

Peut-on prédire les changements topologiques à partir de séries Sentinel-2 ?

Bilan et perspectives du projet Glaciomega 2



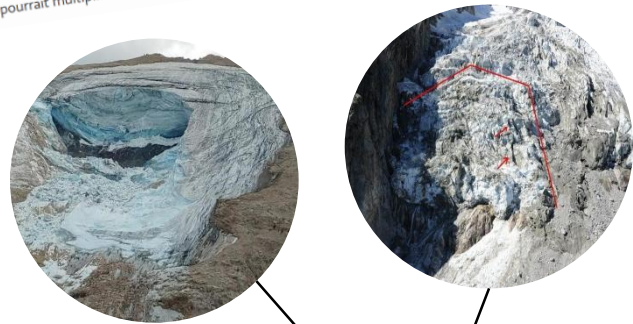
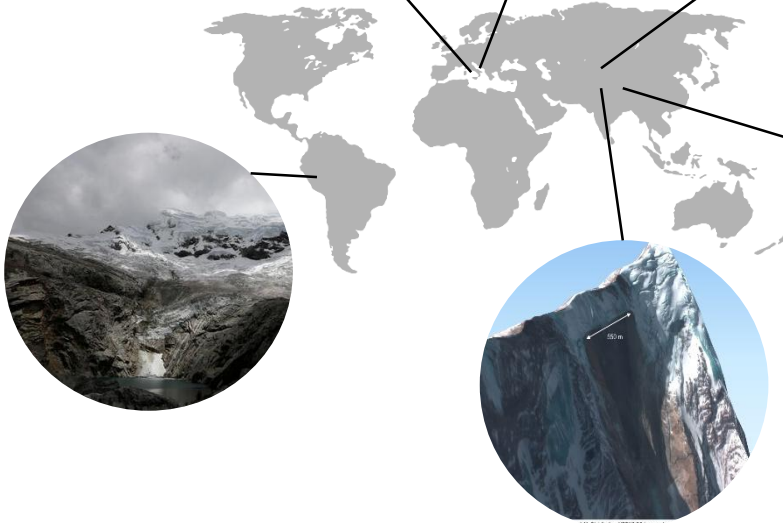
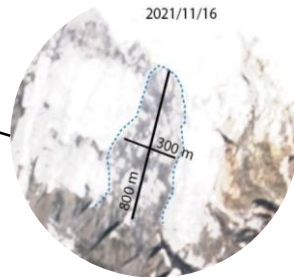
BUSINESS
INCUBATION
CENTRE

Sud
France



Matthias Huss: «Il existe en Suisse de nombreuses situations semblables à celle du glacier de la Marmolada»

Dans les Dolomites, l'effondrement de l'étendue de glace a fait de nombreuses victimes. Pour le glaciologue, le changement climatique pourrait multiplier ces phénomènes, difficiles à prévenir



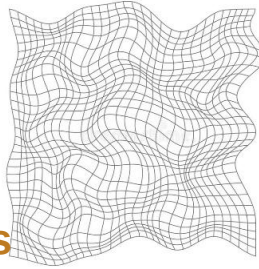
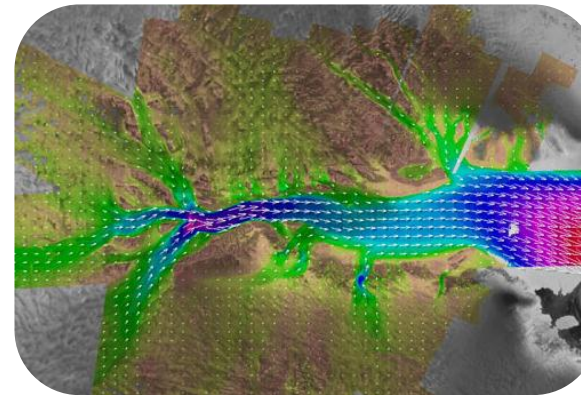
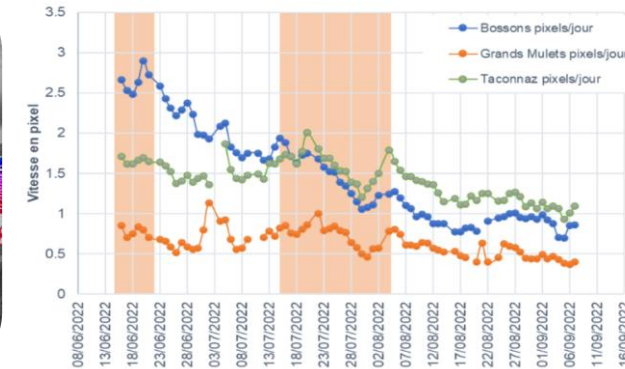
Très peu de glaciers suivis =
connaissances lacunaires des
instabilités

Vitesses de surface = Signes
avant-coureurs d'instabilités

GlaciΩ

Prototype d'un système de surveillance des
vitesse glaciaires

Mesure des déformations glaciaires par
corrélation d'images terrestres + satellites



Sérieux angle mort : l'évolution des volumes

Comment réalise-t-on ce suivi aujourd'hui ?

- Synthetic Aperture Radar (SAR) / Interferometric SAR (inSAR)
 - Naturellement adapté
 - Beaucoup de missions, mais peu d'historique et/ou de disponibilité :
 - Sentinel-1 / NiSAR / TerraSAR-X / TanDEM-X, ICEYE, etc...
 - des difficultés dans un contexte de suivi de glaciers alpins :
 - Masques liés au relief & petites superficies d'intérêt
 - Changements de phase glace/eau/neige + gradients d'humidité
- En optique, souvent utilisée en complément
 - Landsat, Planet, Pléiades neo, Worldview...
 - Sentinel-2 : monoculaire, 10m de résolution en RGB, revisite systématique tous les 5 jours depuis 2015
 - (CO3D : photogrammétrie stéréo, 50cm de résolution, 1m de précision altimétrique, on demand ? Durée de vie prévue = 4 ans)
- Au final, Sentinel-2 pertinente : historique disponible, complémentarité à SAR

Objectif du challenge R&T CNES Glaciomega 2:

Evaluer la capacité de Sentinel-2 à produire directement de la donnée topographique

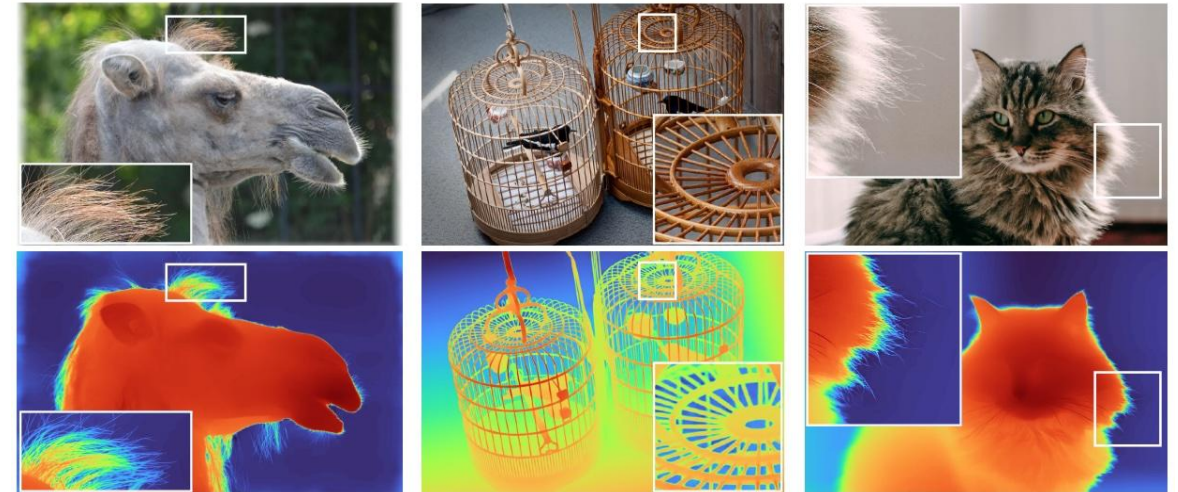
- Impossibilité d'utiliser une pseudo-stéréo multi-temporelle sur Sentinel-2 :
 - Résolution trop limitée
 - Faible inclinaison ($\sim$ parallaxe)
 - Non-accessibilité des données en géométrie capteur (au moins pour grand public)

→ On compte sur l'émergence des modèles d'estimation de la profondeur depuis des images monoculaires

Estimation de profondeur à partir d'images monoculaires ???



Depth Anything v2 (Zhang et al 2024)



Depth Pro (Bochkovskii et al 2025)

Ce projet vise à déterminer les capacités et les limites de cette technologie pour répondre à la question de l'estimation de la topologie à l'aide de Sentinel-2

L'intérêt dépasse le cas du suivi glaciaire, même si on se focalisera dessus

Premier volet de Glaciomega :

Entraînement du modèle ZoeDepth (Bhat et al., 2023)

Entraîné sur 9884 dalles lidar IGN (1000x1000m),
concentrées sur les hauts reliefs

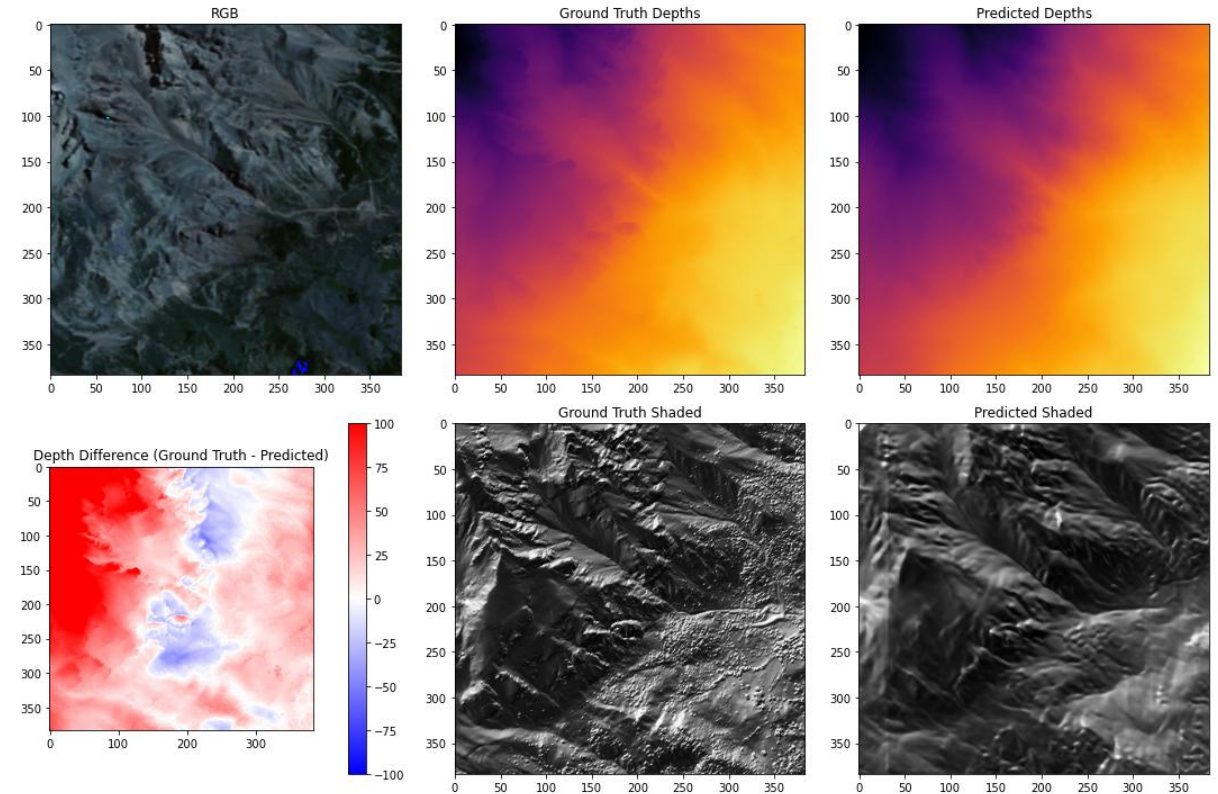
-> **50 à 60 mètres de RMSE** en fonction des tests

