

# POTENTIEL DES SATELLITES PLÉIADES NEO POUR RESTITUER LA TOPOGRAPHIE FINE DES GLACIERS

Gabin Bourlon<sup>1,2</sup>, Étienne Berthier<sup>3</sup>, Jesus Revuelto<sup>4</sup>, Simon Gascoin<sup>5</sup>, César Deschamps-Berger<sup>5</sup>, Ixeia Vidaller<sup>4</sup>, Eñaut Izagirre<sup>4</sup>, Pierre René<sup>6</sup>, Juan Ignacio López Moreno<sup>4</sup>

1: École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG), Champs-sur-Marne, France

2: École Supérieure des Géomètres Topographes (ESGT), Le Mans, France

3: Université de Toulouse, LEGOS (CNES/CNRS/IRD/UT3), Toulouse, France

4: Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IPE-CSIC), Saragossa, Spain

5: Université de Toulouse, Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère, UPS/CNRS/IRD/CNES, Toulouse, France

6: Association Moraine, Luchon, France.

## Résumé

La résolution de 30 cm offerte par les satellites Pléiades Neo représente un gain d'un facteur deux par rapport à leurs prédécesseurs, les Pléiades HR. Combinée avec des capacités stéréoscopiques, elle permet de construire des modèles numériques de terrain (MNTs) métriques pour caractériser finement les reliefs, en particulier pour les petits glaciers, comme ceux des Pyrénées. Dans cette étude, nous évaluons la précision des MNTs déduits d'images Pléiades Neo sur les glaciers de l'Aneto, d'Ossoue et du Monte Perdido en les comparant à des MNTs acquis par drone et aux couvertures Lidar nationales. Nous montrons que les MNTs déduits avec le corrélateur More Global Matching (MGM) sont plus précis que d'autres corrélateurs. Nous soulignons également la capacité des MNTs Pléiades Neo à restituer des détails fins de la morphologie glaciaire comme les moulins sur le glacier d'Ossoue, beaucoup plus difficiles à caractériser avec Pléiades HR.

**Mots clés :** Pléiades Neo, Pléiades HR, Modèle Numérique de Terrain, Glaciologie, Pyrénées

## Abstract

*The 30 cm resolution offered by the Pléiades Neo satellites represents a twofold gain over their predecessors, the Pléiades HR. Combined with stereoscopic capabilities, this makes it possible to build metric digital terrain models (DTMs) for fine characterization of landforms, particularly for small glaciers such as those in the Pyrenees. In this study, we assess the accuracy of DTMs deduced from Pléiades Neo images on the Aneto, Ossoue and Monte Perdido glaciers, comparing them with DTMs acquired by short range remote sensing products and national Lidar data. We show that DTMs deduced with the More Global Matching (MGM) algorithm are more accurate than others. We also highlight the ability of PNeo DTMs to render fine details of glacial morphology, such as the "moulins" on Ossoue glacier, much more difficult to characterize with Pléiades HR.*

**Keywords :** Pléiades Neo, Pléiades HR, Modèle Numérique de Terrain, Glaciologie, Pyrénées

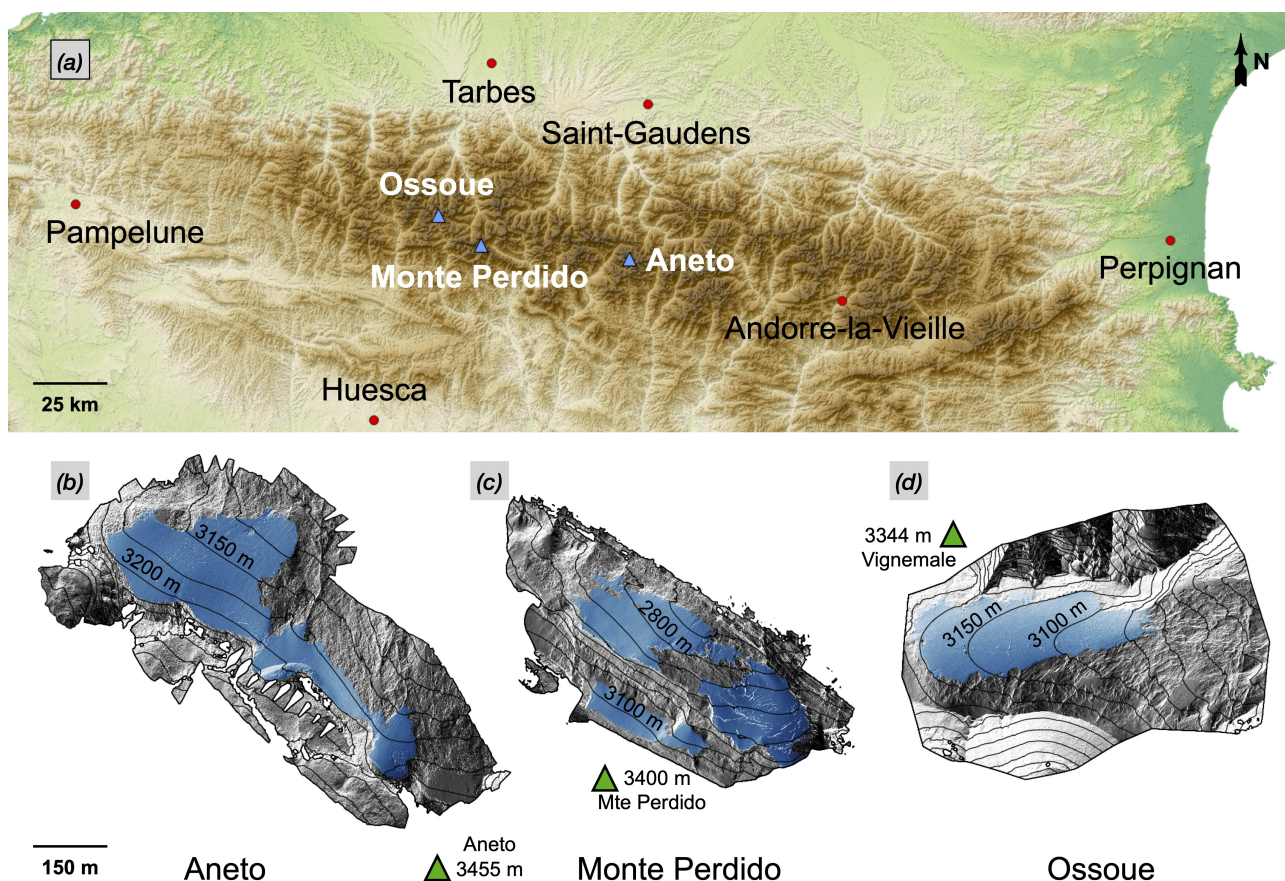
## 1. Introduction

Les deux satellites Pléiades Neo (PNeo) ont été lancés en 2021. Leur architecture se base sur celle des satellites Pléiades HR (PHR) mis en orbite 10 ans avant. Cette nouvelle génération de capteurs offre une résolution spatiale au sol de l'ordre de 30 cm contre 70 cm pour PHR.

L'agilité des satellites PHR et PNeo permet des acquisitions d'images depuis des angles de vue différents. Ces couples stéréoscopiques (ou triplets) d'images permettent de générer des Modèles Numériques de Terrain (MNTs) représentant le relief de la zone observée (Delvit et Michel, 2016). Ces données sont aujourd'hui classiquement utilisées pour étudier l'évolution des glaciers tout autour du globe, permettant notamment l'étude de glaciers difficiles d'accès et de grande taille (Alaska, Hi-

malaya, ...) (Berthier et al., 2023).

