OUTILS 3D OPEN-SOURCE DÉVELOPPÉS POUR LA MISSION CO3D ET LES FUTURES MISSIONS

Valentine Bellet[1], Alexandre Constantin[1], Dimitri Lallement[1], Yannick Tanguy[1], David Youssefi[1]

1: Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), Toulouse, France

Résumé

Le CNES développe les chaînes de traitement des produits 2D et 3D intégrées au segment sol de la mission, ainsi qu'au Centre de Calibration d'Images (ICC) pour la calibration radiométrique et géométrique. Ces systèmes s'appuient sur une suite d'outils open-source créés par les équipes du CNES. Le CNES a choisi de diffuser ces outils avant le lancement de la mission afin de recueillir les retours des utilisateurs et d'améliorer la qualité des produits finaux du programme CO3D. L'article présente les différents logiciels : `CARS` est le logiciel de permettant de produire le Modèle Numérique de Surface (MNS) à partir d'images satellites acquises sous différents angles de vue. `PANDORA` est le logiciel de mise en correspondance stéréoscopique. `Bulldozer` supprime les éléments du sursol (les arbres, les bâtiments, etc.) des MNS générés par `CARS` pour produire des Modèles Numériques de Terrain (MNT). `xDEM` évalue et valide la qualité 3D des modèles générés, comme par exemple les MNS CARS et les MNT Bulldozer. `SLURP` produit des masques d'occupation du sol à partir d'images à Très Haute Résolution (THR). La mission CO3D marque une avancée significative dans l'observation de la Terre, avec des outils innovants permettant de produire des modèles de surface précis. En s'engageant avec la communauté des utilisateurs dès le début, le CNES vise à s'assurer que la mission fournit des produits répondant aux besoins des utilisateurs.

Mots clés : Modèle Numérique de Surface (MNS), Modèle Numérique de Terrain (MNT), Photogrammétrie, CO3D, Open source

Abstract

CNES is developing the 2D and 3D product processing chains integrated into the mission's ground segment, as well as an Image Calibration Center (ICC) for radiometric and geometric calibration. These systems are based on a suite of open-source tools created by CNES teams. CNES has chosen to release these tools before the mission launch in order to gather user feedback and improve the quality of the CO3D program's final products. The article presents the various software programs : `CARS` is the software used to produce the Digital Surface Model (DSM) from satellite images acquired from different angles. `PANDORA` is the stereoscopic matching software. `Bulldozer` removes surface features (trees, buildings, etc.) from the DSMs generated by `CARS` to produce Digital Terrain Models (DTMs). `xDEM` evaluates and validates the 3D quality of the models generated, such as CARS DSMs and Bulldozer DTMs. `SLURP` produces land cover masks from Very High Resolution (VHR) images. The CO3D mission marks a significant advance in Earth observation, with innovative tools for producing accurate surface models. By engaging with the user community from the outset, CNES aims to ensure that the mission delivers products that meet user needs.

Keywords : *Digital Surface Model (DSM), Digital Terrain Model (DTM), Photogrammetry, CO3D, Open source*

1. Introduction

1.1. Constellation CO3D

Après plusieurs années de développement, les quatre satellites de la mission CO3D ("Constellation Optique en 3D") (Lebègue et al., 2020) ont été lancés avec succès le 25 juillet 2025 depuis le centre spatial guyanais à bord du lanceur Vega-C. Le projet CO3D est un partenariat public-privé entre le CNES et AIRBUS avec la contribution de l'IGN pour la validation des produits 3D. La mission vise à reconstruire le Modèle Numérique de Surface (MNS) de la surface émergée de la Terre par photogrammétrie grâce à des paires de satellites optiques. Une des principales innovations est la possibilité de gérer l'acquisition stéréo en mode synchrone pour capturer des éléments en mouvement.

La constellation CO3D est composée de deux paires de satellites. La Figure 1 représente une illustration d'une paire de satellites CO3D. Chaque satellite permet d'acquérir des images satellites à 50 cm de taille du pixel au sol ("GSD" pour "Ground Sampled Distance" en anglais) avec 4 bandes spectrales différentes : rouge, vert, bleu et proche infrarouge. L'imageur est basé sur une matrice de pixels Rouge-Vert-Bleu (filtre de Bayer : structure matricielle avec 50% de filtres verts, 25% de filtres rouges et 25% de filtres bleus) et sur une autre matrice sensible au proche infrarouge. À partir des acquisitions synchrones, plusieurs MNS seront disponibles avec différentes résolutions au sol : 1m, 4m, 12m, 15m et 30m. Pour les deux dernières résolutions, le MNS sera disponible en libre accès. La production mondiale de ces informations 3D favorisera la création de jumeaux numériques.

