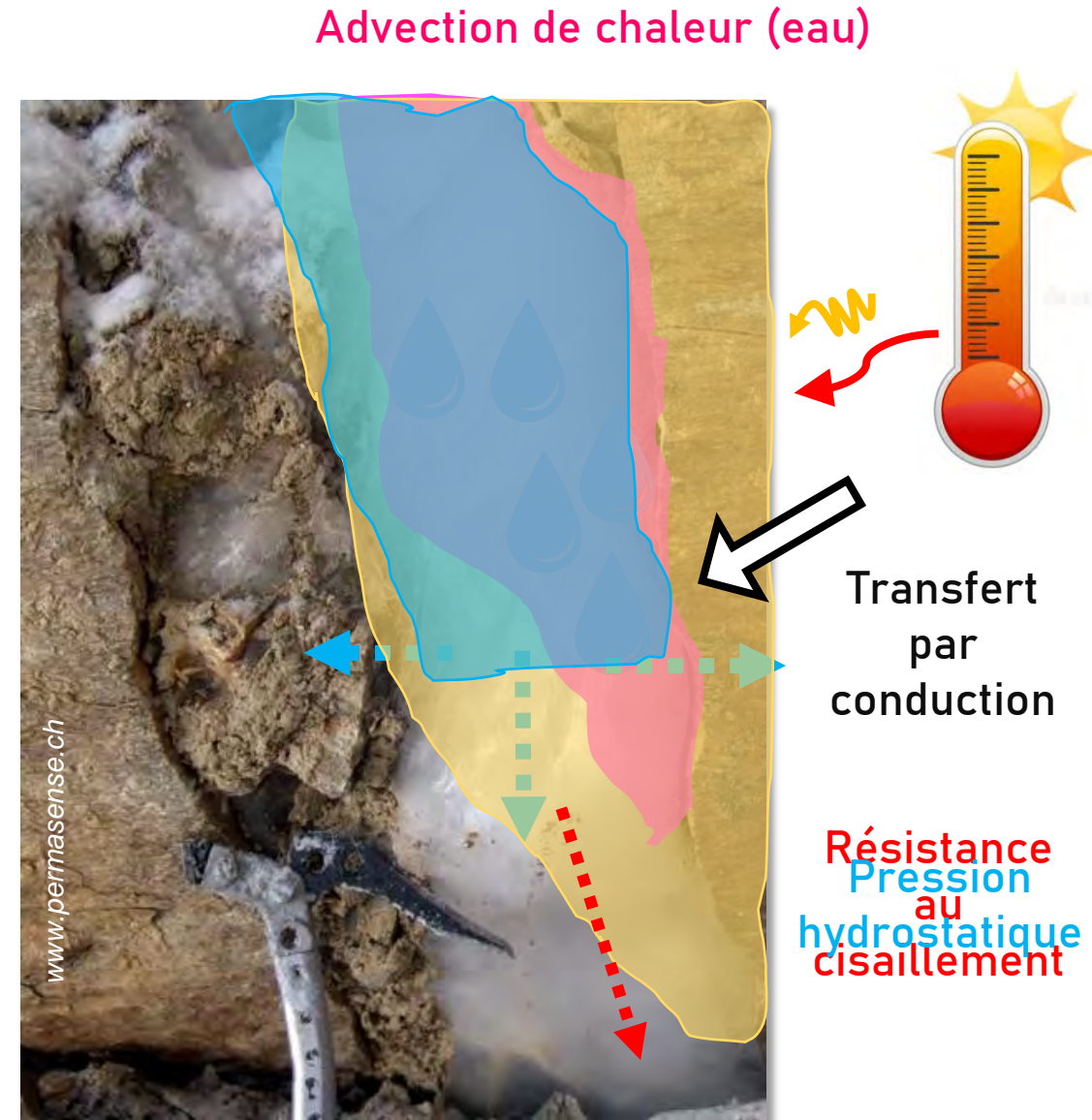
5) De la spatialisation à la temporalité des écroulements

Déclenchent d'écroulement par :

- Baisse de la résistance au cisaillement des joints de glace ou de la roche intacte
- Infiltration d'eau apportant de la chaleur (court-circuit entre la surface et la profondeur) et érodant les joints de glace → effet thermique
- Infiltration d'eau causant des pressions importantes (hydraulique, hydrostatique) → effet mécanique