Avec sa très haute résolution, PNeo devrait offrir la possibilité d'étudier des glaciers de petite taille et d'observer des évolutions plus fines de leur morphologie (Fischer et al., 2014; Huss et Fischer, 2016). L'objectif de notre étude est de tester l'apport de PNeo pour caractériser finement la topographie des glaciers. Pour cela, nous disposons d'images acquises sur les trois glaciers pyrénéens les plus étudiés : l'Aneto, le Monte Perdido et celui d'Ossoue (Vidaller et al., 2023, 2021; Gascoin et René, 2018; Marti et al., 2015; López-Moreno et al., 2016). Nous comparons les MNTs obtenus à des données in situ de très haute précision, acquises par drone à quelques semaines d'intervalle. Ces données sont également comparées aux couvertures LiDAR des instituts géographiques nationaux de France (IGN-FR) et d'Es-



**FIGURE 1:** Zone d'étude. (a) : Carte de localisation dans les Pyrénées (Fond : SRTM30 Colored Hillshade - by terrestris). (b), (c), et (d) : Ombrages du relief des glaciers en 2023 à partir du MNT par drone à un maillage de 50 cm (voir P.2.2.1). La surface des glaciers est indiquée en transparence en bleu sur l'ombrage, et les surfaces stables sont simplement grisées. Les hauteurs sont indiquées par rapport à l'ellipsoïde IAG GRS 80 (voir P.2.4).

pagne (IGN-ES). Un objectif secondaire est de comparer trois jeux de paramètres différents lors du calcul des MNTs Pléiades Néo afin de déterminer le corrélateur le plus performant pour les applications futures.

Après avoir présenté les données utilisées ainsi que leur préparation, nous détaillons notre méthodologie pour générer les MNTs et les comparer. Enfin, l'analyse des résultats obtenus nous permet de qualifier la restitution du relief permise par PNeo dans le contexte des glaciers pyrénéens.

## 2. Données

Des 52 glaciers répertoriés en 1850 dans les Pyrénées, 15 sont encore présents en 2024 (Izagirre et al., 2024). Le déclin rapide de leur nombre et de leur surface est un des effets visibles du changement climatique actuel.

### 2.1. Zone d'étude

Les trois glaciers présentés sur la Figure 1 sont les plus grands des Pyrénées et sont fréquemment observés lors de missions scientifiques, par des mesures de terrain et par drone (Vidaller et al., 2021, 2023). Ils sont situés dans la partie centrale de la chaîne de montagne

(Figure 1.a), accrochés aux plus hauts sommets pyrénéens. Ils s'étagent entre 2700 m et 3300 m d'altitude. Izagirre et al. (2024) propose une mise à jour de l'inventaire des glaciers à la fin de l'été 2023. Le glacier de l'Aneto est le plus grand de la chaîne et couvrait 35 ha (0.35 km<sup>2</sup>). Le glacier du Monte Perdido (Mont Perdu en français) est le second, couvrant 26 ha (0.26 km<sup>2</sup>). Enfin, avec 22 ha (0.22 km<sup>2</sup>), le glacier d'Ossoue est le plus grand du côté français sous le pic du Vignemale.

### 2.2. Données de Référence

Pour évaluer les MNTs PNeo, nous disposons de deux sources de données précises : (i) des MNTs déduits d'acquisitions par drone et (ii) des MNTs produits à partir des acquisitions LiDAR aéroportées des Instituts Géographiques Nationaux espagnols et français.

#### 2.2.1. Acquisition par drone

À la fin de l'été 2023, nous avons réalisé des acquisitions par drone sur les trois glaciers étudiés (Izagirre et al., 2024). Le survol à basse altitude a permis d'acquérir des images à 5.4 cm de résolution au sol (en moyenne : 3.5 cm Monte Perdido, 2.1 cm Aneto, et 10.5 cm Ossoue), avec un recouvrement entre les images supérieur à 70% (à la fois longitudinalement et latéralement) afin de permettre la reconstruction de la surface.

À partir de ces informations, les nuages de points 3D ont été générés avec le logiciel de *Structure from Motion* (SfM) Pix4Dmapper. Le traitement des images UAV commence par l'étalonnage des paramètres internes et externes de la caméra à l'aide d'une triangulation aérienne automatique (AAT), suivi d'un ajustement en bloc par faisceaux (BBA). L'AAT estime les paramètres externes de la caméra, leurs incertitudes et identifie les points clés en 2D. Ces résultats alimentent le BBA, qui affine les paramètres internes et optimise les paramètres externes, produisant ainsi un nuage de points 3D clairsemé. Ce nuage est ensuite densifié par appariement stéréoscopique pour générer le nuage de points 3D final. Pour plus de détails sur les algorithmes SfM, voir Forlani et al. (2018) ou Westoby et al. (2012). Ce produit a été sous-échantillonné bilinéairement à 50 cm pour être comparé aux autres MNTs dont la résolution est beaucoup plus faible (Table 1). Ces MNTs Drone couvrent l'ensemble des glaciers et leur périphérie avec une précision estimée à 57 cm en planimétrie (en moyenne).

Sur le Monte Perdido, la mesure SfM a été doublée d'une acquisition LiDAR (monté sur un drone), permettant de produire un MNT à la même résolution. En comparant ces deux MNT, nous avons remarqué des artefacts dans le MNT SfM. Ces résidus sont issus des grandes différences d'éclairage provoquées par le relief du terrain. Différentes techniques de filtrage sont appliquées pour éliminer les valeurs aberrantes, et leur impact sur les produits finaux issus des drones est négligeable sur les autres glaciers (Revuelto et al., 2021). Aussi, pour le Monte Perdido, la donnée de référence est le MNT Drone-LiDAR, le produit SfM étant écarté.

#### 2.2.2. Couvertures nationales par LiDAR aéroporté

En France comme en Espagne, les Instituts Géographiques Nationaux (IGN) mènent et entretiennent des chantiers d'acquisition LiDAR à haute densité sur l'ensemble de leur territoire. En Espagne (IGN-es, 2024), la couverture s'étend légèrement au-delà de la frontière officielle, ce qui nous a permis d'obtenir des données sur l'ensemble des trois glaciers étudiés, y compris le glacier d'Ossoue. Les vols d'acquisition se sont déroulés à la fin de l'été 2021. La densité minimale de points,  $0.5 \text{ point.m}^{-2}$ , nous a conduit à générer des MNTs échantillonnés à 2 m avec CloudCompare (Table 1) (CloudCompare Contributors, 2024).

La couverture LiDAR IGN-FR ne comprend pas les deux glaciers espagnols, uniquement le glacier d'Ossoue (IGN-fr, 2024). La plus haute densité de points ( $>10 \text{ points m}^{-2}$ ) permet d'extraire un MNT échantillonné à 0.5 m sur cette zone (Table 1).

### 2.3. Imagerie Spatiale

#### 2.3.1. Acquisition par Pléiades HR

Le capteur panchromatique de PHR a une résolution spatiale de 70 cm et une fauchée de 20 km (Lebègue et al., 2015). Le dispositif DINAMIS (<https://dinamis.data-terra.org>) permet un accès à un

bouquet d'images acquises par PHR, notamment une paire stéréoscopique sur le glacier d'Ossoue le 24 septembre 2023.

#### 2.3.2. Acquisition par Pléiades Neo

En suivant le même principe d'acquisition que PHR, PNeo propose une acquisition résolue à 30 cm grâce au capteur panchromatique avec une fauchée de 14 km.