https://doi.org/10.52638/rfpt.2026.741

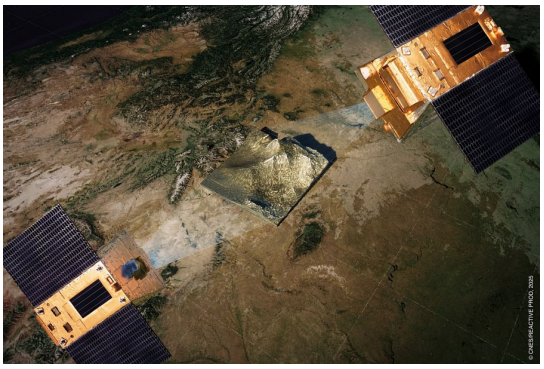


FIGURE 1: Illustration d'une paire de satellites CO3D. © CNES/REACTIVE PROD, 2025

Dans le cadre du programme CO3D, le CNES développe la chaîne de traitement des produits 2D et 3D (appelée CODIP pour "CO3D Image Processing" en anglais) intégrée au segment sol de la mission (Melet et al., 2020), ainsi qu'un Centre de Calibration d'Images ("ICC" pour "Image Calibration Center" en anglais) pour la calibration radiométrique, géométrique et le réglage des produits 3D. En effet, après le lancement des satellites, une phase dite de période de recette en vol est initiée au sein de l'ICC pour une durée de 6 mois. Au cours de cette phase, l'étalonnage de la constellation des 4 satellites est réalisée afin de régler les différents paramètres de qualité image bord et sol. Cette phase de recette en vol est suivie d'une phase de démonstration de 18 mois, dont les 4 premiers mois sont dédiés à l'évaluation des performances du système à travers plusieurs activités de qualification. Cette évaluation des performances a lieu sur deux zones : le territoire français et sur un ensemble de territoires jugés stratégiques par les autorités. Enfin, une phase commerciale est réalisée par AIRBUS.

La chaine de traitement CODIP ainsi que l'ICC s'appuient sur une suite d'outils open-source créés par les équipes du CNES. Le CNES a choisi de diffuser ces outils avant le lancement de la mission afin de recueillir les retours des utilisateurs et d'améliorer la qualité des produits finaux du programme CO3D. L'objectif de cet article est de présenter les différents outils 3D ainsi que leurs interactions.

1.2. Écosystème des outils 3D

Les outils open-source des équipes du CNES ainsi que leurs interactions sont représentés sur la Figure 2.

`CARS`[1] (Youssefi et al., 2020) (acronyme français pour « Chaîne Automatique de Restitution Stéréoscopique ») est le logiciel central de reconstruction photogrammétrique permettant de produire des MNS à partir d'images satellites acquises sous différents angles de vue. Plusieurs logiciels de reconstruction photogrammétrique existaient avant le développement du logiciel `CARS` (Krauß et al. (2013), de Franchis et al. (2014), Qin (2016), Rupnik et al. (2017), Beyer et al. (2018)), cependant aucun d'entre eux ne répondait aux exigences de licence nécessaires à la collaboration avec Airbus pour CO3D (besoin d'une licence non contaminante avec une maitrise d'œuvre interne). Le CNES a donc décidé de produire son propre logiciel : `CARS`. Le fonctionnement de `CARS` repose sur de nombreuses interactions avec les autres logiciels du CNES.

`CARS`[2] (Cournet et al., 2020), au cœur du processus de `CARS`, assure la mise en correspondance entre images stéréoscopiques rectifiées en géométrie épipolaire. Il combine à la fois une étape de mesure de similarité pour chaque pixel, et son correspondant dans la ligne épipolaire, et une étape de régularisation spatiale.

`Bulldozer`[3] (Lallement et al., 2023) produit des Modèles Numériques de Terrain (MNT) à partir des MNS générés par `CARS`. Il élimine les éléments du sursol comme les arbres ou les bâtiments pour obtenir une représentation plus précise du relief.

`SLURP`[4] (Tanguy et al., 2024) génère des masques d'occupation du sol à partir d'images à Très Haute Résolution (THR). Ces masques sont utilisés par `CARS` pour affiner les reconstructions 3D, notamment en identifiant des surfaces spécifiques comme les surfaces en eau. L'utilisation des masques `SLURP` permet ainsi d'obtenir des modèles plus nets et plus précis.

Finalement, `xDEM`[5] (Hugonnet et al., 2022) évalue et valide la qualité 3D des modèles produits, c'est-à-dire les MNS issus de `CARS` et les MNT issus de `Bulldozer`, notamment en les comparant avec une référence, comme par exemple le LiDAR HD[6].

La suite de l'article vise à présenter plus en détail le fonctionnement de chaque outil et leurs interactions entre eux.

2. Présentation des outils 3D

2.1. CARS : la chaine de reconstruction 3D

La version initiale de `CARS`, décrite dans l'article fondateur (Youssefi et al., 2020), a fait l'objet de développements majeurs visant à améliorer ses performances et sa précision. Parmi les innovations les plus significatives figure l'adoption d'une approche multi-résolution pour la génération des modèles 3D.