Malgré tout prometteur :

- bonne restitution de la topologie localement
- si on guide avec une référence, on peut être optimiste
- Hypothèse générale : se base sur les ombres portées et les différences d'éclairage pour estimer la topologie

Néanmoins :

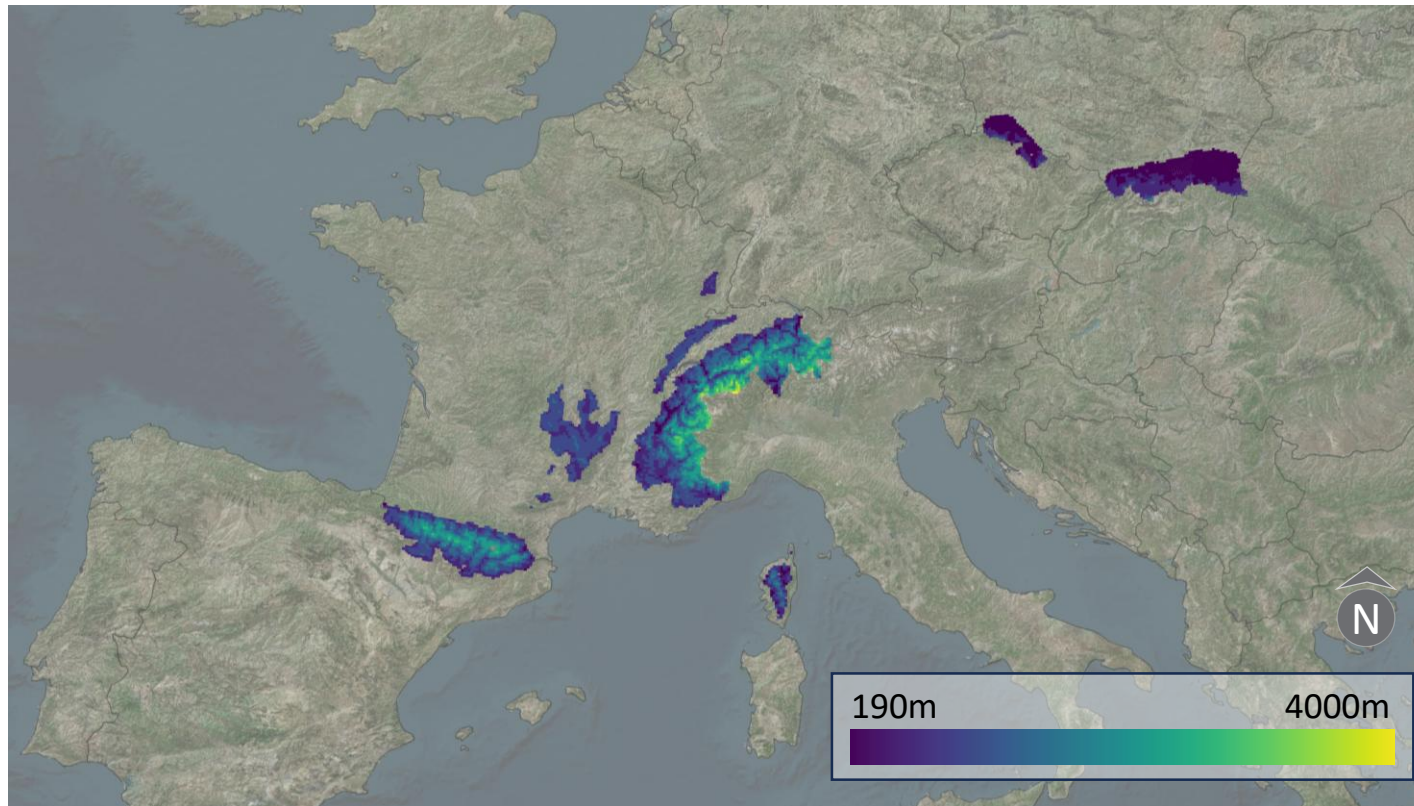
- peu de chances de pouvoir exploiter un réseau pré-entraîné (imagerie terrestre comme satellite)
- On sera forcément très dépendants de la donnée collectée : qualité & quantité



Première étape de Glaciomega 2 : Création du jeu de données topo + S2

Disponibilité de la donnée LiDAR : on se concentre sur les Alpes, les Pyrénées, les autres massifs français et Pologne

→ **146 280.3 km² au total** : La France représente la plus grande couverture (60 080.5 km²), suivie par l'Espagne (32 984.2 km²), la Suisse (27 955.8 km²), la Pologne (25 256.8 km²)

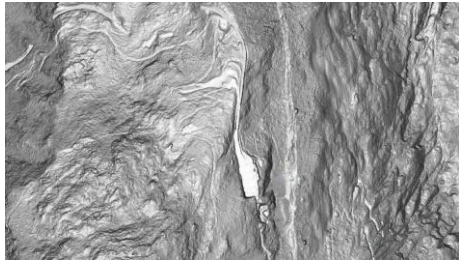


Donnée Topographique

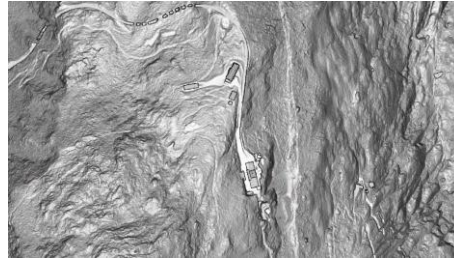
- **LiDAR aérien comme vérité terrain** : MNS mono/multi-temporel de couverture locale [<1 m/pxl]
Plusieurs mois de traitement non-stop pour harmoniser et dater précisément les levés
Utilisation du 95ème percentile le plus élevé pour conserver du détail sur le relief



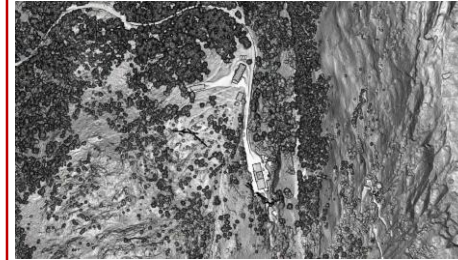
Ortho 20cm IGN



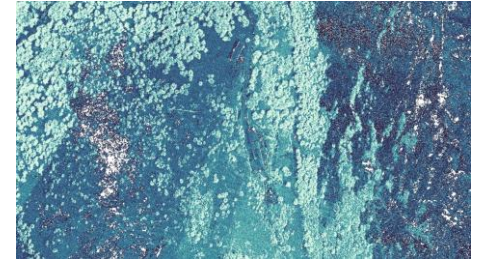
MNT



MNT + Bâti



MNS



Densité de point sur le MNS

- **Glo-30 pour guider le modèle comme canal d'entrée** : MNS mono-temporel de couverture mondiale [30 m/pxl]
Sentinel-2 L2A = produit géoréférencées et orthorectifiées grâce au MNS Copernicus GLO-30
→ reprojété à MNS constant : induit des erreurs de projection potentiellement significatives en cas de changement topographique

Donnée Sentinel-2

Recherche d'un équilibre entre quantité d'information et complexité

Utilisation du produit **L2A comme canaux d'entrée** : bandes exprimées en réflectance de surface après correction atmosphérique (pour éviter au modèle d'avoir à intégrer cette dernière)

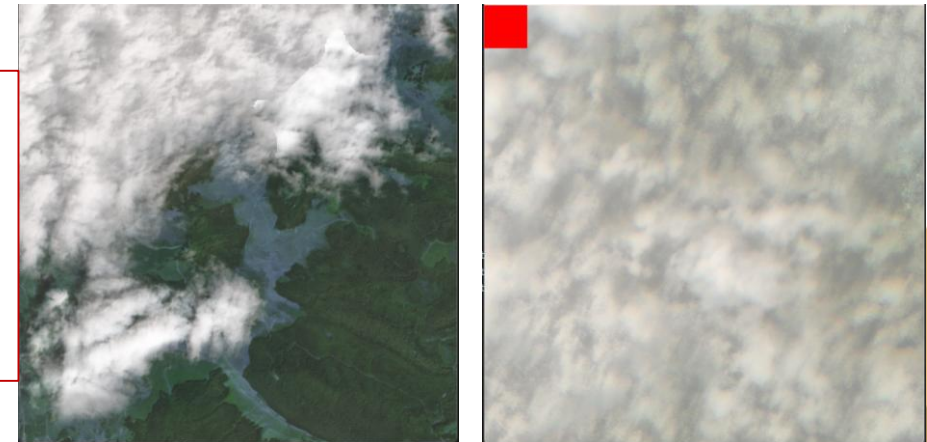
Sélection des bandes :

- **2, 3, 4** [10m/pxl] : Spectre du visible
- **8a** [20m/pxl] et **9** [60m/pxl] : proxy épaisseur de l'atmosphère (Hagolle)
- **11** [20m/pxl] : désambiguer données RGB sur distinction neige/nuages

Sélection de la temporalité (pour l'entraînement) :

- 14 jours d'écarts maximum entre le levé lidar et l'acquisition Sentinel-2 : différence topo/S2 probablement acceptable

Filtrage semi-automatique sur les artefacts et couvertures nuageuses trop importantes :
Donnée brute : 120 446 images
-> Après nettoyage : 98 708 images



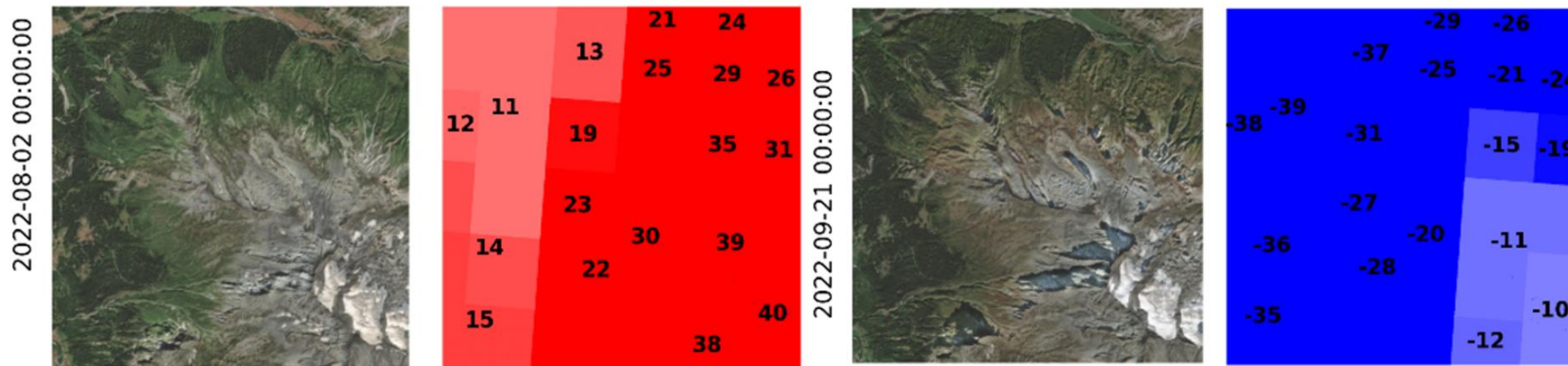
Comment harmoniser la donnée?

- Système géodésique : projection UTM / WGS84 des bandes Sentinel-2 et altitude EGM2008
- Interpolation des données à 10m/pixel, sur des emprises de 5120x5120m, sans découpe de pixel

Quel cadre temporel ?