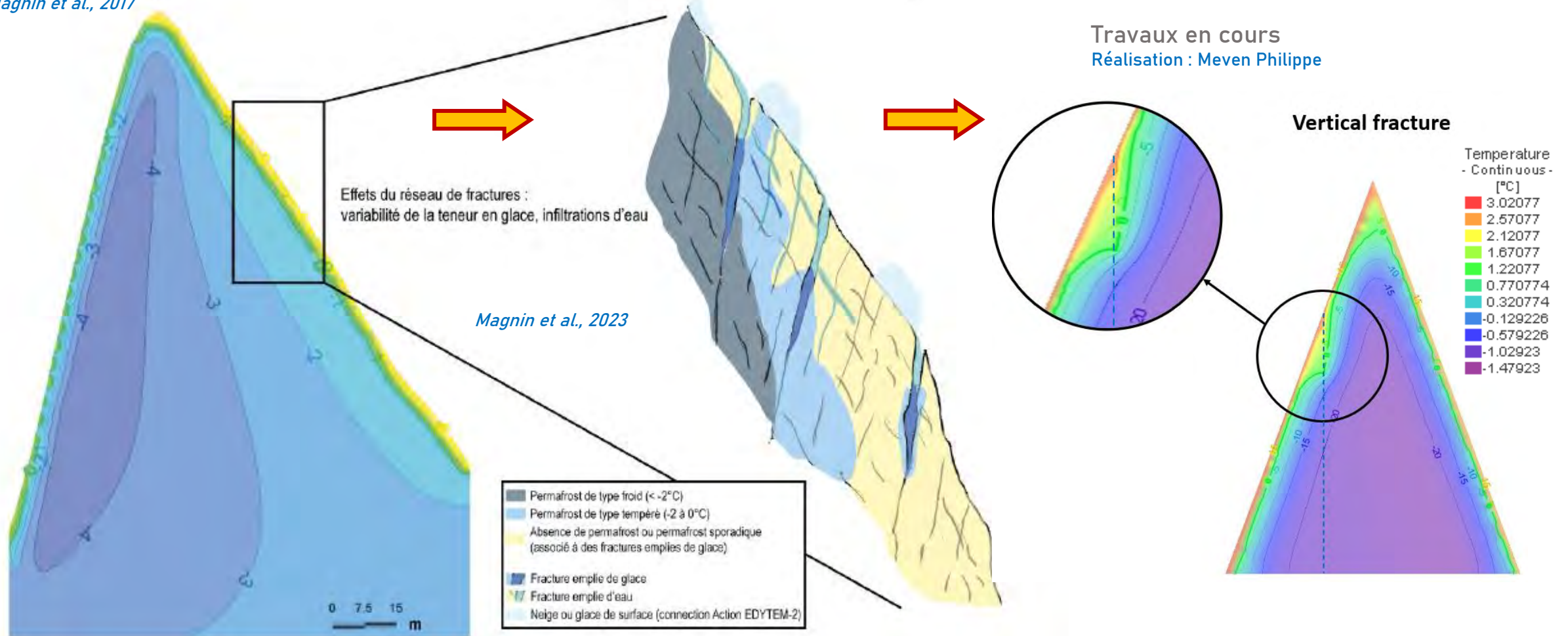
Séminaire PAPROG – 14/11/2025 – Magnin et al.



5) De la spatialisation à la temporalité des écroulements

→ Modélisation numérique (couplage des flux de chaleur et d'eau)