Cette nouvelle méthodologie repose sur un processus hiérarchique où chaque image est transfomée en une pyramide de résolutions. Par exemple, pour une image initiale de 1m de résolution, on peut créer trois niveaux distincts : un niveau grossier à 16m obtenu par un sous-échantillonnage par un facteur 16, un niveau intermédiaire à 4m résultant d'un sous-échantillonnage par

1. CARS : `https://github.com/CNES/cars`, `https://doi.org/10.5281/zenodo.17406459`
2. PANDORA : `https://github.com/CNES/Pandora`
3. Bulldozer : `https://github.com/CNES/bulldozer`
4. SLURP : `https://github.com/CNES/slurp`
5. xDEM : `https://github.com/GlacioHack/xdem`, `https://doi.org/10.5281/zenodo.48096977`
6. LiDAR HD : `https://geoservices.ign.fr/lidarhd`

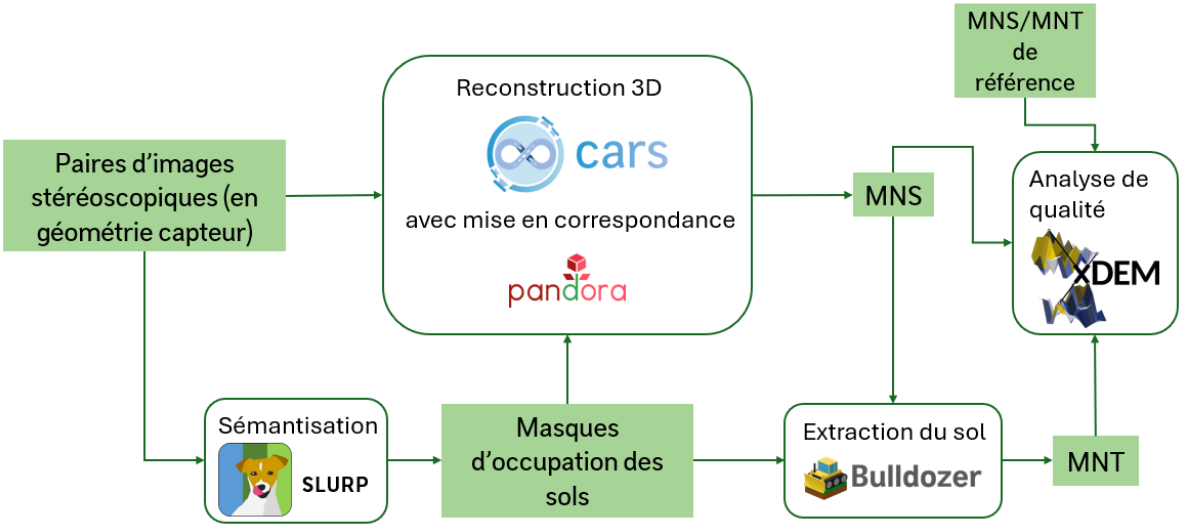


FIGURE 2: Interactions entre les outils 3D open-source du CNES

un facteur 4, et enfin le niveau final à 1m correspondant à la résolution native de l'image.

Le pipeline de reconstruction stéréo complet, tel qu'illustré dans la Figure 3, comprenant les étapes de rééchantillonnage des images en géométrie épipolaire, de mise en correspondance (calcul de la carte de disparité réalisé par le logiciel CARS), de triangulation et de rasterisation, est appliqué successivement à chaque niveau de résolution, en commençant par le niveau le plus grossier pour terminer par le niveau le plus fin. Cette approche itérative permet non seulement d'affiner progressivement les résultats à chaque étape, mais aussi de réduire considérablement les temps de calcul. En effet, l'utilisation d'une pyramide de résolutions permet d'optimiser le processus de corrélation en réduisant les intervalles de recherche d'altitude pour le corrélateur CARS, décrit dans la section suivante.

La Figure 4 représente un MNS produit par CARS sur la zone de la "Mer de Glace", Massif du Mont Blanc dans les Alpes françaises. Il est issu d'une paire stéréoscopique d'images satellites Pléiades HR acquises en juin 2017.

2.2. PANDORA : le corrélateur

PANDORA est au cœur du processus de CARS et assure la mise en correspondance entre images stéréoscopiques.

Principales étapes. La mise en correspondance est réalisée entre des images rectifiées de manière épipolaire. Ce choix répond principalement à des contraintes de temps de calculs. Après avoir calculé une mesure de similarité pixel à pixel, dont le résultat est un volume de coût, ce dernier est régularisé à l'aide d'une méthode semi-globale (Hirschmuller, 2008). Cette approche permet de travailler sur des métriques plus rapides, la robustesse des résultats étant assurée par la régularisation.