Création de cartes d'écart de temps entre Lidar / Sentinel-2

→ Vont servir de masques et/ou coefficient pendant les entraînements

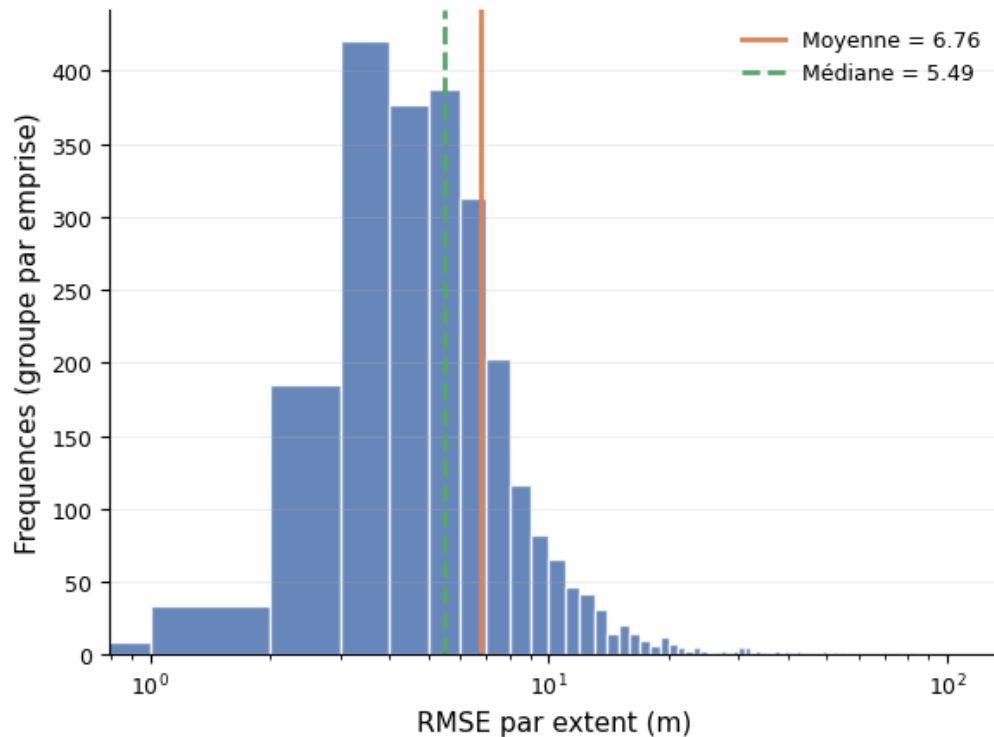


Partition train/validation permettant de vérifier généralisation temporelle / faciès géomorpho

Métrique d'évaluation et erreur du Glo-30

Pour valider les entrainements, un calcul du score RMSE est réalisé sur les zones avec un écart de temps maximum de 3 jours

Sur ces données, le RMSE du Glo-30 est de **6.76 m** <= c'est cette erreur que l'on souhaite corriger

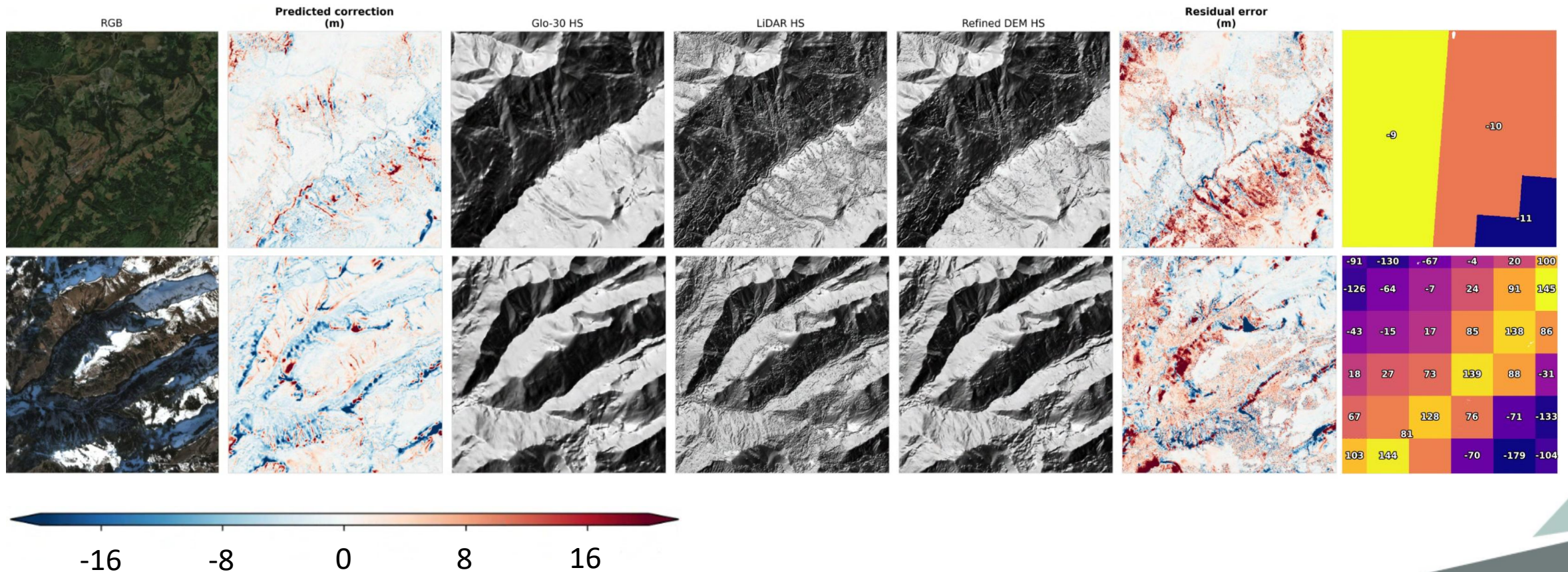


$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{|\mathcal{V}|} \sum_{i \in \mathcal{V}} (\hat{y}_i - y_i)^2}$$

Entraînement : modèle de référence (baseline)

Entraînement d'un modèle de référence :

- Modèle simple de type U-Net
- Donnée conservatrice : on ne s'entraîne que sur les zones avec un écart de temps max. de 3 jours
- Ce premier modèle permet de faire baisser la RMSE à **5.52 m**



Ce qui a marché : Approche Bayésienne

Objectif : le réseau prédit son incertitude de manière auto-supervisée.

Le réseau produit 2 sorties : $\hat{y}$, qui est la correction à appliquer au GLO30, et $\log(\hat{\sigma})$ son incertitude.

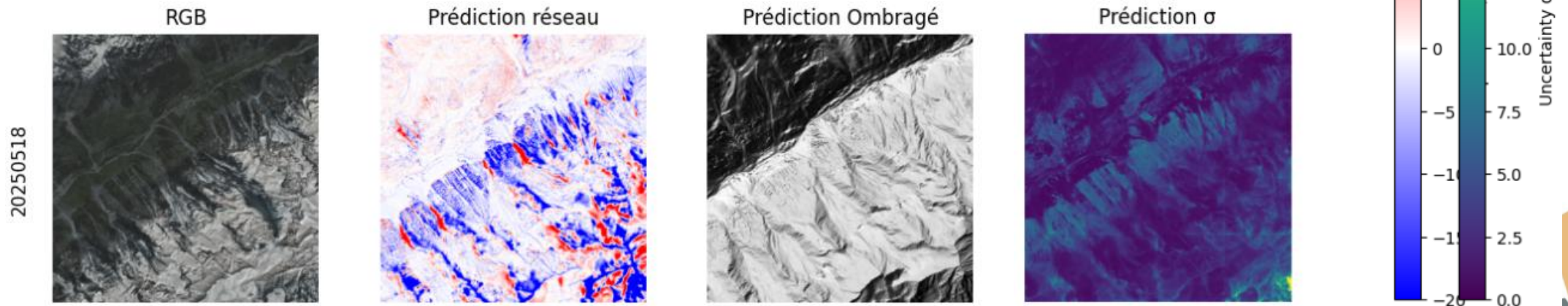
En d'autres termes, on demande au réseau d'inférer une distribution (valeur centrale, variance)

En suivant une hypothèse de distribution Laplace:

$$\mathcal{L}_{\text{Laplace}} = e^{-\log \hat{\sigma}} \cdot |y - \hat{y}| + \log \hat{\sigma}$$

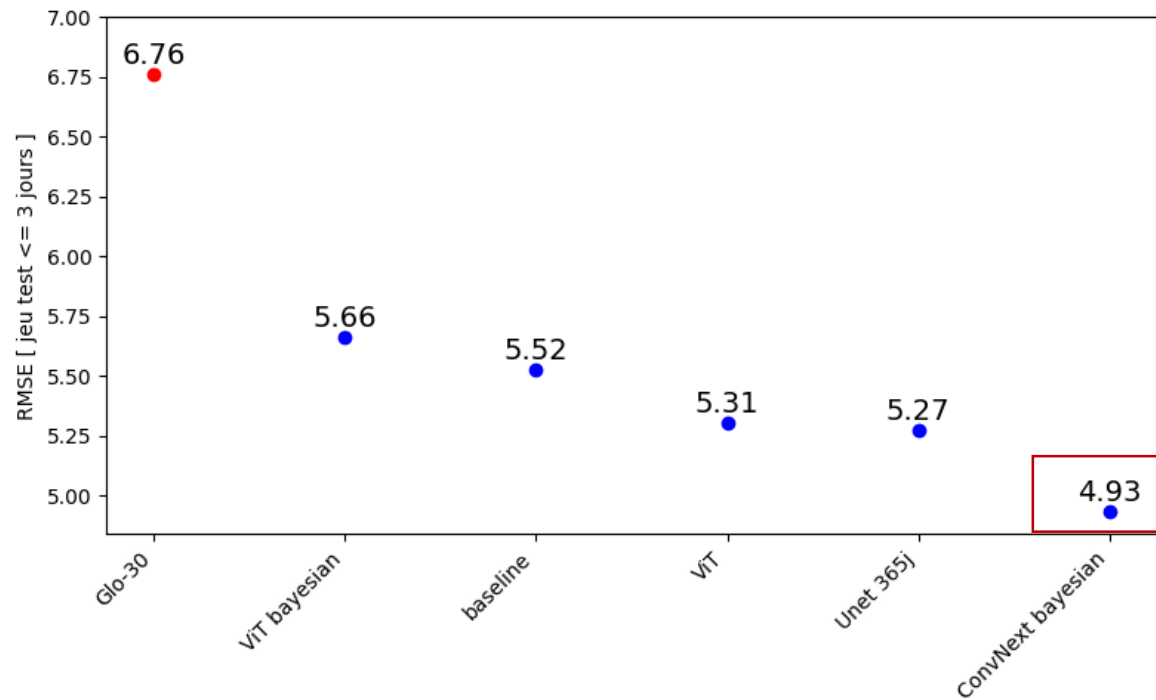
Premier terme : auto-régulation sur les erreurs ; 2nd terme : éviter seulement une carte d'erreurs élevées

On a réussi à stabiliser l'entrainement en étant attentif à la cohérence dimensionnelle des termes de valeur centrale et de variance