Magnin et al., 2017



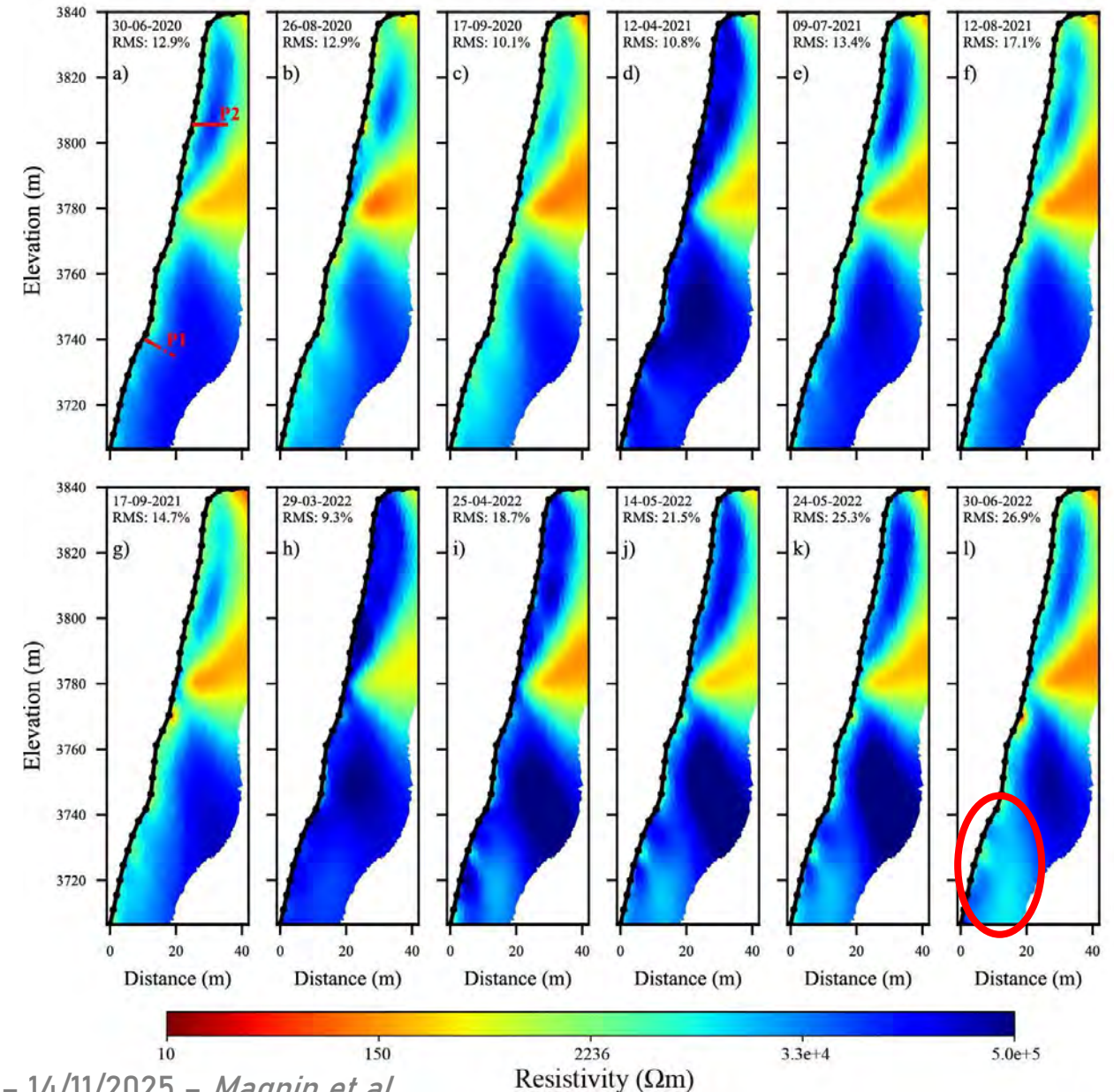
5) De la spatialisation à la temporalité des écroulements

Monitoring de la résistivité électrique

- Dépend de l'état de gel de la roche
- Aiguille du Midi
- Détection des effets des infiltrations d'eau