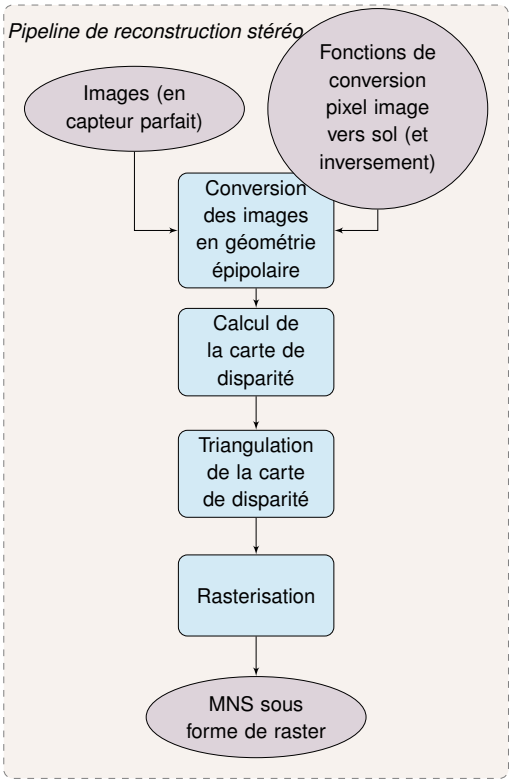


FIGURE 3: Étapes du pipeline CARS appliquées à chaque niveau de résolution

Aujourd'hui, les métriques de PANDORA, utilisées pour la mission CO3D, sont Census (distance non paramétrique) et un réseau de neurones siamois (MC-CNN, (Defonte et al., 2021)). Ces deux approches offrent une flexibilité dans le traitement des zones observées et permettent d'optimiser la vitesse de calcul, souvent ralentie par de grands décalages lorsque le plan altimétrique est variable.

PANDORA offre la possibilité d'implémenter facile-

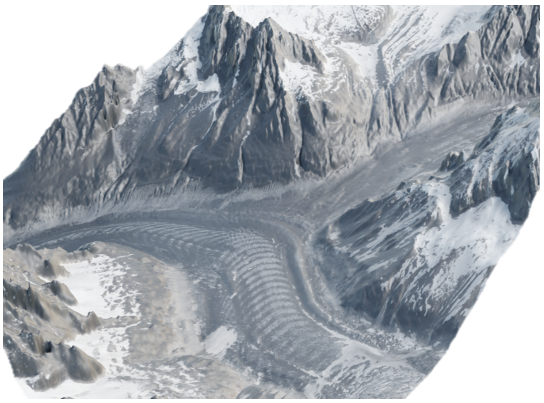


FIGURE 4: MNS produit par CARS sur la zone de la "Mer de Glace", Massif du Mont Blanc dans les Alpes françaises. MNS issu d'une paire stéréoscopique d'images satellites Pléiades HR. (Pléiades © CNES_2017 Distribution CNES PWH)

ment de nouvelles méthodes de mise en correspondance Mussard et al. (2025). L'outil offre aussi des concepts originaux comme l'ambiguïté.

Concept d'ambiguïté. L'apport essentiel de `PANDORA` est le concept d'ambiguïté (Sarrazin et al., 2021). Cela permet d'innover en fournissant une mesure de la confiance du modèle lorsqu'il détermine le décalage dans un profil de coût. Cette mesure indique si le modèle a une solution claire ou s'il existe plusieurs solutions possibles (ambiguïté).

Un profil de coût est un ensemble de valeurs, par pixel, entre le décalage minimal attendu et le décalage maximal déterminé par la configuration (*a priori*). Ces valeurs sont définies par la métrique de similarité, donc vivent dans le même espace (l'espace des réels $\mathbb{R}$ ou $\mathbb{R}^+$, ou bien tout intervalle bornée).

Afin de définir l'ambiguïté de manière universelle (c'est-à-dire pour toute métrique utilisée), celle-ci est définie comme la vitesse à laquelle croît l'aire entre l'extremum de similarité et un paramètre $\eta \in [0, 1]$, en entrée de l'outil, entre les *à priori* de décalages minimaux et maximaux. Cette aire est normée par l'intégrale complète de la courbe, et la quantité finale, appelée ambiguïté, est donc également bornée dans $[0, 1]$, pour une valeur η fixée. Le principe est illustré Figure 5, où l'*a priori* de décalage est compris entre 0 et 20 pixels. On remarque que l'intégrale du profil ambigu (courbe foncée) s'étale sur une plage plus large de décalages possibles. Les extremas locaux font que le profil d'ambiguïté, défini comme tel, croît plus rapidement que le profil non ambigu.