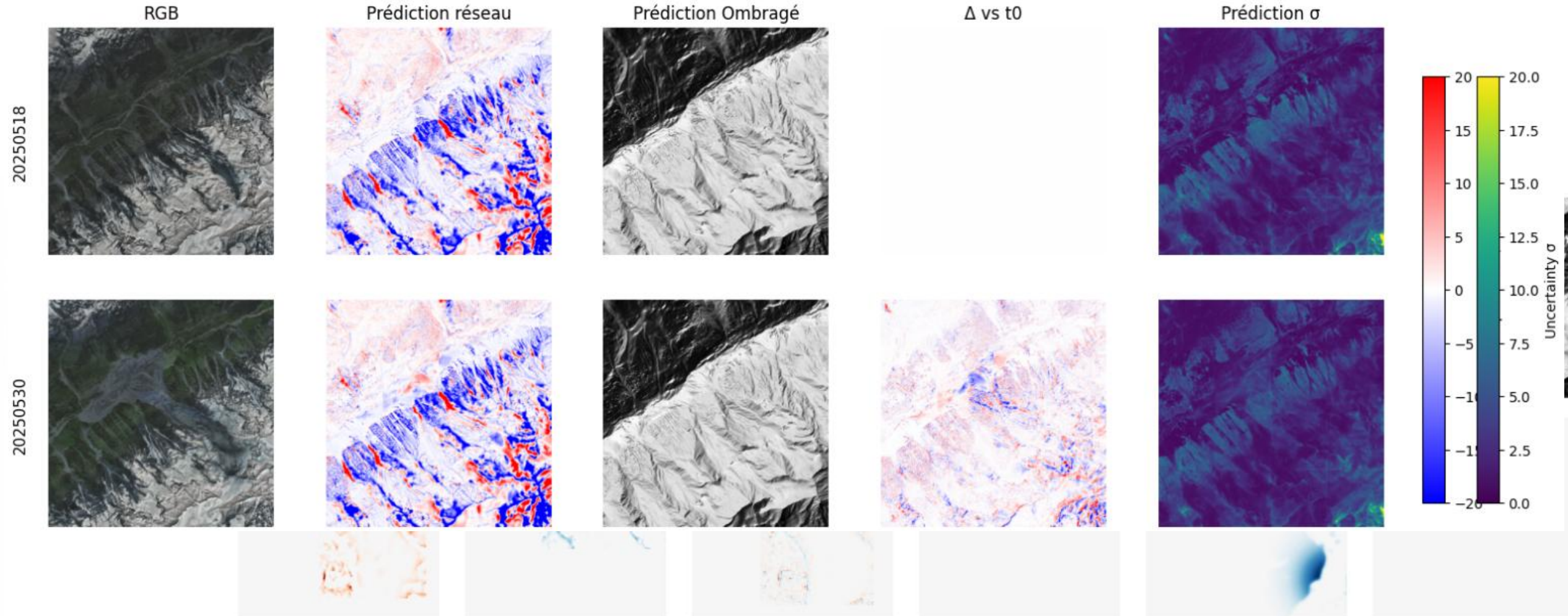
Ce qui a marché : architecture de type ConvNext + DPT

Changement d'architecture avec un réseau à convolutions plus moderne que le U-Net baseline : **ConvNeXT**
(Attention à la normalisation des canaux en entrée)



Ce qui a fonctionné : augmentation de données sur le GLO-30 d'inspiration physique

L'analyse des résultats montre que le réseau fait trop confiance au Glo-30 (il se comporte plus comme une super-résolution), et peine à inférer des changements réels plurimétriques



Entrainement Multi-temporel modèle de type ConvNext + temporal DPT

ConvNext

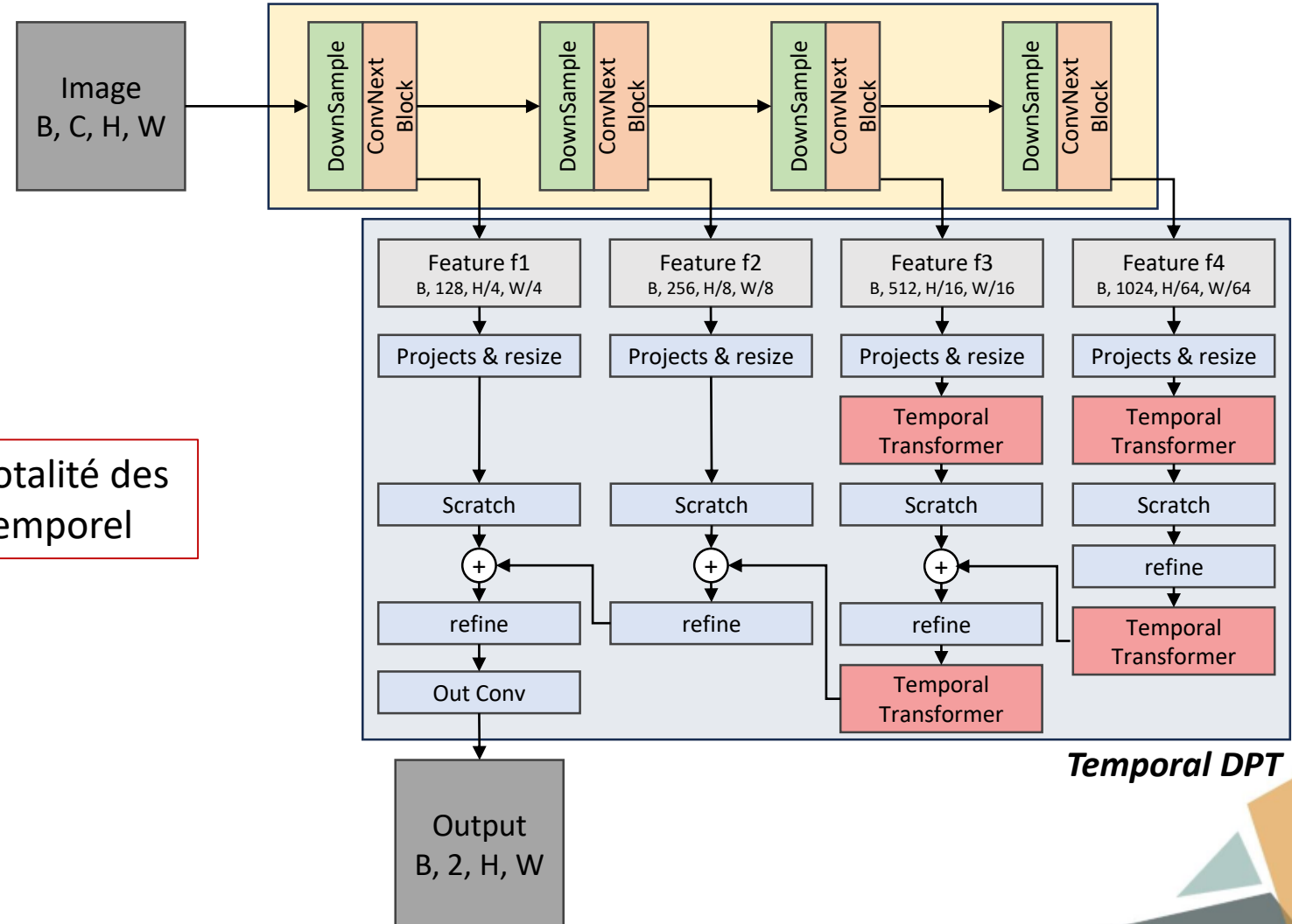
On souhaite mesurer des changements topo.
On regarde les séries temporelles d'images satellite, on veut que le réseau intègre une notion de cohérence temporelle

On s'inspire du modèle Video Depth Anything :
ViT + DPT avec couche d'attention temporelle

Avantage : On peut conserver la totalité des poids déjà entraînés en mono temporel

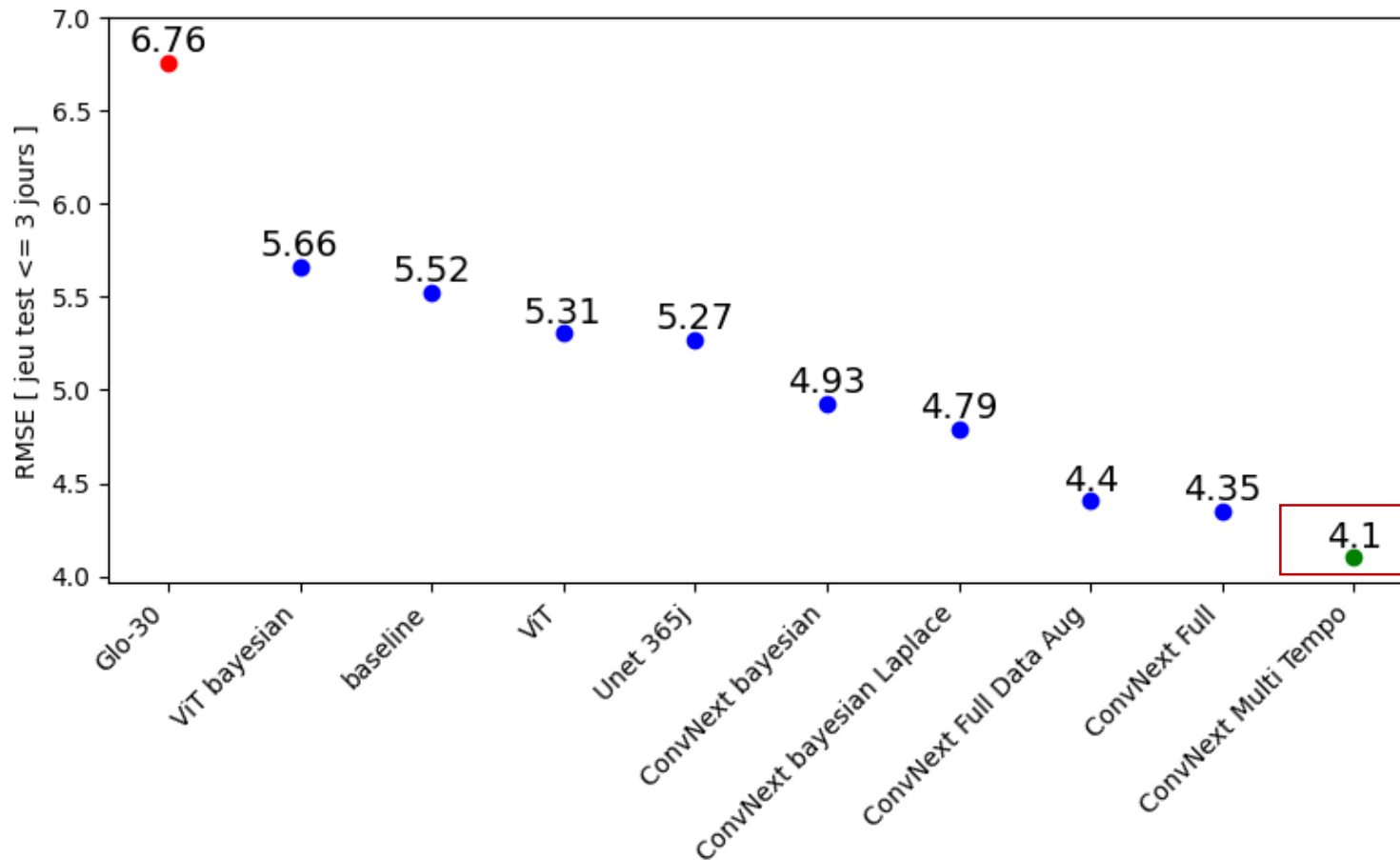
Beaucoup d'adaptations parmi lesquelles :

- Encodage saisonnier
- Renforcement de la cohérence temporelle....