Via le dispositif DINAMIS, PNeo a acquis des couples d'images stéréoscopiques sur les trois glaciers pyrénéens entre octobre et novembre 2023. Ces acquisitions sont donc relativement proches temporellement des mesures drone (de 17 à 56 jours d'intervalle).

### 2.4. Uniformisation des données

Les MNTs ont été produits dans différents systèmes de coordonnées, rendant leur comparaison directe impossible. Nous les avons tous reprojetés avec une interpolation bilinéaire vers une projection WGS84-UTM dans le fuseau adapté à la zone (Aneto et Monte Perdido : 31 Nord, Ossoue : 30 Nord). La référence pour les élévations est l'ellipsoïde IAG-GRS 80.

## 3. Méthodes

### 3.1. Pré-traitements

#### 3.1.1. Détermination du terrain stable

La détermination du terrain stable est nécessaire pour permettre le recalage en trois dimensions des MNTs. C'est aussi sur ce terrain stable que la précision des MNTs peut être estimée. Or, l'altitude de la surface des glaciers évolue continuellement à cause des processus d'accumulation, d'ablation et du mouvement des glaciers. Ces surfaces doivent donc être exclues, ce qui nécessite la délimitation précise du contour des glaciers. Cet inventaire a été réalisé à partir des images très haute résolution des drones.

#### 3.1.2. Méthode de calcul d'un modèle numérique de terrain

Nous utilisons un logiciel libre, Ames Stereo Pipeline (ASP), pour le calcul des MNTs (Beyer et al., 2018). Une des étapes clés du calcul est la corrélation des deux images du couple stéréoscopique qui permet de produire les cartes de disparité utilisées ensuite pour générer le nuage de points dont est extrait le MNT (Delvit et Michel, 2016). ASP propose différents corrélateurs, plus ou moins coûteux en temps de calcul et en ressources, tous basés sur la mesure de disparité entre deux imagerie. Nous en avons comparé trois pour les glaciers des Pyrénées car ils ont été précédemment utilisés en glaciologie ou nivologie (Martí et al., 2016; Deschamps-Berger et al., 2020; Bhushan et Shean, 2021). Les paramètres spécifiques ainsi que les temps de calcul sur le glacier d'Ossoue sont détaillés dans la table A.1.

Glacier	Source	Capteur	Résolution initiale des images/ Densité de points du LiDAR	Maillage du MNT	% de couverture du Raster	Date d'acquisition	Jours écoulés depuis la référence
Aneto	<i>IPE</i>	<i>Imagerie</i>	<i>3.5 cm</i>	<i>0.5 m</i>	<i>95.4 %</i>	<i>19/09/23</i>	<i>/</i>
	IGN-ES	LiDAR	1 pt.m <sup>-2</sup>	2 m	94.7 %	12/10/21	- 707 j
	PNeo	Imagerie	0.3 m	1 m	99.9 %	14/11/23	+ 56 j
Monte Perdido	<i>IPE</i>	<i>LiDAR</i>	<i>100 pt.m<sup>-2</sup></i>	<i>0.5 m</i>	<i>99.0 %</i>	<i>25/09/23</i>	<i>/</i>
	IGN-ES	LiDAR	1 pt.m <sup>-2</sup>	2 m	99.8 %	12/10/21	- 713 j
	PNeo	Imagerie	0.3 m	1 m	93.0 %	01/10/23	+ 6 j
Ossoue	<i>IPE</i>	<i>Imagerie</i>	<i>3.5 cm</i>	<i>0.5 m</i>	<i>99.8 %</i>	<i>07/09/23</i>	<i>/</i>
	IGN-ES	LiDAR	1 pt.m <sup>-2</sup>	2 m	99.6 %	30/09/21	- 707 j
	IGN-FR	LiDAR	10 pt.m <sup>-2</sup>	0.5 m	85.3 %	19/09/22	- 353 j
	PHR	Imagerie	0.7 m	2 m	96.2 %	24/09/23	+ 17 j
	PNeo	Imagerie	0.3 m	1 m	93.6 %	06/10/23	+ 29 j

**TABLE 1 :** Tableau récapitulatif des données. Les données de référence (drone) sont en italique. Le pourcentage de couverture du raster exprime la densité d'information d'élévation sur la surface représentée effectivement par le MNT. Pour les produits issus de PNeo et PHR, le pourcentage correspond à la moyenne des trois MNTs produits par les différents corrélateurs. Le temps écoulé est donné depuis l'acquisition de la référence sur le glacier donné. *IPE* : *Instituto Pirenaico de Ecología*.

- Block-matching (BM) : algorithme de calcul par défaut de la disparité dans ASP. La position avec le coût le plus faible est rapportée comme valeur de disparité (Menard, 1996).
- Semi-Global Matching (SGM) : offre une capacité améliorée à trouver des correspondances de disparité dans les zones de texture répétitive ou ténue et à discerner des résolutions plus fines (Hirschmüller et al., 2006). Cependant, SGM est coûteux en calcul et peut nécessiter des gigaoctets de mémoire (pour nos images PNeo de 1 à 2 Go).
- More Global Matching (MGM) : améliore le fonctionnement de SGM en permettant de limiter les artefacts dans les textures à hautes fréquences (Facciolo et al., 2015). Mais comme SGM, cette méthode demande plus de ressources informatiques que l'algorithme BM.

Les glaciers n'occupent cependant qu'une partie réduite des couples stéréoscopiques, et par souci de sobriété numérique et de rapidité, la génération des MNTs a donc été faite seulement sur une zone de quelques kilomètres autour des glaciers. Nous avons produit des MNTs maillés à 2 m pour PHR et à 1 m pour PNeo soit un facteur d'environ trois par rapport à la résolution des images.

### 3.2. Co-registation

Les différents MNTs possèdent des positionnements différents, par exemple liés aux incertitudes sur les orbites ou le pointage dans le cas des données PHR et PNeo. Cela se traduit par un décalage en trois dimensions entre deux MNTs. Il est donc indispensable de les aligner précisément les uns par rapport aux autres pour assurer une comparaison fiable. La co-registation est réalisée avec l'algorithme de Nuth et Kääb (2011), implémenté dans la bibliothèque Python xDEM (xDEM Contributors, 2024). Cet algorithme est particulièrement adapté pour ajuster les MNTs et corriger les décalages horizontaux et verticaux entre les jeux de données. L'altitude des glaciers changeant rapidement, la co-registation se base uniquement sur les terrains stables. Nous avons utilisé les MNTs observés par drone comme référence pour la co-registation de tous les autres MNTs. Sur notre zone d'étude réduite, nous n'avons pas observé de bascule ou d'ondulation (*jitter*) des MNTs qui auraient pu justifier des corrections plus complexes (Berthier et al., 2024).