2.3. Bulldozer : l'extracteur de MNT à partir de MNS

Le logiciel `Bulldozer` est un outil d'extraction de modèles numériques de terrain (MNT) appartenant à la famille des méthodes morphologiques ne nécessitant pas de masque complémentaire (par exemple sursol, zones en eau) en entrée, en plus du MNS. Son principe repose sur une simulation de chute de drap, dont une

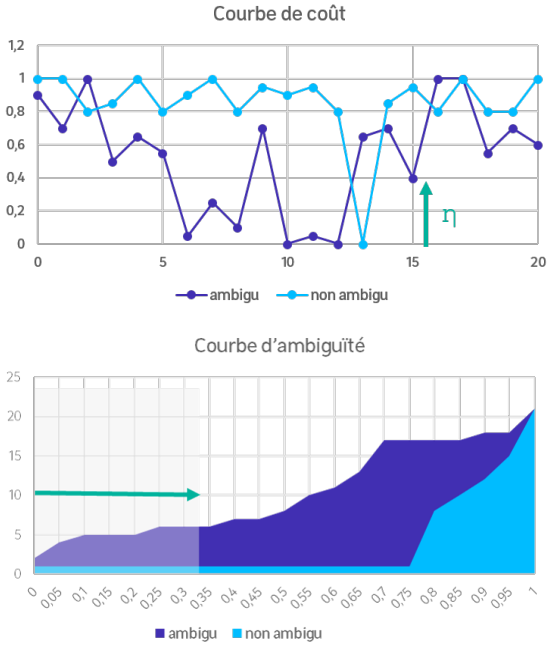


FIGURE 5: Profils de coût (en haut) et d'ambiguïté (en bas) pour deux cas : un cas ambigu en bleu foncé, et un cas non ambigu en bleu clair. η est représenté en vert, par la flèche.

version simplifiée de la méthode est représentée dans la Figure 6. Dans un premier temps, le MNS fourni en entrée fait l'objet d'un pré-traitement consistant à filtrer et supprimer les zones bruitées puis à reboucher les zones de nodata. En l'absence d'un masque externe, une étape supplémentaire permet de distinguer les zones internes de nodata à reboucher (*inner_nodata*) des bordures de l'image (*outer_nodata*). Un autre pré-traitement optionnel permet également d'intégrer un masque de sol fourni par l'utilisateur, de manière à définir des points d'ancrage fiables pour le drap.

À partir du MNS ainsi prétraité, une simulation de chute de drap est effectuée. Une version simplifiée de l'algorithme est présenté dans la Figure 6.Cette approche repose sur un schéma multi-échelle : la résolution du MNS est initialement fortement dégradée afin de réduire significativement le temps de calcul. Un drap, modélisé comme un plan, est alors soumis à des itérations successives combinant des étapes de gravité et de tension. À chaque itération, une étape de gravité est appliquée, suivie d'un test d'intersection entre le drap et le MNS. Lorsque des intersections sont détectées, le drap est contraint aux points de contact. Une étape de tension est ensuite appliquée aux points non contraints afin de limiter l'enfoncement du drap dans les structures en surélévation. Le niveau de tension est défini selon une valeur définie par l'utilisateur en fonction du type de sursol qu'il souhaite extraire. Plus les éléments de sursol considérés sont larges (bosquet, etc.) plus la valeur sera élevé, à l'inverse si l'utilisateur veut inclure dans son MNT des éléments morphologiques fins comme des remblais il devra baisser la valeur de la tension. Au

https://doi.org/10.52638/rfpt.2026.741

contraire, le pas de gravité est ajusté automatiquement par l'outil en fonction d'un gradient dérivé du relief local du MNS, ce qui permet de réduire les phénomènes de décrochage dans les zones à forte variabilité topographique, problème fréquent dans les approches basées sur des simulations physiques. Une fois la convergence atteinte à basse résolution, le MNS est progressivement rééchantillonné à des résolutions de plus en plus fines. À chaque niveau, le drap issu de l'étape précédente est réutilisé comme condition initiale, puis ajusté par de nouvelles itérations de gravité et de tension intégrant les détails supplémentaires du MNS. Ce processus itératif est poursuivi jusqu'à retrouver la résolution initiale du MNS.

L'ensemble de la procédure conduit à un drap final modélisant fidèlement la topographie du sol, comme illustré en Figure 7. Cette approche pseudo-locale permet ainsi de traiter efficacement des données à grande échelle, issues aussi bien de MNS satellitaires de résolution moyenne que de relevés LiDAR à très haute résolution.

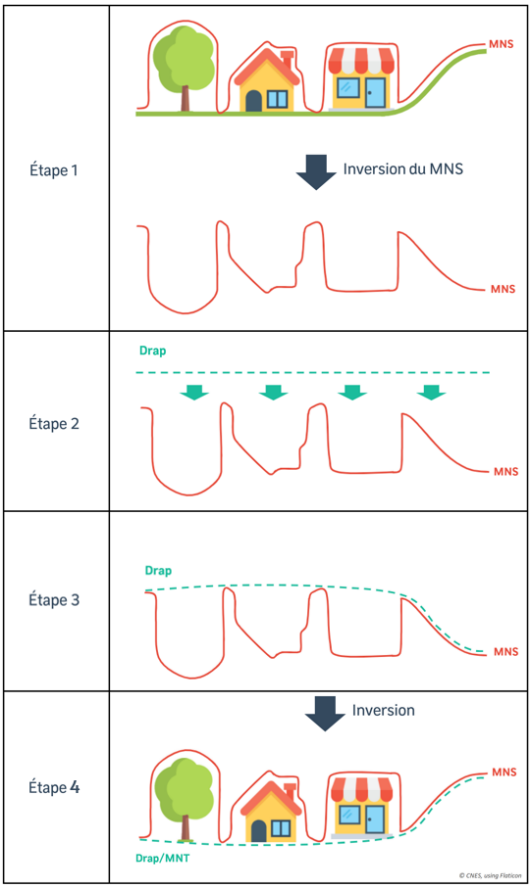


FIGURE 6: Principe simplifié du fonctionnement de Bulldozer.