Entrainement Multi-temporel Validation

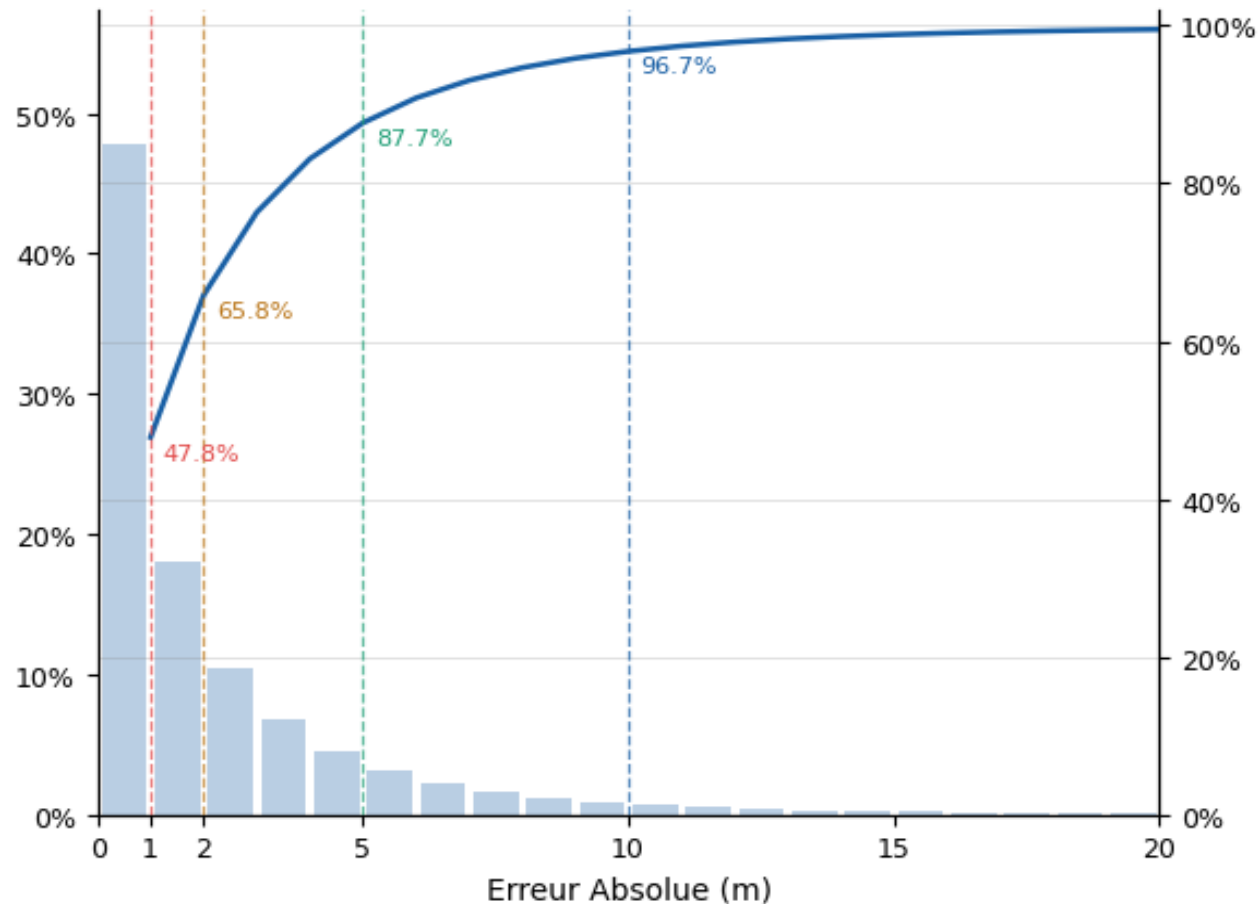
Les scores obtenus oscillent entre 4.10 et 4.15 m



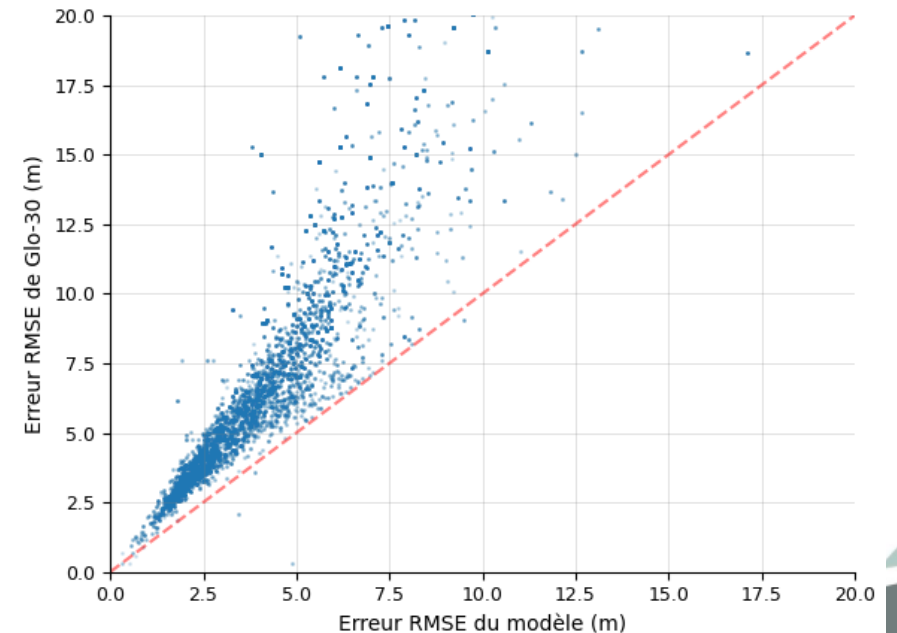
Résultats jeu de validation

Réduction de 39% de la RMSE par rapport au GLO-30. La MAE passe de 4,14 m à 2,48 m. Erreur moyenne quasi nulle : le modèle ne présente pas de tendance à sur ou sous-estimer l'altitude de manière globale

	RMSE (m)	MAE (m)	ME (m)
GLO-30	6,76	4,14	-0,90
Modèle	4,10	2,48	-0,017



L'évaluation montre que sur le jeu de validation, 47.8% des erreurs sont inférieures à 1m, et 87.7% sont inférieures à 5m





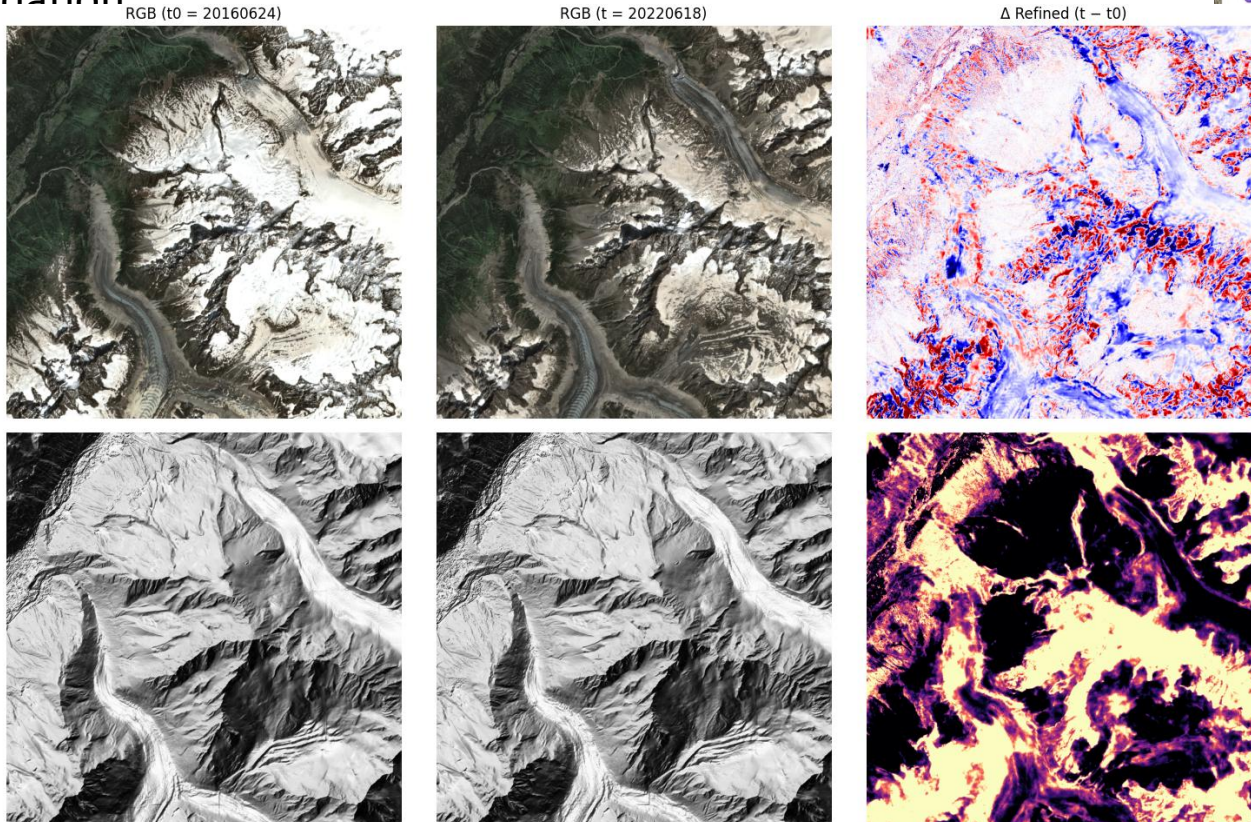
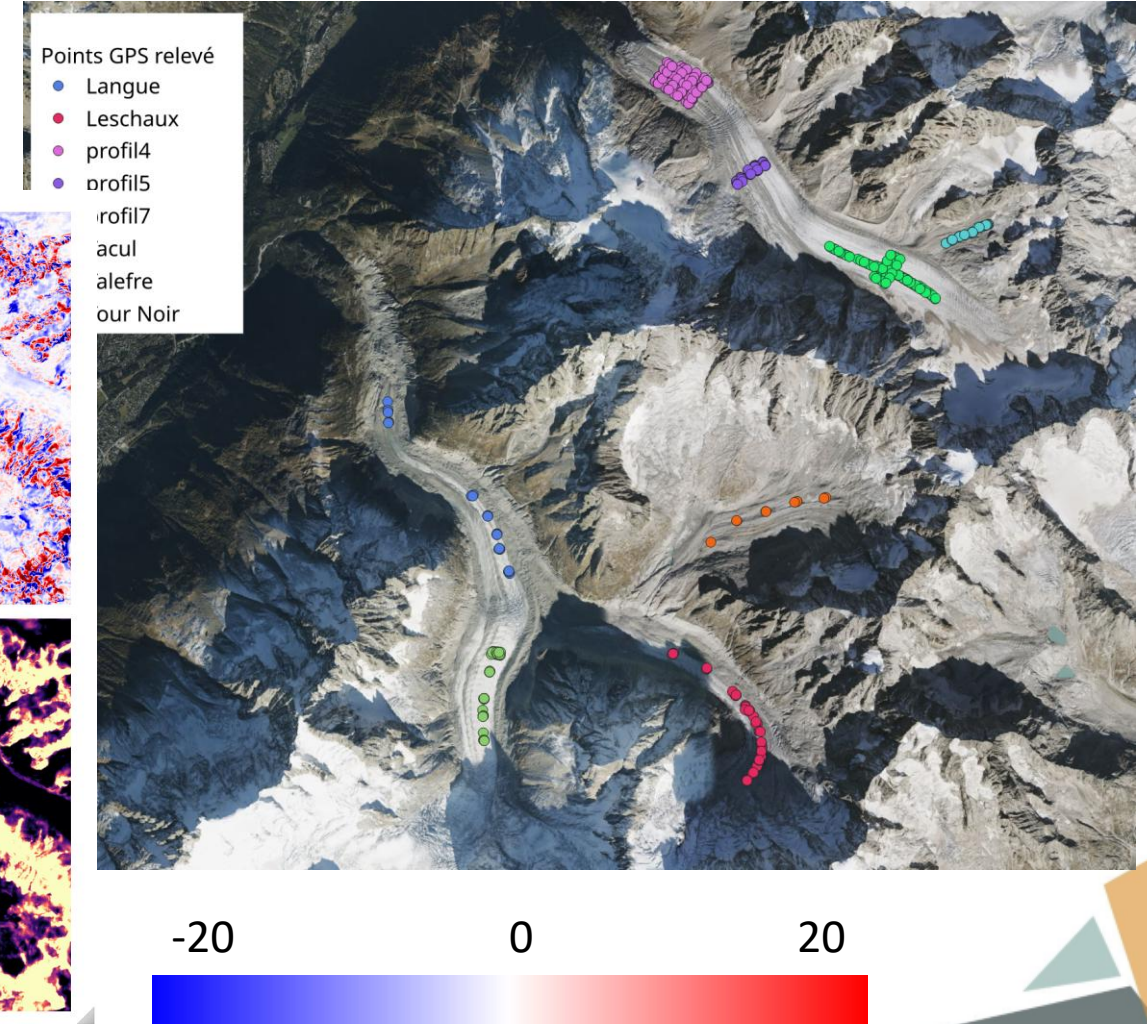
Comparaison à des données Topo de terrain