### 3.3. Métriques pour évaluer la pertinence de la co-registation et la qualité des MNTs

Différentes métriques sont calculées sur les différences d'élévation du terrain stable pour caractériser la précision des différents MNTs. Nous avons utilisé la moyenne et la médiane (indicateurs de la centralité des distributions) ainsi que deux indicateurs de dispersion :

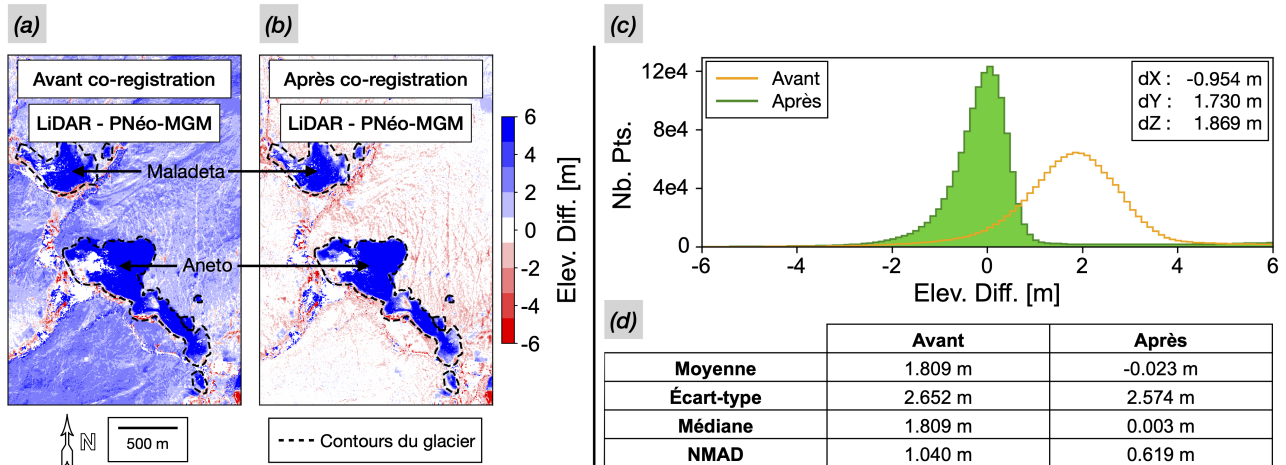


FIGURE 2: Cartes et histogrammes des résultats de co-registation des MNTs de PNeo-MGM sur le LiDAR de l'IGN-ES sur l'Aneto.

l'écart-type et l'Écart Absolu Médian Normalisé (NMAD) (Höhle et Höhle, 2009).

Cette dernière est une mesure robuste de la dispersion. Elle est calculée comme la médiane des valeurs absolues des écarts par rapport à la médiane, multipliée par un facteur de normalisation. La NMAD est particulièrement utile dans les études en haute montagne où les MNTs peuvent présenter des anomalies importantes sur les fortes pentes ou les ombres au voisinage des glaciers.

$$NMAD = 1.4826 \times \text{Médiane}(|de_i - \text{Médiane}(de_i)|) \quad (1)$$

où  $de_i$  représente les différences d'élévation.

### 3.3.1. Exemple de coregistation

Dans la Figure 2.a&b, nous pouvons observer les cartes de différence d'élévation avant et après la co-registation de la source (PNeo-MGM) sur la référence (LiDAR IGN-ES). On voit nettement la diminution de l'écart sur les zones stables, alors que le fort décalage en élévation persiste sur les glaciers d'Aneto et de la Maladeta. Ce résidu sur les glaciers est expliqué par la fonte de ceux-ci durant les deux années séparant les acquisitions.

L'écart-type est peu amélioré, car le déplacement léger laisse la même dispersion des différences autour de la moyenne, qui, elle, s'est largement rapprochée de 0. En revanche, la NMAD diminue et valide l'alignement des valeurs médianes, malgré la prise en compte de cette zone instable dans le recalage.

## 4. Résultats

### 4.1. Comparaison de trois algorithmes de corrélation

Un premier résultat porte sur la quantité d'information. Les MNTs produits ne donnent pas d'information

sur toute la surface des images, puisque la corrélation échoue parfois dans les zones d'ombre ou de fortes pentes. Ces données manquantes représentent de 3% à 9% de la surface totale du MNT généré en fonction du corrélateur choisi et de la source de données (PNeo, ou PHR et du glacier observé).

En observant la Figure 3 on peut comparer la qualité des MNTs produits à partir de PNeo sur les trois glaciers selon le corrélateur utilisé. La médiane des différences d'élévation avec les données du drone sur le terrain stable est toujours proche de zéro (< 1 cm), ce qui est attendu après co-registation. La NMAD est meilleure (inférieure) pour les corrélateurs SGM et, surtout, MGM. De plus, ces deux corrélateurs permettent de déterminer l'élévation des points sur une proportion plus grande de la surface de référence en fonction des glaciers observés (BM : de 84% à 94%, SGM : de 88% à 97%, MGM : de 91% à 97%). La comparaison aux autres données de

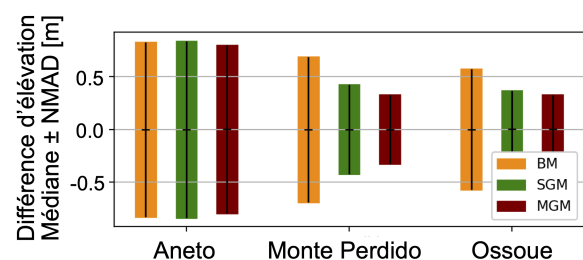
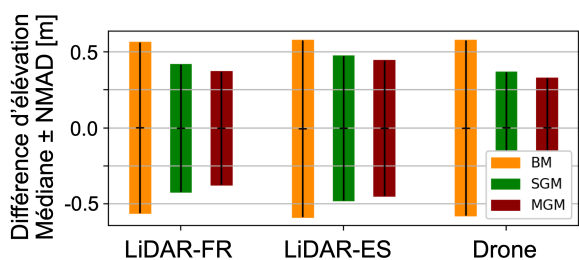


FIGURE 3: Comparaison des MNTs issus de PNeo produits par trois corrélateurs d'ASP aux MNTs de référence par drone sur les terrains stables. La croix noire indique la différence d'élévation médiane, les barres colorées la NMAD.

référence sur le terrain stable autour du glacier d'Ossoue (Figure 4) confirme la supériorité du corrélateur MGM : la NMAD est plus faible que pour les autres corrélateurs, et à nouveau, le pourcentage de couverture est plus élevé (BM : de 82% à 83%, SGM : de 87% à 88%, MGM : de 88% à 90%).



**FIGURE 4 :** Comparaison des MNTs issus de PNeo produits par les différents corrélateurs d'ASP aux autres sources de données de référence sur Ossoue (voir Partie 2.2). La croix noire indique la différence d'élévation médiane sur le terrain stable, les barres colorées la NMAD. La comparaison des MNTs PNeo au drone est la même que dans la figure 3, mais reproduite ici pour faciliter la comparaison aux couvertures LiDAR nationales

#### 4.2. Qualité des MNTs Pléiades Neo comparé aux autres données

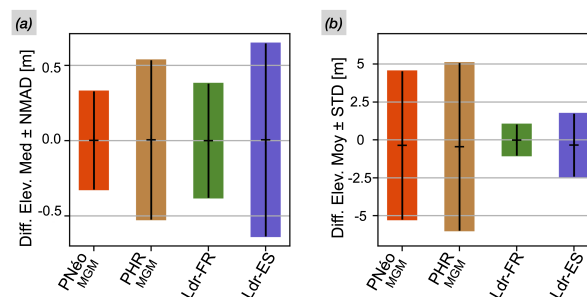
Nous comparons maintenant le MNT Pléiades Neo MGM (le meilleur des trois corrélateurs) ainsi que l'ensemble des autres MNTs (LiDAR nationaux et PHR) aux données de référence (drone).

Les produits LiDAR nationaux ont vocation à couvrir l'intégralité du territoire. Aussi dans la comparaison avec le MNT drone, ces données couvrent quasiment 100% de la surface. Les produits satellitaires sont, eux, affectés de données manquantes. PNeo apporte la couverture la moins dense avec 94% de couverture sur les trois glaciers (et 96% pour PHR sur Ossoue en moyenne).