2.4. SLURP : l'outil de productions de masques d'occupation du sol

`SLURP` génère divers masques visant à optimiser la restitution en 3D. Cet outil traite des images THR (< 1 m de résolution) à quatre bandes (rouge, vert, bleu, proche-infrarouge) et enchaîne plusieurs algorithmes

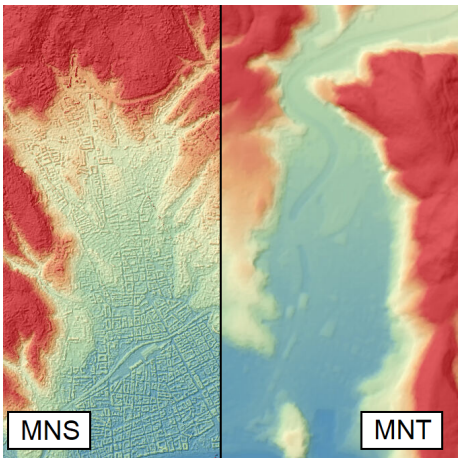


FIGURE 7: Résultat de Bulldozer sur une zone à Nice, France.

de Machine Learning pour produire plusieurs masques simples (eau, ombre, végétation basse/haute, bâti) qui sont ensuite combinés et régularisés dans une classification à six classes (eau, végétation basse/haute, bâti, sol nu, non défini) (voir Figure 8). Les algorithmes utilisés par `SLURP` s'appuient principalement sur des primitives calculées en amont : NDVI, NDWI et texture. Ils intègrent également des données externes comme Pekel[8] ou le World Settlement Footprint (WSF)2019 (WSF)[9]. Par exemple, le masque d'eau est basé sur un apprentissage supervisé (Random Forest) à partir des données de référence Pekel. Ensuite un post-processing est appliqué pour nettoyer le masque. Le masque urbain est aussi basé sur un Random Forest sur les données WSF. Le masque de végétation quant à lui est basé sur un apprentissage non supervisé basé sur l'algorithme Simple Linear Iterative Clustering (SLIC) Achanta et al. (2012). Le masque d'ombre est calculé uniquement à partir d'un seuillage radiométrique.

Les masques unitaires ou le masque final peuvent être utilisés à différentes étapes de la chaîne de restitution 3D. La reconstruction 3D par `CARS` des zones en eau représente un défi majeur en raison de leur uniformité et de leur réflectivité élevée, qui compliquent l'identification de points homologues entre images. Pour y remédier, `SLURP` génère un masque d'eau catégorisé à partir du Water Body Mask (WBM) de Copernicus[10]. Ce masque distingue trois types de zones d'eau : mer/océan, lac et rivière. Dans `CARS`, des traitements spécifiques sont ensuite appliqués en fonction de cette classification : pour la mer et les océans, une mise à zéro au niveau du géoïde est effectuée ; pour les lacs, une interpolation à partir des bords permet de les aplatir ; enfin, pour les rivières, le MNT généré par `Bulldozer` est utilisé. La Figure 9 représente un exemple de masque d'eau

8. `https://global-surface-water.appspot.com/download`
9. `https://download.geoservice.dlr.de/WSF2019/`
10. `https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/copernicus-contributing-missions/collections-description/COP-DEM`