On a exploité les données **Glacioclim** sur la mer de glace et le glacier d'argentière entre 2016 et 2022 comme validation

→ le
pon

Don
Con:
entr

A n
dan:



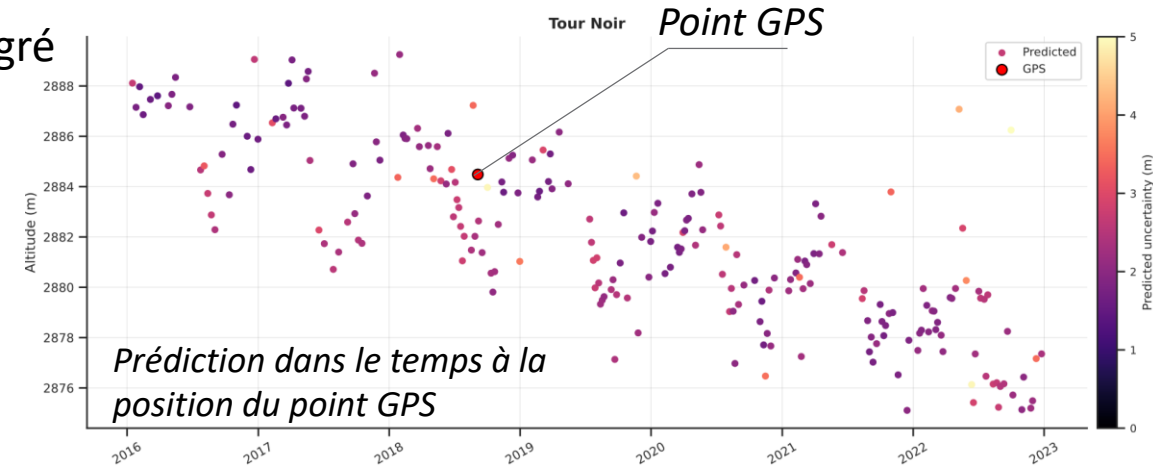
Résultats sur Glacioclim

Analyse ponctuelle : un point constant dans le temps

→ le réseau restitue un cycle saisonnier accumulation/ablation, malgré la faible proportion de données LiDAR acquises en hiver

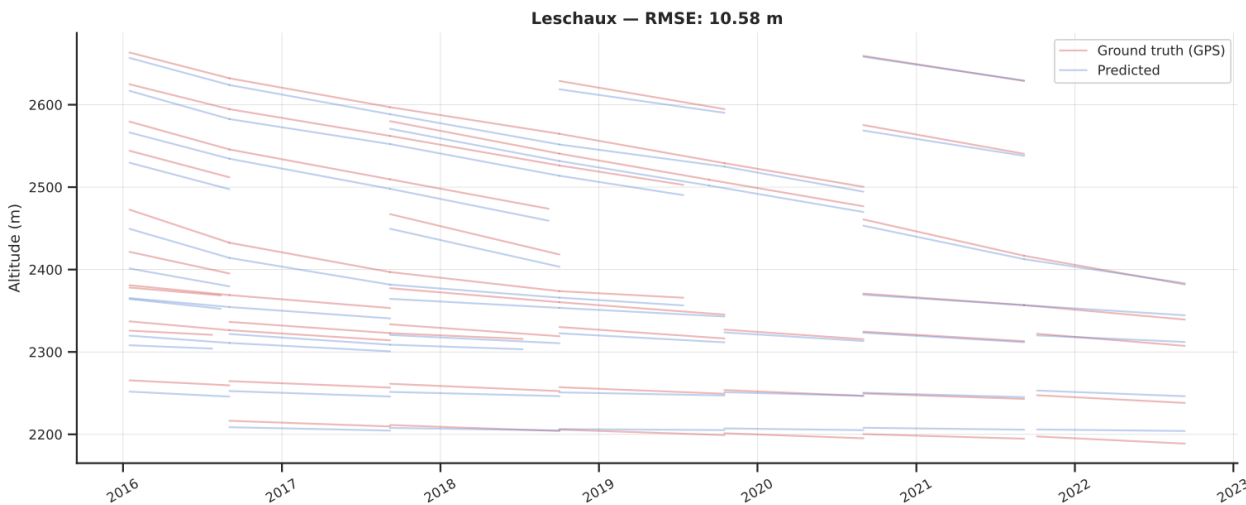
Analyse des traces GPS : un offset net (RMSE de 9.48 m), mais des tendances similaires

Différentiel d'altitude départ/arrivée : **RMSE à 3.45m**

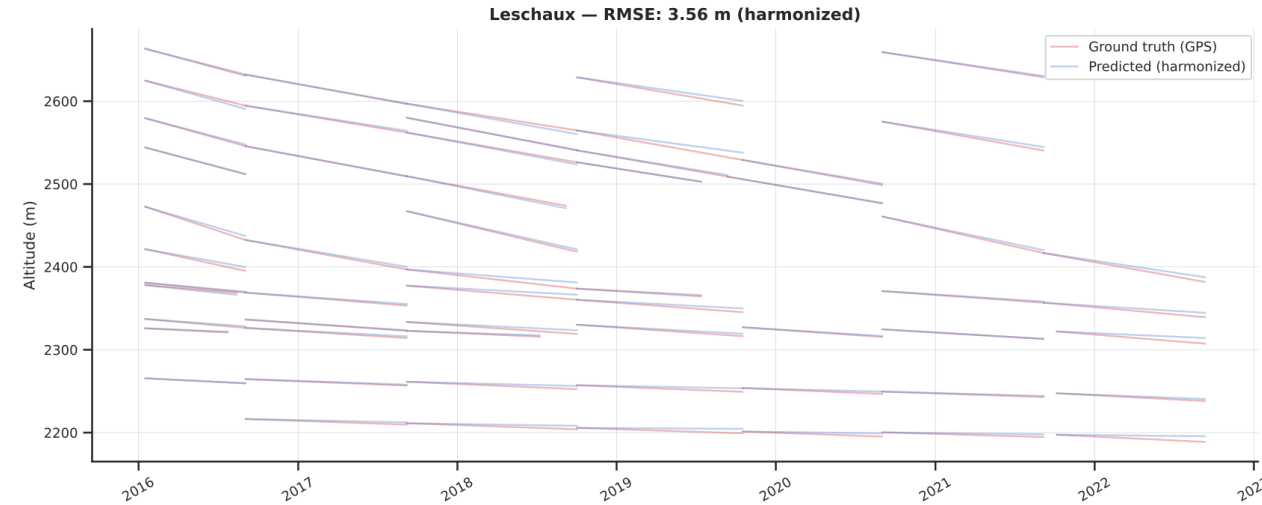


Rouge : Trace GPS dans le temps

Bleu : Altitude à la position des traces GPS



Harmonisant du point de départ



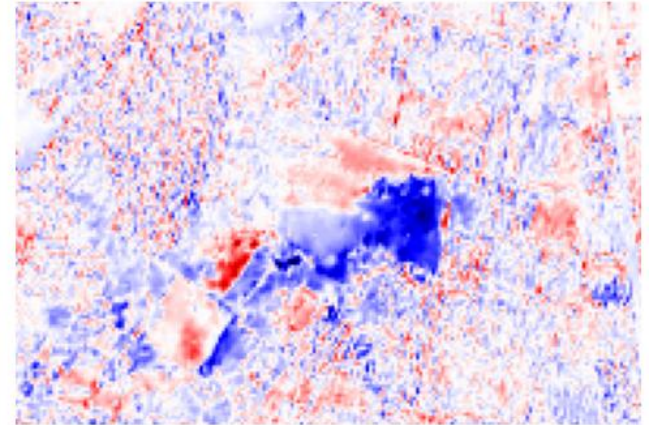
Exemples qualitatifs : cas d'application

Prétraitement : **coregistration** des bandes dans le temps
Sans coregistration, bruit de mesure qui peut être important

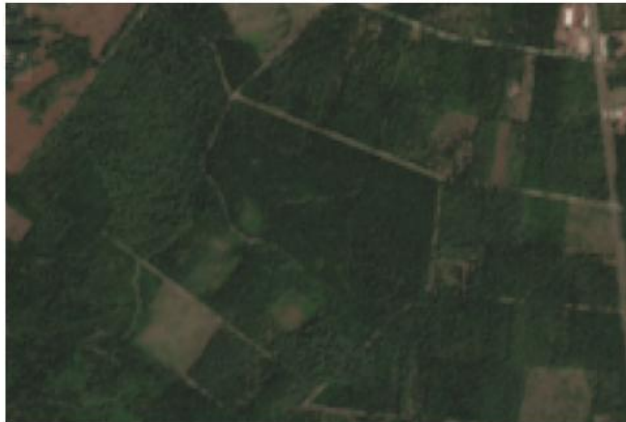
Exemple : incendie

RGB (t₀ = 20220717)

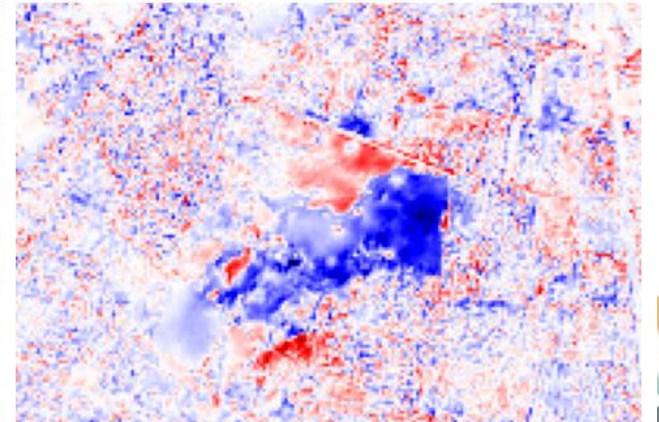
RGB (t = 20220806)

 Δ Refined (t - t₀)

+

RGB (t₀ = 20220717)

RGB (t = 20220811)

 Δ Refined (t - t₀)

Zones de conflit

Konarak (Iran)

Bombardement d'un hangar drone

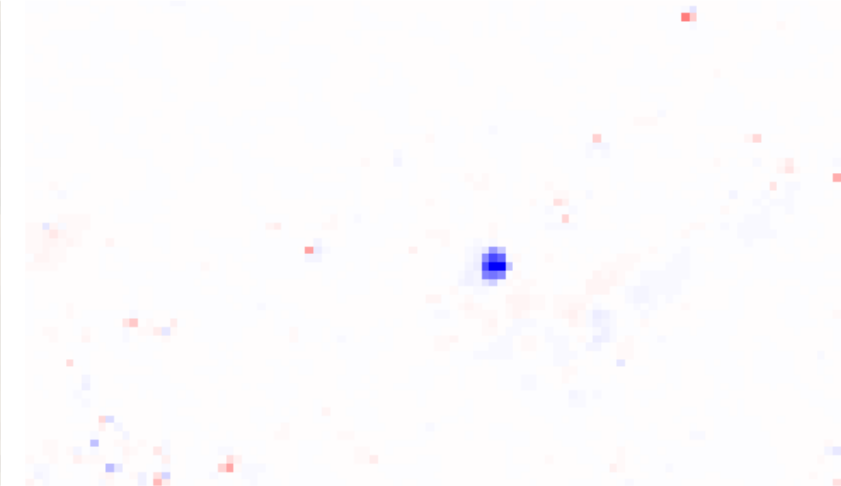
RGB (t₀ = 20260215)



RGB (t = 20260307)



Δ Refined (t - t₀)