La figure 5.a montre que le MNT PNeo-MGM présente la NMAD la plus faible, légèrement meilleure que le LiDAR français. Les NMAD de PHR et du LiDAR espagnol sont près de 1.5 fois plus fortes. Les écarts-types (métrique sensible aux valeurs extrêmes) sont nettement inférieurs pour les couvertures LiDAR nationales (Figure 5.b). Les deux solutions PNeo et PHR apportent des écarts-types nettement plus élevés, et relativement similaires ( 5 m). Ces résultats nous indiquent la présence de nombreuses valeurs aberrantes dans les MNTs satellitaires. En effet, ces données contiennent environ 2 % de pixels dont l'erreur est supérieure à 10 m, contre seulement 0.1 % dans les données LiDAR. Notons ici qu'aucun post-traitement (filtrage) n'a été appliqué aux MNTs satellitaires pour éliminer ces valeurs aberrantes.

#### 4.3. Dépendance des erreurs aux variables topographiques

La figure 6 permet de caractériser l'évolution de l'erreur des MNTs (ici le MNT PNeo-MGM) en fonction de l'orientation, de la pente et de l'altitude. Dans la colonne (a) de la figure 6, la médiane (proche de 0) et la NMAD (inférieure à 1 m) varient peu en fonction de l'orientation. C'est un résultat logique puisque la coregistration minimise justement les différences selon l'orientation. En revanche, il y a un impact assez fort de la pente sur la qualité du MNT, jusqu'à dépasser une médiane de -15



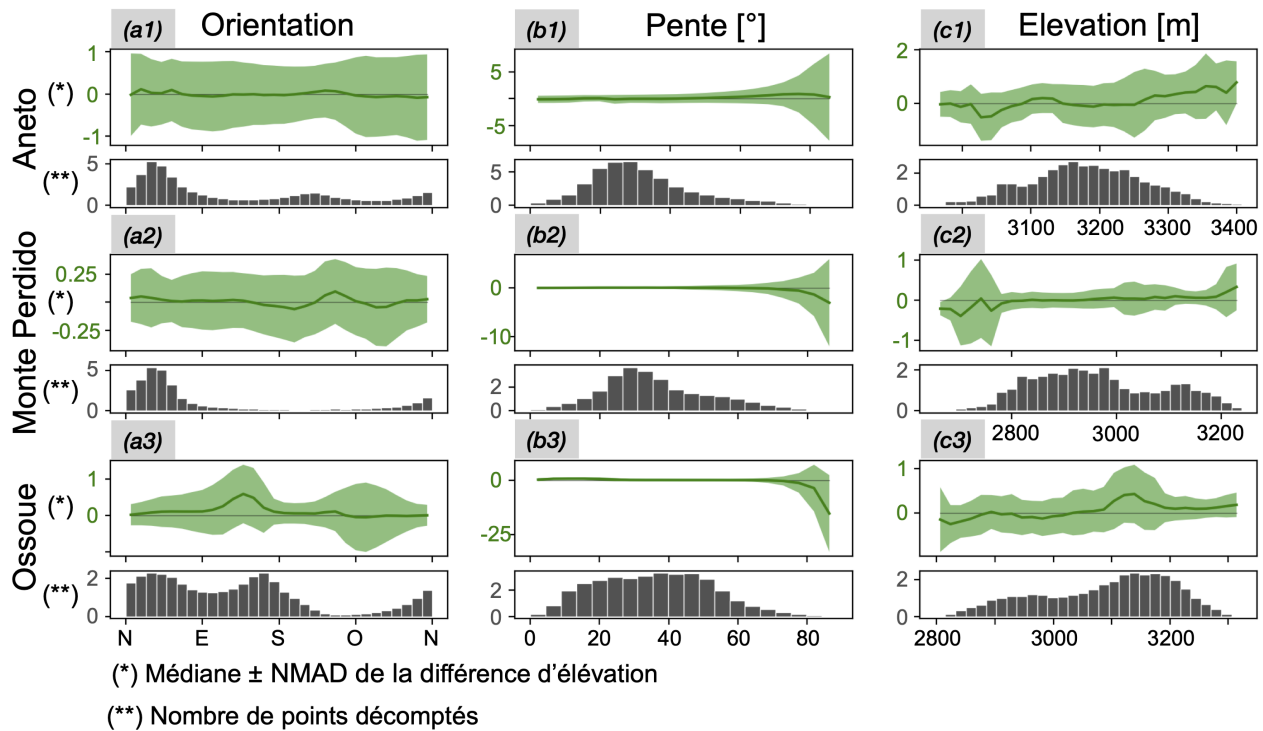
**FIGURE 5 :** Comparaison entre les différents MNTs disponibles autour du glacier d'Ossoue au MNT drone. (a) : Différence d'élévation médiane (en noir) entre les MNTs observés et la référence, et la NMAD associée. (b) : Différence d'élévation moyenne (en noir) entre les MNTs observés et la référence, et l'écart-type (STD) associé.

Notez les échelles de l'axe des ordonnées très différentes.

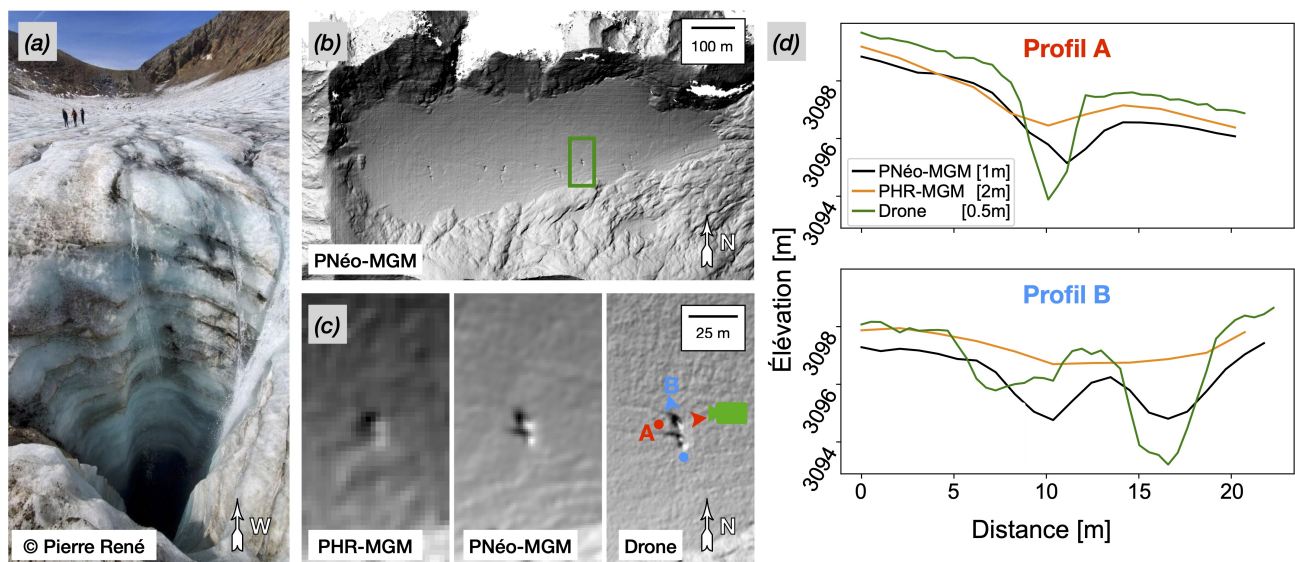
m de différence à 86° d'inclinaison (valeur extrême) sur Ossoue, alors qu'en dessous de 60° la NMAD reste très acceptable (< 0.6 m) et la médiane centrée autour de 0 m (Figure 6.b3). Cette figure confirme la forte dégradation des MNTs PNeo pour les pentes extrêmes. Enfin, il est difficile de dégager un systématisme dans les biais (ou la dispersion) avec l'élévation car l'amplitude d'élévation est assez faible (environ 500 m). Notons que les biais médians restent faibles (< 1 m) même pour des tranches d'altitude avec peu de données, ce qui est de bonne augure pour le calcul des différences d'altitude sur les glaciers.