https://doi.org/10.52638/rfpt.2026.741

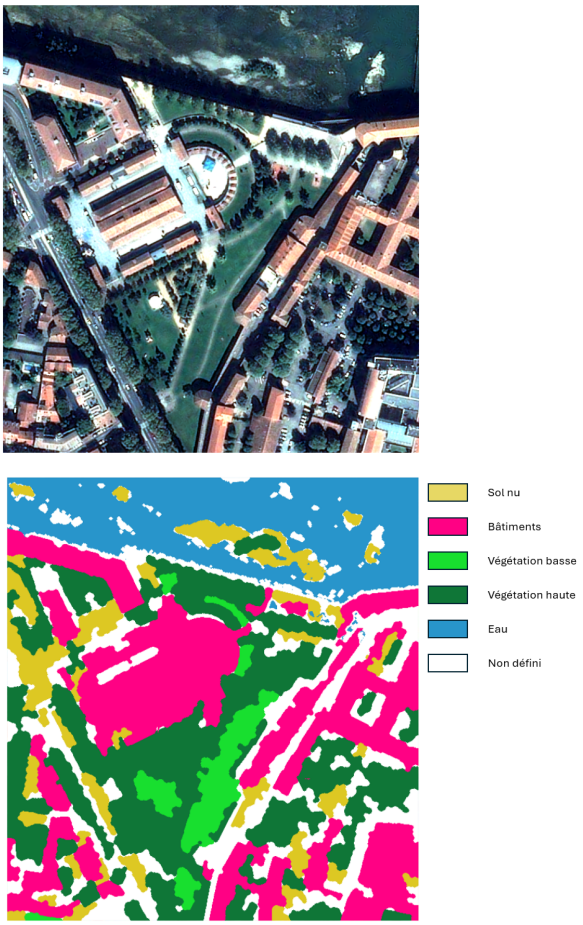


FIGURE 8: Classification produite par SLURP à partir d'une image PHR. (Pléiades © CNES Distribution CNES PWH)

catégorisé produit par `SLURP` sur la zone de Montpellier avec le MNS produit par `CARS` à partir des différents traitements appliqués en fonction des catégories d'eau.

La combinaison des masques de végétation et de bâti permettent d'obtenir un a priori du sur-sol et du sol : ceci permettra à des utilisateurs d'affiner la production d'un MNT, en identifiant automatiquement des zones sur lesquelles le MNT doit être confondu avec le MNS. Il est important de noter que `Bulldozer` fonctionne actuellement sans ces masques, mais leur utilisation pourrait améliorer les résultats.

2.5. xDEM : l'outil d'analyse de MNEs

`xDEM` est un logiciel open-source initialement développé par le collectif GlacioHack pour l'étude des changements glaciaires. En 2024, le CNES a choisi d'abandonner son propre outil, `demcompare` [11], pour s'associer à `xDEM`, reconnaissant son potentiel pour la qualification des produits 3D de la mission CO3D. Ce logiciel permet l'analyse tout type de Modèles Numériques d'Élévation (MNE) comme les MNS issus de `CARS`. Ses principales fonctionnalités incluent la co-registration de MNE (transformations affines et non affines), le référencement vertical, le calcul d'attributs de terrain (pente, ombrage de relief, orientation de la pente, etc.), l'interpolation et corrections de biais (verticaux, directionnels) ainsi que l'analyse d'incertitude et calcul de statistiques. La Figure10 illustre le calcul des attributs de terrain suivant : ombrage de relief (Horn, 1981), pente (Horn, 1981), orientation de la pente (Horn, 1981), courbure maximale (Minár et al., 2020), indice de rugosité du terrain (Riley et al., 1999) et rugosité (Jenness, 2004).

11. demcompare : `https://github.com/CNES/demcompare`

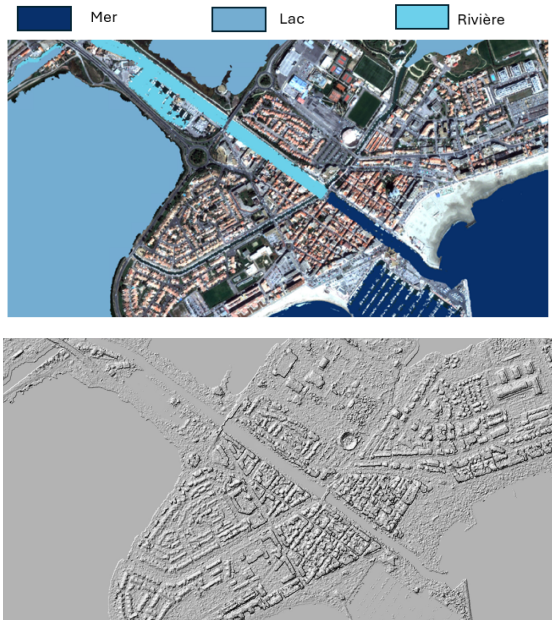


FIGURE 9: En haut : Masque d'eau catégorisé produit par SLURP. En bas : MNS produit par CARS avec les différents traitements pour les différentes zones en eau. Résultats issus de paires stéréoscopiques Pléiades sur la ville de Montpellier (Pléiades © CNES_ 2021 Distribution CNES PWH)

La Figure 11 illustre l'application de `xDEM` pour analyser les différences d'élévation entre un modèle numérique d'élévation (MNE) de 1990 et de 2009 sur la zone de Longyearbyen dans l'archipel du Svalbard (Norvège). On observe une perte d'élévation significative au niveau des glaciers, démontrant la capacité de `xDEM` à détecter et quantifier les changements glaciaires.

Grâce aux contributions du CNES, `xDEM` a été enrichi de nouvelles capacités, telles qu'une interface en ligne de commande et des workflows dédiés, un traitement par tuiles pour gérer de grands volumes de données ainsi qu'un profiling des fonctions afin d'identifier les goulots d'étranglement en termes de mémoire et de temps d'exécution. Ces améliorations, combinées aux développements de la communauté scientifique (prise en charge des nuages de points, ajout d'accesseur Xarray [12] afin d'améliorer l'intégration de `xDEM` dans l'écosystème géospatial Python), en font un outil unifié et performant pour la qualification des produits 3D dans le cadre de la mission CO3D.