*AbdulSamad et al.,
in review*

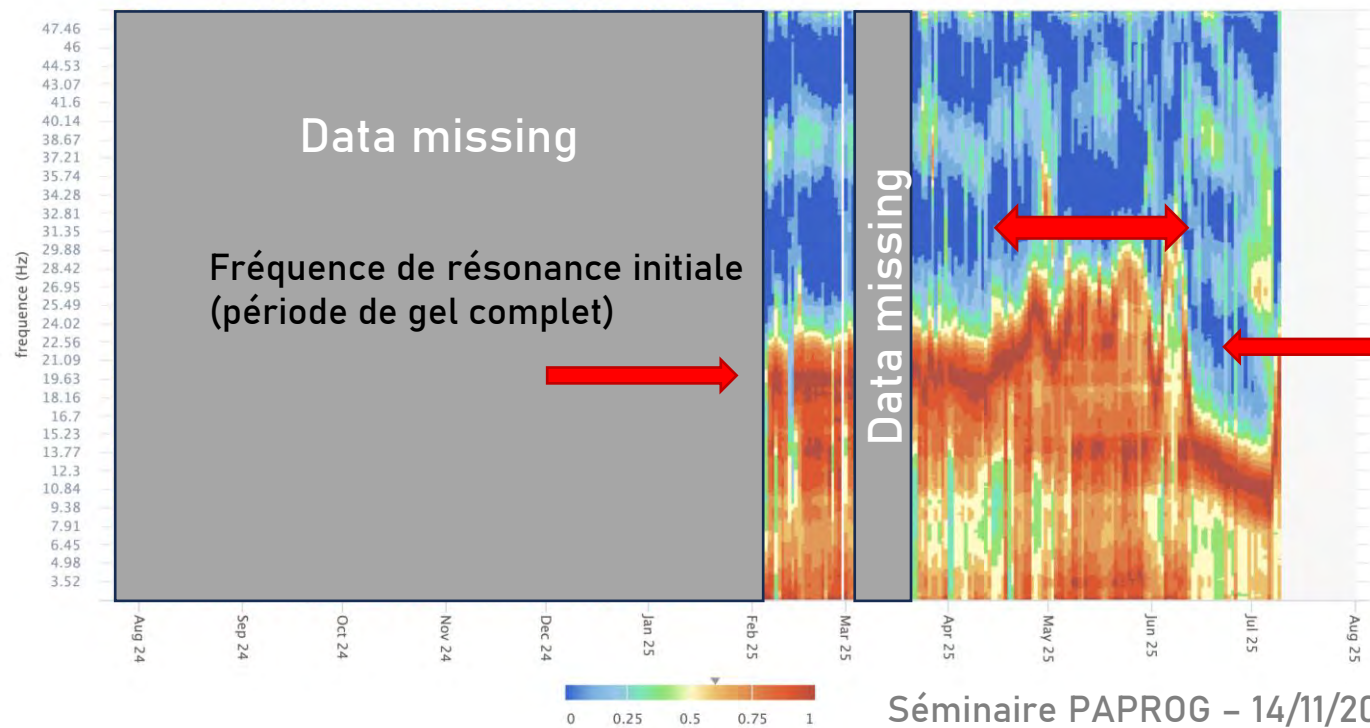


5) De la spatialisation à la temporalité des écroulements

Mesures de sismique passive

➔ Surveillance de la rigidité et de la déstabilisation de l'arête des Cosmiques

Période de gel/dégel ?
15 avril-12 juin



12 juin-7 juillet
Chute de fréquence : infiltration d'eau dans la roche + dégel de la couche active ?