#### 4.4. Capacité de restitution de la morphologie du terrain

En 2023, un des auteurs (P. René, Association Moraine) a pris une photo d'un moulin sur le glacier (Figure 7.a), c'est-à-dire un puits naturel par lequel l'eau de fonte de surface s'engouffre dans le glacier. Nous avons pu localiser ce moulin sur les images PNeo du glacier avec son aide (Figure 7.b). D'après les photos de terrain, le moulin mesure quelques mètres de large et plus de 10 m de profondeur. Des images d'ombrages et des profils topographiques extraits des différents MNTs (tous maillés à 2 m) et passant à travers le moulin, permettent de vérifier leur capacité à restituer cette dépression localisée (Figure 7.c). Le moulin au centre de la fenêtre est difficilement perceptible sur l'ombrage du MNT PHR alors que nous pouvons très distinctement le différencier du reste du glacier sur les deux autres ombrages. Les profils topographiques (Figure 3.1.c&d) montrent une dépression de quelques dizaines de centimètres de profondeur pour PHR-MGM, de l'ordre de 1 m pour PNeo-MGM et enfin jusqu'à 3 m par le drone.



**FIGURE 6:** Différence d'élévation entre les MNTs PNeo-MGM et drone en fonction de la morphologie du terrain calculée à partir des MNTs drone. Chaque sous-figure trace la médiane  $\pm$  NMAD [m] en fonction du paramètre observé (en vert) et en dessous un histogramme du nombre de points décomptés par tranche de valeurs (en gris). Par colonne (a) : Orientation du terrain, (b) : Pente en degrés, et (c) : Élévation du terrain. Puis par lignes (1) : Aneto, (2) : Monte Perdido, et (3) : Ossoue.



**FIGURE 7:** Un moulin sur le glacier d'Ossoue durant l'été 2023 et sa restitution dans les différents MNTs. (a) : Photo du moulin en septembre 2023. (b) : Ombrage du MNT PNeo-MGM sur le glacier (éclairage en haut à gauche). (c) : Zoom sur les ombrages des MNTs de PHR-MGM, de PNeo-MGM et du drone dans la zone du moulin, à leur résolution respective (2 m, 1 m, 0.5 m). Sur l'ombrage du MNT drone sont représentés les axes de coupe et de prise de vue. b). (d) : Comparaison des profils d'élévations le long des deux axes de coupe à travers le moulin observé. Date des acquisitions : PNeo [06/10/2023], PHR [24/09/2023], drone [07/09/2023].

## 5. Discussion

### 5.1. Supériorité du MNT calculé avec le corrélateur MGM

La quantité de valeurs manquantes est un critère important. Nos MNTs PNeo couvrent un peu moins bien la surface observée par rapport aux autres méthodes, notamment PHR sur le glacier d'Ossoue (Table 1). Quels que soient les sites, le corrélateur MGM offre la NMAD la plus faible (Figure 4.1) tout en permettant la meilleure couverture, avec jusqu'à 7% de données supplémentaires. Sur le site de l'Aneto, une chute de neige importante a eu lieu entre les mesures par drone et par PNeo. Cette neige a donc lissé le terrain, ce qui diminue l'avantage de MGM par rapport aux autres corrélateurs et explique probablement les NMAD plus fortes par rapport à Ossoue et Monte Perdido. Cet exemple montre l'importance de la similarité du terrain entre deux acquisitions et l'importance de limiter l'écart de temps dans les zones montagneuses pour un exercice de validation des MNTs.

De ces observations, nous pouvons déduire que la production de MNTs par MGM nous apporte une finesse de résultats et une couverture qui sont meilleures que les autres corrélateurs. En revanche, ce mode de calcul reste plus coûteux en ressources informatiques que la méthode de block matching (table A.1).

### 5.2. Forces et Faiblesses de Pléiades Neo par rapport aux autres capteurs

Malgré le manque de données plus important du MNT PNeo-MGM sur Ossoue par rapport aux autres glaciers disponibles, la partie 4.2 nous a permis de montrer l'amélioration nette de la précision par rapport aux données LiDAR et PHR. La NMAD des différences d'élévation (0.3 m) est plus faible que pour PHR-MGM (0.7 m), et même que celles obtenues avec les couvertures LiDAR (0.4 m et 0.6 m). Ce résultat suggère une relation entre la maille des MNTs et la NMAD, car les dispersions les plus importantes sont associées au MNT ayant la résolution la plus faible (2 m), et inversement.

La même comparaison nous a montré la présence de valeurs aberrantes dans les MNTs de PNeo-MGM, traduites par un écart-type de différence d'élévation plus de deux fois supérieur à celui observé sur les LiDAR nationaux ( $\sigma_{de}(\text{LdR-FR}) = 1 \text{ m}$ ,  $\sigma_{de}(\text{LdR-ES}) = 2 \text{ m}$ , et  $\sigma_{de}(\text{PNeo-MGM}) = 5 \text{ m}$ ).

L'analyse de la précision du MNT PNeo-MGM en fonction de la morphologie du terrain (P.4.3) illustre les limites des méthodes d'acquisition par imagerie optique satellite. Dans les zones de montagnes, l'acquisition est souvent confrontée aux occlusions provoquées par le relief. Les pentes fortes présentent de fortes distorsions entre les deux images du couple stéréo, et elles augmentent quand la prise de vue s'éloigne du nadir. Ainsi, nous observons une corrélation entre la pente locale et la différence d'élévation dans les zones de forte pente ( $> 60^\circ$ ) (Figure 6.b). Il est donc réellement important de considérer cet aspect lors de l'étude des

zones glaciaires très pentues (Hugonnet et al., 2022). Heureusement, ces zones de fortes pentes sont relativement rares, et impactent assez peu les observations à l'échelle d'un glacier entier. Si les très fortes pentes étaient en enjeu scientifique, des acquisitions tri-stéréos seraient à considérer (Letortu et al., 2021).

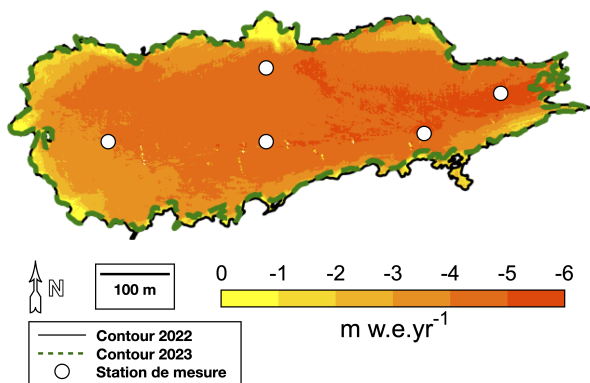
Enfin, l'observation du moulin sur Ossoue (P.4.4) nous a montré la capacité de détection de PNeo au regard de PHR. On peut nettement identifier l'ensemble des moulins sur le Plateau des Neiges, et les crevasses apparentes. Mais la finesse reste encore insuffisante pour analyser de manière précise la forme et la profondeur d'éléments de cette taille.