-10

0

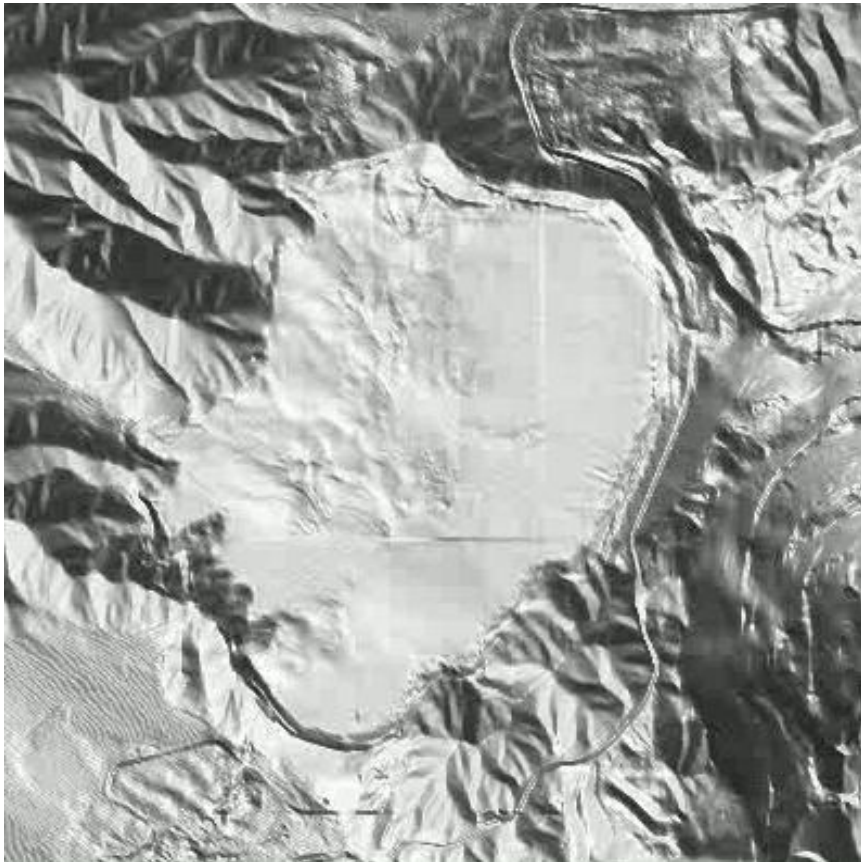
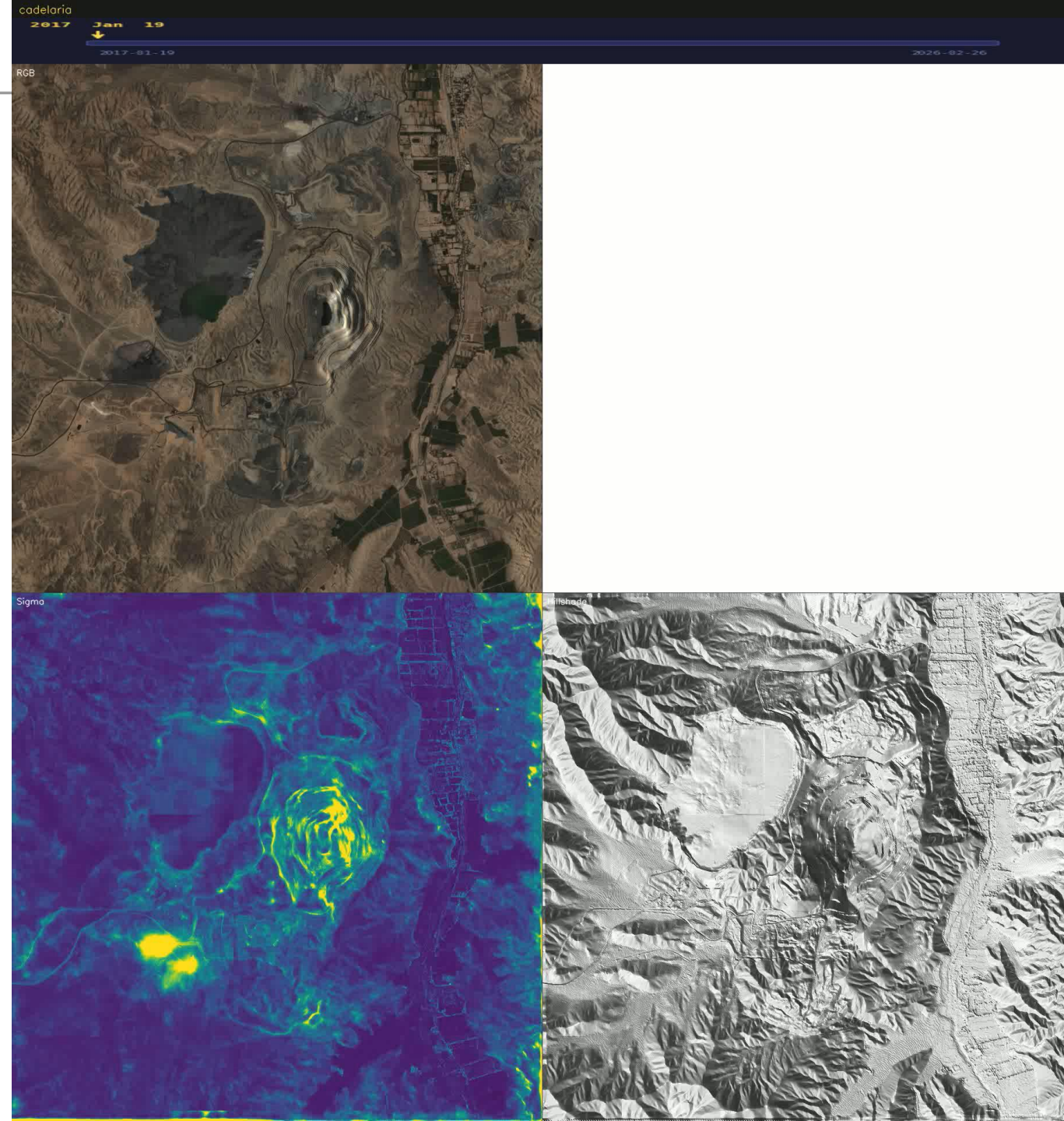
10





Mine à ciel ouvert

Cadelaria (Chili)