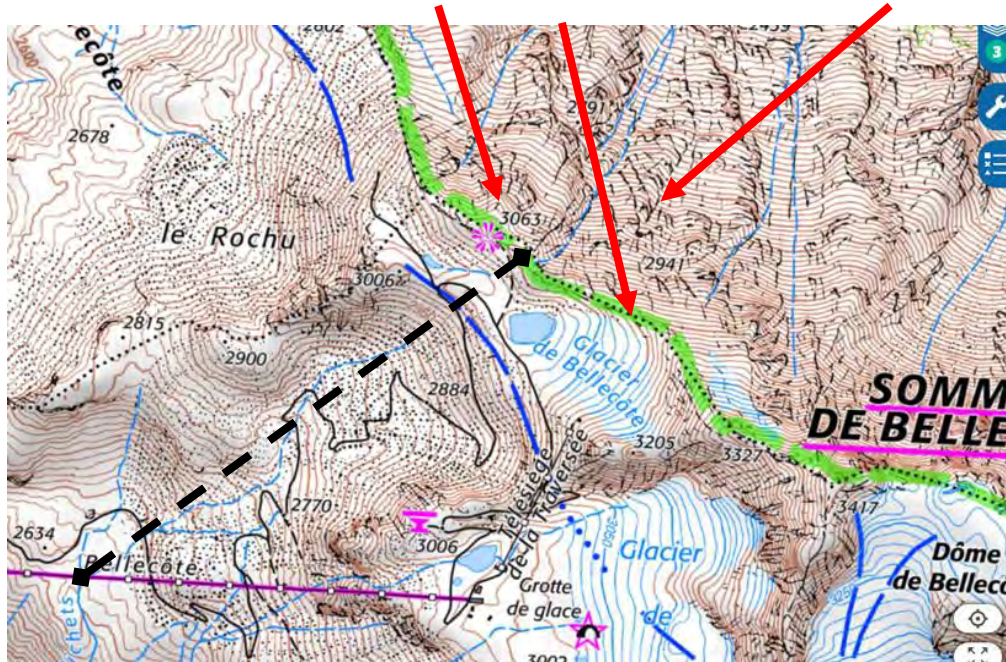
Réalisation : E. Larose et collègues

5) De la spatialisation à la temporalité des écroulements

Mesures de sismique passive

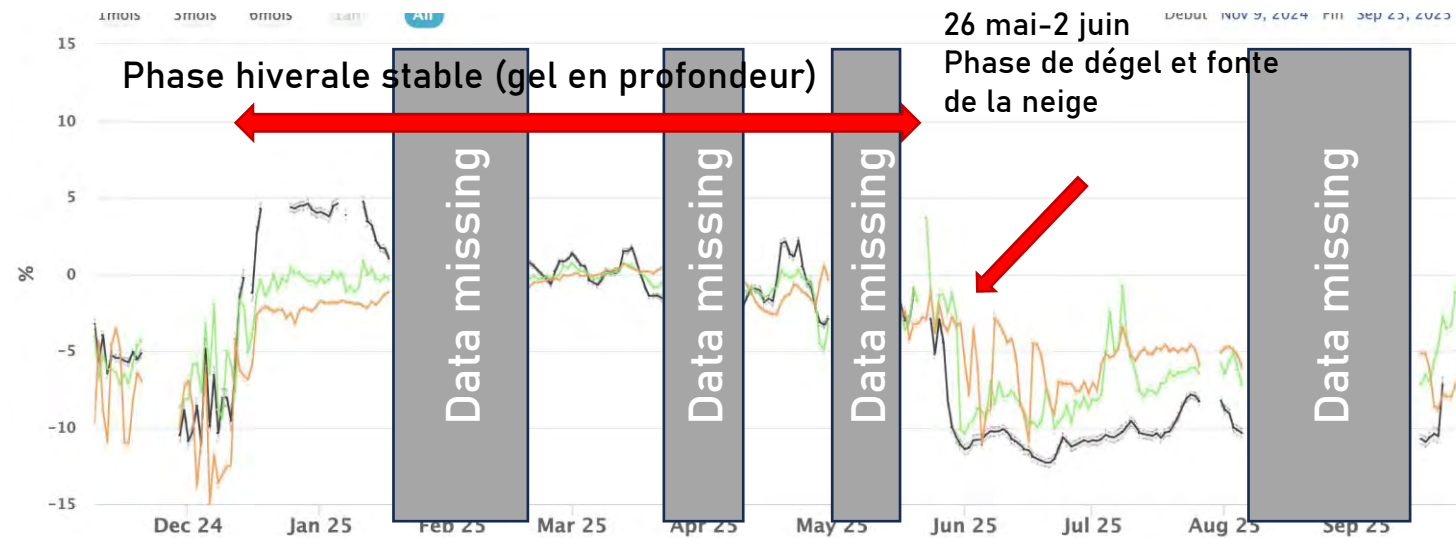
- Face nord de Bellecôte
- Surveillance du bruit de fond