### 5.3. Potentiel de Pléiades Néo pour mesurer les changements d'altitude des glaciers

Le suivi temporel des glaciers est un des intérêts majeurs des acquisitions satellitaires, et est possible grâce à leur capacité de revisite (Berthier et al., 2023). À partir du MNT du LiDAR français ainsi que de celui de PNeo-MGM, nous avons pu tracer la carte de l'évolution du glacier d'Ossoue entre le 19 septembre 2022 et 6 octobre 2023 (Figure 8). Cette carte permet une cartographie des changements d'épaisseur et l'estimation du bilan de masse du glacier. On peut comparer ce bilan géodésique avec celui déduit des observations réalisées par l'association Moraine par la méthode glaciologique. Avec 7 points de mesures in situ, l'association a estimé un bilan annuel de  $-4.5 \text{ m w.e. yr}^{-1}$  (équivalent en hauteur d'eau par an), tandis que l'estimation par satellite est de  $-3.7 \text{ m w.e. yr}^{-1}$  (après correction des changements d'altitude par la densité de la glace  $900 \text{ kg m}^{-3}$ ). Cette différence de bilan peut s'expliquer par un décalage dans les dates d'observation, et dans la surface considérée. La mesure de terrain prend en compte la langue glaciaire occidentale détachée depuis 2016 (Gascoin et René, 2018), qui est exclue dans la mesure satellitaire. Au-delà du bilan global, la carte nous montre très clairement la répartition de la perte de masse, plus concentrée au milieu et vers le front de la langue glaciaire.

## 6. Conclusion

L'analyse de la qualité des MNTs produits par PNeo, révèle plusieurs points clefs. Premièrement, les MNTs calculés avec le corrélateur MGM se distinguent par une couverture de données plus large et une meilleure précision altimétrique que ceux calculés via BM ou SGM. Ensuite, ces mêmes produits offrent une qualité de restitution du relief proche de celle proposée par les instituts géographiques nationaux qui utilisent un capteur LiDAR aéroporté de très bonne précision. Le MNT PNeo, comme le MNT de PHR, contient toutefois plus de valeurs aberrantes que les MNTs Lidar nationaux. On notera que la fauchée de PNeo (14 km) est réduite par rapport à celle de PHR (20 km) ce qui peut compliquer le suivi des grands glaciers. Enfin, les limites inhérentes à l'acquisition par imagerie dans les zones montagneuses,



**FIGURE 8:** Bilan de masse du glacier d'Ossoue de 2022 à 2023. Cartes de la perte de masse en équivalent hauteur d'eau par an ( $\text{m w.e. yr}^{-1}$ ) entre le 19 septembre 2022 (Lidar HD) et le 6 octobre 2023 (PNeo-MGM). Les stations de mesures sont mises en place et relevées par l'association Moraine.

comme les très fortes pentes, sont importantes à considérer.

L'utilisation de PNeo ouvre la voie à de nouvelles études sur les glaciers en permettant l'observation détaillée d'objets topographiques comme les moulins ou les crevasses, et ensuite de mieux étudier et comprendre leur dynamique ainsi que leur évolution. Pour ces fines échelles, cette nouvelle capacité est un gain certain en comparaison de PHR. En revanche, le coût d'accès à ces données PNeo pour les institutionnels et scientifiques français est actuellement plus élevé que pour PHR. Au delà du quota de gratuité ( $400 \text{ km}^2$  gratuit pour Neo contre  $2000 \text{ km}^2$  pour PHR), le prix est de l'ordre de  $10 \text{ euros/km}^2$  pour PNeo contre  $1.8 \text{ euros/km}^2$  pour PHR. Cela peut constituer un frein à leur utilisation sur de vastes étendues. Par exemple, pour l'estimation du bilan de masse annuel des glaciers, les MNTs PHR ou SPOT6/7 permettent déjà d'atteindre des précisions suffisantes (Berthier et al., 2024; Young et al., 2021).

## 7. Remerciements

Nous remercions les deux relecteurs externes pour leurs commentaires qui ont contribué à améliorer notre article. Nous remercions les partenaires de DINAMIS (Dispositif Institutionnel National d'Accès Mutualisé en Imagerie Satellitaire), qui fait partie de l'infrastructure de recherche Data Terra, pour avoir facilité l'acquisition des images Pléiades et Pléiades Néo. Gabin Bourlon remercie l'ENSG et le LEGOS d'avoir permis la réalisation de cette étude. Étienne Berthier remercie le CNES pour son soutien via le TOSCA.

## Références

Berthier, E., Floriciou, D., Gardner, A. S., Gourmelen, N., Jakob, L., Paul, F., Treichler, D., Wouters, B., Belart, J. M., Dehecq, A., et al., 2023. Measuring glacier mass changes from space—a review. *Reports on Progress in Physics* 86 (3), 036801.

- Berthier, E., Lebreton, J., Fontannaz, D., Hosford, S., Belart, J. M.-C., Brun, F., Andreassen, L. M., Menounos, B., Blondel, C., 2024. The Pléiades Glacier Observatory : high-resolution digital elevation models and ortho-imagery to monitor glacier change. *The Cryosphere* 18 (12), 5551–5571.  
URL <https://tc.copernicus.org/articles/18/5551/2024/>
- Beyer, R. A., Alexandrov, O., McMichael, S., 2018. The ames stereo pipeline : Nasa's open source software for deriving and processing terrain data. *Earth and Space Science* 5 (9), 537–548, [En ligne le 11/06/2024].  
URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018EA000409>
- Bhushan, S., Shean, D., 2021. Chamoli disaster pre-event 2-m dem composite : September 2015. Zenodo [data set].
- CloudCompare Contributors, 2024. CloudCompare. © EDF R&D / TELECOM ParisTech (ENST-TSI).  
URL <https://www.cloudcompare.org>
- Delvit, J.-M., Michel, J., 2016. 3 - digital terrain models from optical images. Dans : Baghdadi, N., Zribi, M. (Eds.), *Optical Remote Sensing of Land Surface*. Elsevier, pp. 125–161.  
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978178548102450003X>
- Deschamps-Berger, C., Gascoïn, S., Berthier, E., Deems, J., Gutmann, E., Dehecq, A., Shean, D., Dumont, M., 2020. Snow depth mapping from stereo satellite imagery in mountainous terrain : evaluation using airborne laser-scanning data. *The Cryosphere* 14 (9), 2925–2940, [En ligne le 11/06/2024].  
URL <https://tc.copernicus.org/articles/14/2925/2020/>
- Facciolo, G., Franchis, C. D., Meinhardt, E., 2015. MGM : A Significantly More Global Matching for Stereovision. Dans : Press, B. (Ed.), *BMVC 2015*. Swansea, United Kingdom.  
URL <https://enpc.hal.science/hal-01240853>
- Fischer, M., Huss, M., Barboux, C., and, M. H., 2014. The new swiss glacier inventory sgi2010 : Relevance of using high-resolution source data in areas dominated by very small glaciers. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 46 (4), 933–945.  
URL <https://doi.org/10.1657/1938-4246-46.4.933>
- Forlani, G., Dall'Asta, E., Diotri, F., Cella, U. M. d., Roncella, R., Santise, M., 2018. Quality assessment of dsms produced from uav flights georeferenced with on-board rtk positioning. *Remote Sensing*.  
URL <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/2/311>
- Gascoïn, S., René, P., 2018. Recent evolution of the Vignemale glaciers (2013-2017) [Évolution Recente des Glaciers du Vignemale (2013-2017)]. *Pirineos : revista de ecología de montaña = a journal of mountain ecology = revue d'écologie de montagne* 173, [En ligne le 11/06/2024].  
URL <https://hal.science/hal-02351625>
- Hirschmüller, H., Mayer, H., Neukum, G., 2006. Stereo processing of hrsc mars express images by semi-global matching. *Processing of HRSC Mars Express Images by Semi-Global Matching*.  
URL [https://elib.dlr.de/55656/1/Stereo\\_Processing-isprs06.pdf](https://elib.dlr.de/55656/1/Stereo_Processing-isprs06.pdf)
- Hugonnet, R., Brun, F., Berthier, E., Dehecq, A., Mannerfelt, E. S., Eckert, N., Farinotti, D., 2022. Uncertainty Analysis of Digital Elevation Models by Spatial Inference From Stable Terrain. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*.
- Huss, M., Fischer, M., 2016. Sensitivity of very small glaciers in the swiss alps to future climate change. *Frontiers in earth science*.
- Höhle, J., Höhle, M., 2009. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *IS-*

- PRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 64 (4), 398–406, [En ligne le 11/06/2024].  
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271609000276>
- IGN-es, 2024. Catalogo de datos y servicios idee, lidar 2ª cobertura (2015-2022) de españa. [En ligne le 11/06/2024].  
URL <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/lidar-segunda-cobertura>
- IGN-fr, 2024. LiDAR HD, Une cartographie 3D du sol et du sursol de la France. [En ligne le 11/06/2024].  
URL <https://geoservices.ign.fr/lidarhd>
- Izagirre, E., Revuelto, J., Vidaller, I., Deschamps-Berger, C., Rojas-Heredia, F., Rico, I., Alonso-González, E., Gascoin, S., Serrano, E., López-Moreno, J. I., 2024. Pyrenean glaciers are disappearing fast : state of the glaciers after the extreme mass losses in 2022 and 2023. *Regional Environmental Change* 24 (4), 172.
- Lebègue, L., Greslou, D., Blanchet, G., de Lussy, F., Fourest, S., Martin, V., Latry, C., Kubik, P., Delvit, J.-M., Dechoz, C., Amberg, V., 2015. Pléiades-hr satellites image quality commissioning. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*.  
URL <https://rfpt.sfpt.fr/index.php/RFPT/article/view/137>
- Letortu, P., Taouki, R., Jaud, M., Costa, S., Maquaire, O., Delacourt, C., 2021. Three-dimensional (3D) reconstructions of the coastal cliff face in Normandy (France) based on oblique Pléiades imagery : assessment of Ames Stereo Pipeline® (ASP®) and MicMac® processing chains. *International Journal of Remote Sensing* 42 (12), 4558–4578.  
URL <https://doi.org/10.1080/01431161.2021.1892857>
- López-Moreno, J. I., Revuelto, J., Rico, I., Chueca-Cía, J., Julián, A., Serreta, A., Serrano, E., Vicente-Serrano, S. M., Azorin-Molina, C., Alonso-González, E., García-Ruiz, J. M., 2016. Thinning of the monte perdido glacier in the spanish pyrenees since 1981. *The Cryosphere* 10 (2), 681–694, [En ligne le 11/06/2024].  
URL <https://tc.copernicus.org/articles/10/681/2016/>
- Marti, R., Gascoin, S., Berthier, E., de Pinel, M., Houet, T., Laffly, D., 2016. Mapping snow depth in open alpine terrain from stereo satellite imagery. *The Cryosphere* 10 (4), 1361–1380.  
URL <https://tc.copernicus.org/articles/10/1361/2016/>
- Martí, R., Gascoin, S., Houet, T., Ribière, O., Laffly, D., Condom, T., Monnier, S., Schmutz, M., Camerlynck, C., Tihay, J. P., Soubeyroux, J. M., René, P., 2015. Evolution of ossoue glacier (french pyrenees) since the end of the little ice age. *The Cryosphere* 9 (5), 1773–1795, [En ligne le 11/06/2024].  
URL <https://tc.copernicus.org/articles/9/1773/2015/>
- Menard, C., 1996. Robust Stereo and Adaptive Matching in Correlation Scale-Space. na.  
URL <https://www.prip.tuwien.ac.at/pripfiles/trs/tr45.pdf>
- Nuth, C., Kääb, A., 2011. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *The Cryosphere* 5 (1), 271–290, [En ligne le 11/06/2024].  
URL <https://tc.copernicus.org/articles/5/271/2011/tc-5-271-2011.pdf>
- Revuelto, J., López-Moreno, J. I., Alonso-González, E., 2021. Light and shadow in mapping alpine snowpack with unmanned aerial vehicles in the absence of ground control points. *Water Resources Research*.  
URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020WR028980>
- Vidaller, I., Izagirre, E., del Rio, L. M., Alonso-González, E., Rojas-Heredia, F., Serrano, E., Moreno, A., López-Moreno, J. I., Revuelto, J., 2023. The aneto glacier's (central pyrenees) evolution from 1981 to 2022 : ice loss observed from historic aerial image photogrammetry and remote sensing techniques. *The Cryosphere* 17 (8), 3177–3192, [En ligne le 11/06/2024].  
URL <https://tc.copernicus.org/articles/17/3177/2023/>
- Vidaller, I., Revuelto, J., Izagirre, E., Rojas-Heredia, F., Alonso-González, E., Gascoin, S., René, P., Berthier, E., Rico, I., Moreno, A., Serrano, E., Serreta, A., López-Moreno, J. I., 2021. Toward an ice-free mountain range : Demise of pyrenean glaciers during 2011–2020. *Geophysical Research Letters* 48 (18), e2021GL094339, [En ligne le 11/06/2024].  
URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2021GL094339>
- Westoby, M., Brasington, J., Glasser, N., Hambrey, M., Reynolds, J., 2012. 'structure-from-motion' photogrammetry : A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*.  
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X12004217>
- xDEM Contributors, mai 2024. xDEM.  
URL <https://doi.org/10.5281/zenodo.11204531>
- Young, E. M., Flowers, G. E., Berthier, E., Latto, R., 2021. An imbalancing act : the delayed dynamic response of the kaskawulsh glacier to sustained mass loss. *Journal of Glaciology* 67 (262), 313–330.

## Annexe A. Paramètres de calcul des corrélateurs d'ASP

Corrélateur	BM	SGM	MGM
Référence	Marti et al. (2016)	Deschamps-Berger et al. (2020)	Bhushan et Shean (2021)
-stereo-algorithm	0	1	2
-cost-mode	2 (normalized cross correlation)	3 (census transform)	3 (census transform)
-subpixel-mode	2 (affine adaptive window, Bayes EM weighting)	9 (fit polynomial de degré 4 interne à SGM)	9 (fit polynomial de degré 4 interne à SGM)
-corr-kernel	25x25 px	7x7 px	7x7 px
-subpixel-kernel	35x35 px	-	-
CPU Time (Ossoue)	13j 5h 00mn	23j 21h 58mn	16j 22h 16mn

**TABLE A.1:** Jeux de paramètres utilisés pour le calcul des MNTs Pléiades Néo : Block-matching (BM), Semi-Global Matching (SGM) et More Global Matching (MGM).