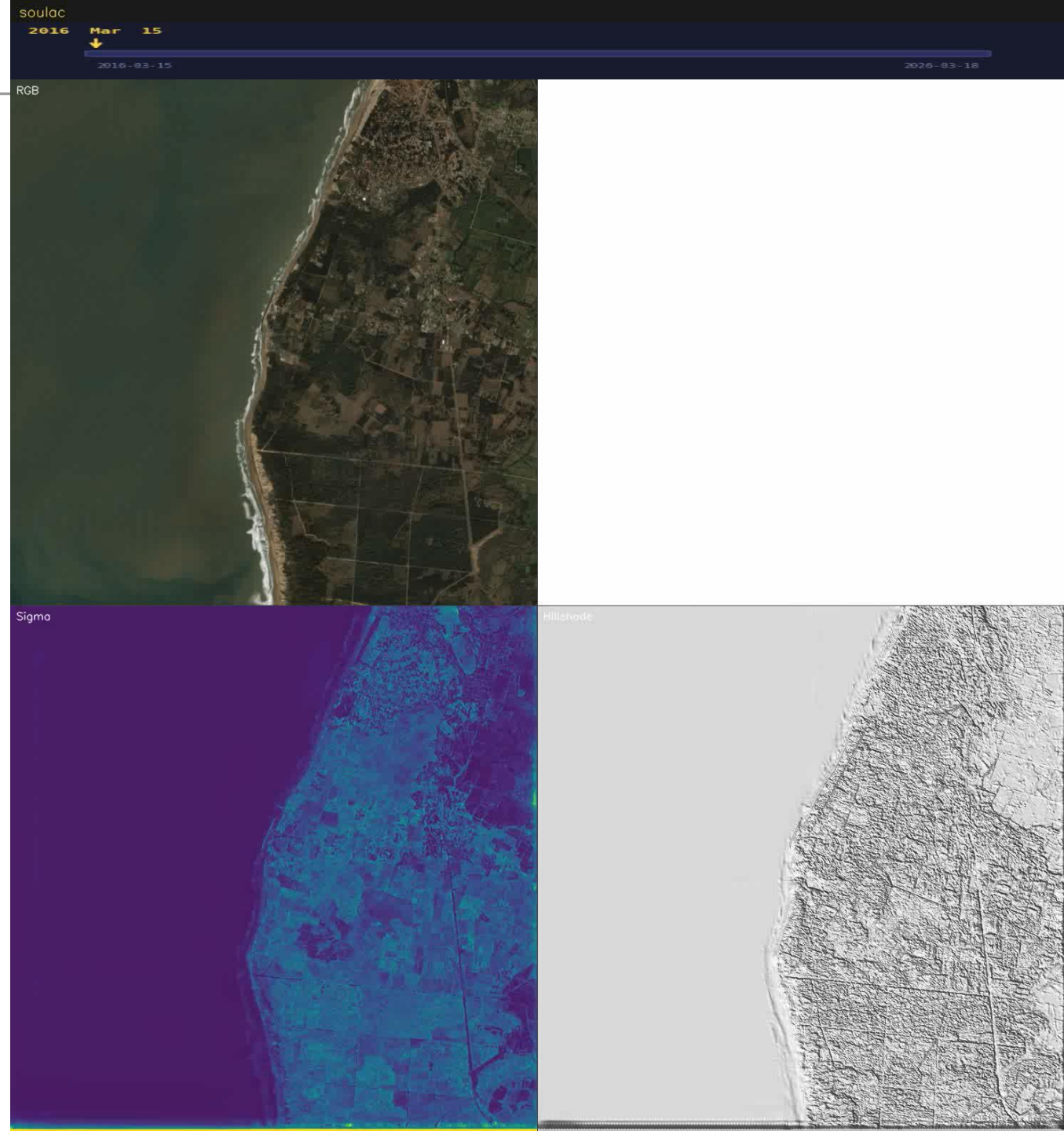


Glaciomega 2 : Résultats

Recul trait de côte

Soulac-sur-Mer

On observe bien l'érosion cotière



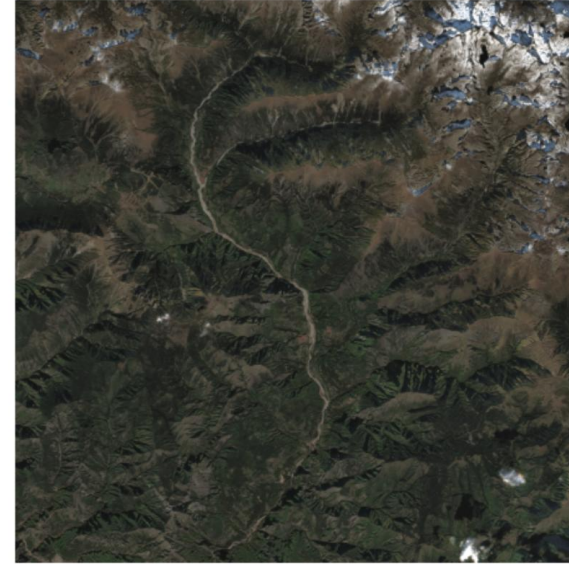
Evènement important

Tempête Alex : Bilan mitigé
Le réseau prédit surtout de
l'érosion

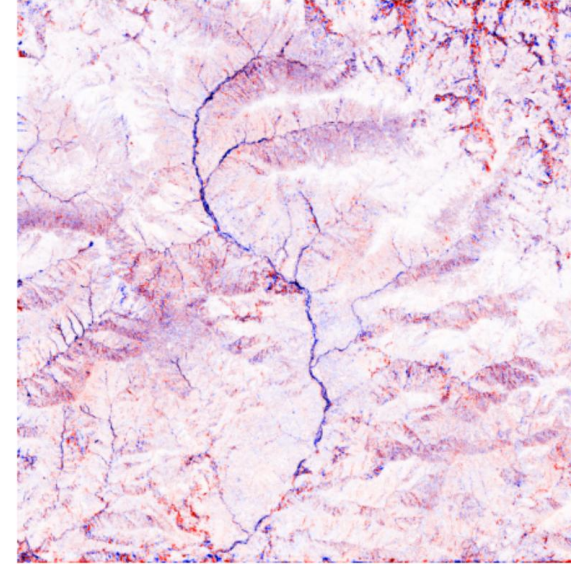
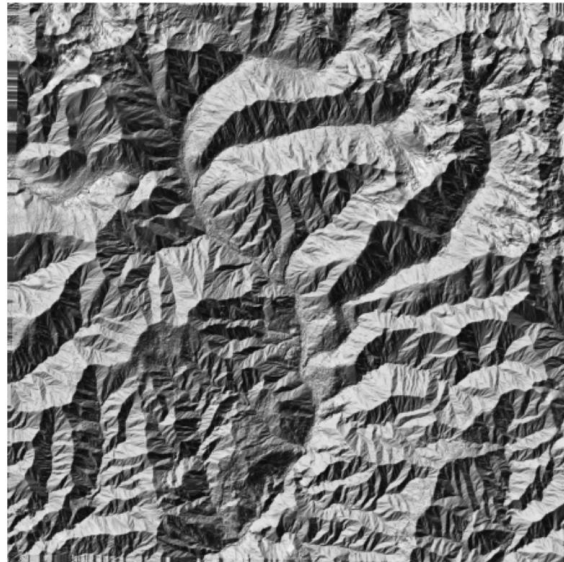
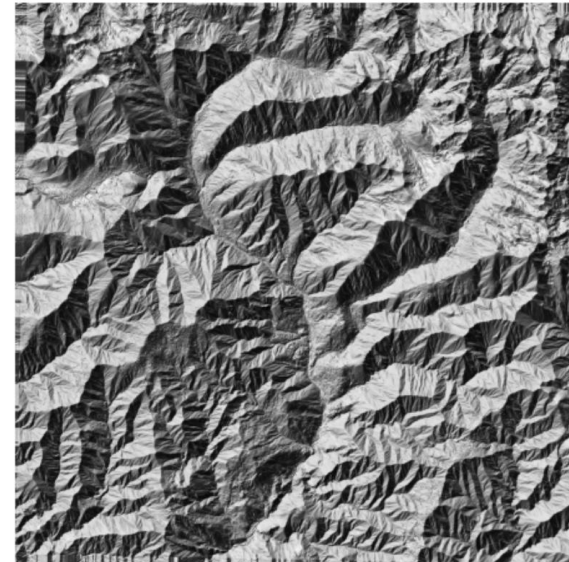
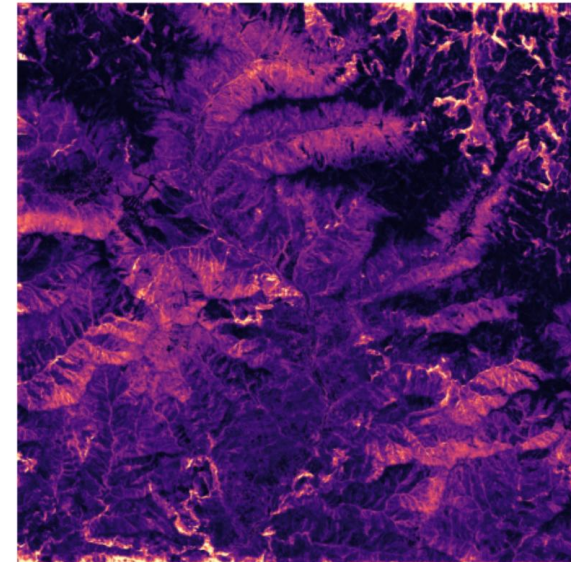
RGB (t0 = 20200928)



RGB (t = 20201013)



Δ Refined (t - t0)



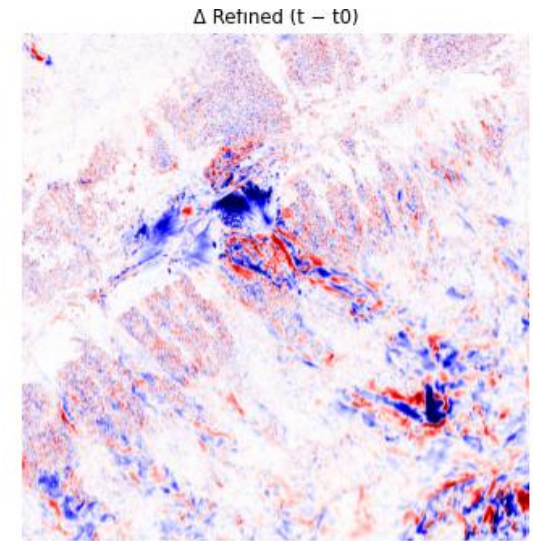
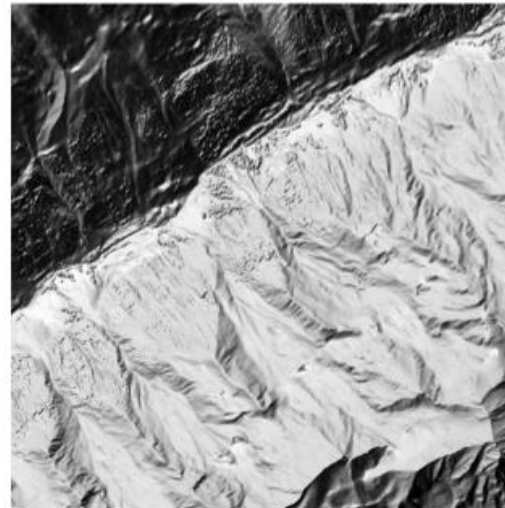
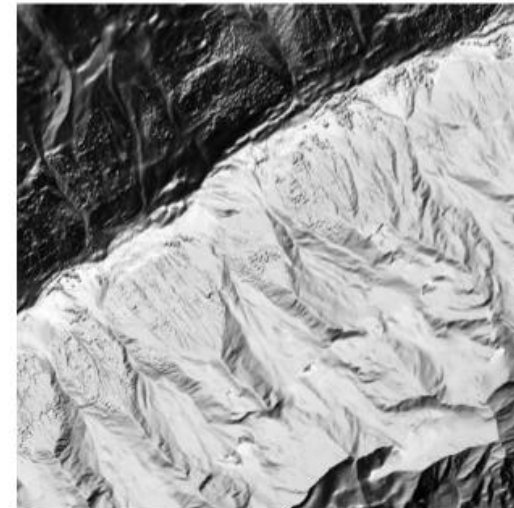
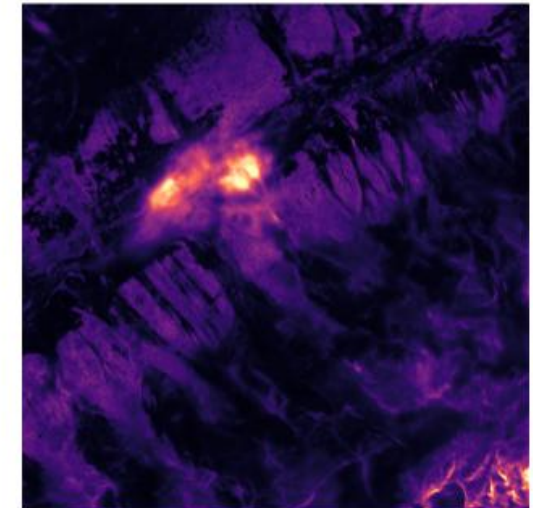
Evènement important

Blatten

-20

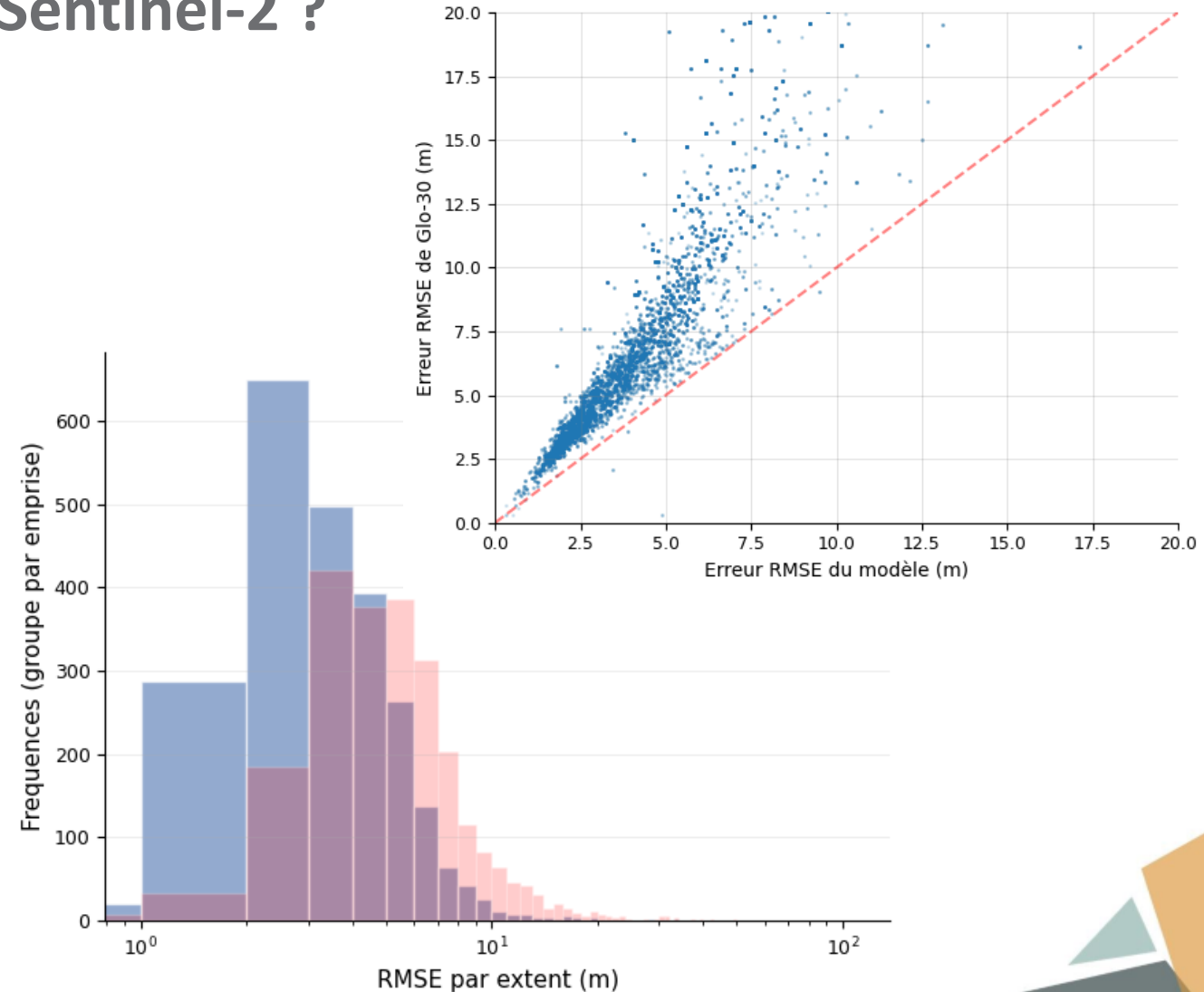
0

20



Peut-on prédire les changements topologiques à partir de Sentinel-2 ?

- Limites atteintes :
 - Le jeu de données doit être étoffé si on veut aller plus loin (exemple : volcans)
 - Méthode : besoin de combiner avec d'autres approches (multi-tâches, intégration dans un framework plus large)
- Enseignements
 - Belles capacités de généralisation
 - Le réseau a appris tout seul beaucoup d'implicites
 - Pertinence de ConvNeXT et des approches Bayésiennes
 - Ancrer les apprentissages sur des concepts physiques
- **Papier soumis très prochainement avec ouverture du code**



Merci de votre attention



Plan des Drus et marge proglaciaire de la Mer de Glace