Capteur 1 Capteur 2 Pente rocheuse instable



3-5Hz 4-6Hz 5-8Hz 6-10Hz 8-12Hz 10-14Hz 12-20Hz

5 Hz = ~100 m 10 Hz : ~40 m

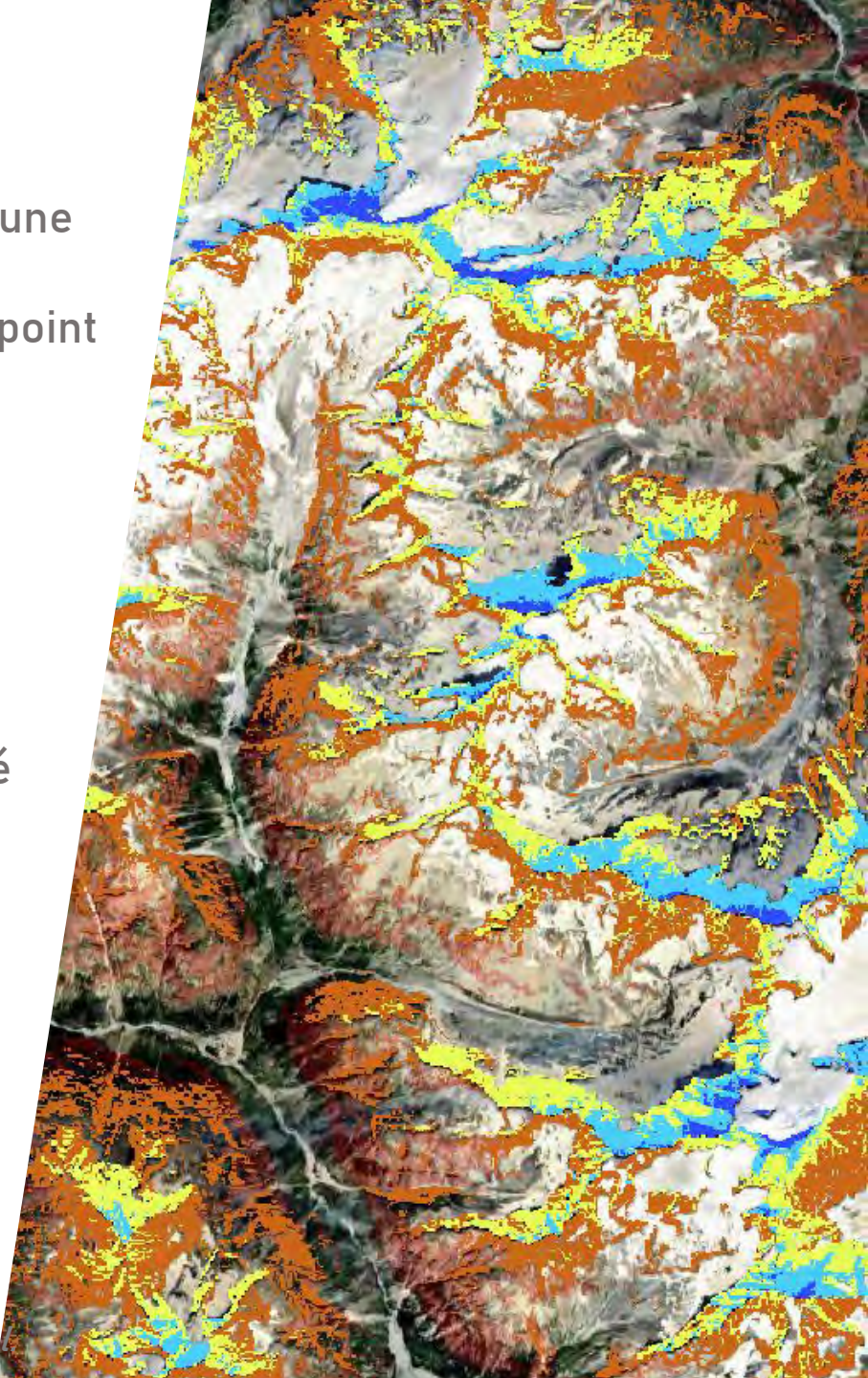


→ A venir : Comparaison aux mesures et modèles de T°C (Edytem)

Réalisation : E. Larose et collègues

A retenir

- Nouvelle carte de permafrost de paroi disponible pour les Alpes Fr. à une résolution de 10 m → M. Cathala
- Outil de calibration automatique de CryoGRID (bilan d'énergie) mis au point → B. Lehmann
- Projet de généralisation de la carte à l'ensemble des Alpes Fr. → 2026-2028
- Cartes des secteurs les plus actifs (écroulements) et des zones de propagation potentielles (outil RockavELA) → M. Cathala, T. Larrue
- En parallèle, travaux pour comprendre les processus et la temporalité des écroulements en contexte de permafrost :
 - modélisation couplant les flux de chaleur et d'eau → M. Philippe
 - monitoring de la résistivité électrique → F. AbdulSamad
 - mesures de sismique passive → E. Larose et collègues



Merci pour votre attention 😊

Questions ?

Florence Magnin

Maëva Cathala, Benjamin Lehmann, Tristan Fribault,
Feras AbdulSamad, Eric Larose, Meven Philippe, Tom
Larrue et la contribution de nombreux collègues