12. Xarray : `https://github.com/pydata/xarray`

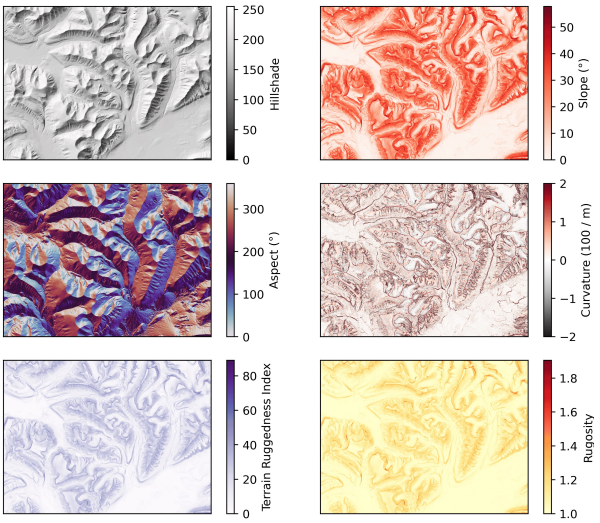


FIGURE 10: Calcul des différents attributs de terrain par xDEM à partir d'un MNE de 2009 sur la zone de Longyearbyen dans l'archipel du Svalbard (Norvège). D'en haut à gauche à en bas à droite : ombrage de relief, pente, orientation de la pente, courbure maximale, indice de rugosité du terrain et rugosité.

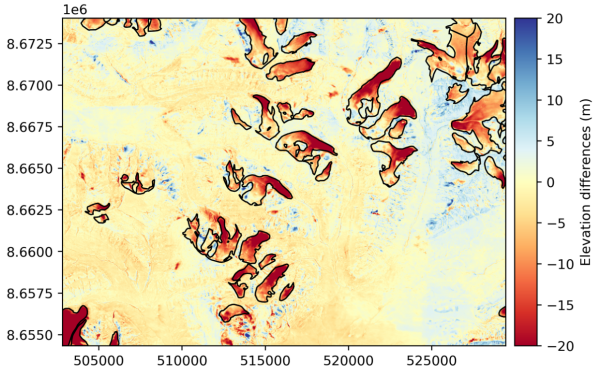


FIGURE 11: Différence d'élévation en mètres entre un modèle numérique d'élévation (MNE) de 1990 et de 2009 sur la zone de Longyearbyen dans l'archipel du Svalbard (Norvège). Les contours noirs représentent les glaciers. La palette de couleurs indique les changements d'élévation, avec des teintes rouges pour les zones où l'élévation a diminué, notamment au niveau des glaciers.

3. Conclusion et perspectives

Le développement par le CNES d'une suite d'outils open-source dédiés au traitement d'images satellites pour la production de modèles 3D représente une avancée significative dans le domaine de la photogrammétrie. Ces outils, initialement conçus pour la mission CO3D, offrent des capacités uniques pour la génération automatique de MNS à l'échelle mondiale. La diffusion précoce de ces outils a permis de bénéficier des retours de la communauté utilisateur, contribuant ainsi à l'amélioration continue des performances et de la précision des résultats. La mission CO3D, avec sa constellation de satellites, permet désormais de produire ces MNS de manière totalement automatique et à une résolution sans précédent, couvrant l'ensemble de la surface émergée de la Terre.

Les perspectives d'évolution de ces outils open-source sont nombreuses. Pour en citer quelques unes, `CARS` pourrait intégrer de nouvelles méthodes d'évaluation des incertitudes, notamment en prenant en compte la notion de risque (Malinowski, 2024) dans le calcul de la carte de performance. Par ailleurs, le masque de bâti issu de `SLURP` pourrait permettre d'affiner la corrélation sur les bords de bâtiments afin d'obtenir une meilleure restitution 3D. Une attention particulière devra être portée à l'amélioration de la régularisation des masques de bâti dans `SLURP` car actuellement la qualité des masques de bâti n'est pas suffisante. `CARS` pourrait bénéficier de l'intégration de nouvelles métriques de similarité plus performantes et plus rapides permettant de gagner significativement du temps lors du calcul de la carte de disparité. L'optimisation de la régularisation spatiale dans `CARS` pourrait également être améliorée en utilisant des cartes d'occupation des sols pour guider le processus de mise en correspondance. Par ailleurs, `xDEM` pourrait développer de nouvelles fonctionnalités pour la comparaison de cartes d'occupation du sol afin notamment d'évaluer les performances des masques de `SLURP`. Le développement de méthodes pour traiter les nuages de points dans `xDEM` pourrait également être exploré pour élargir les capacités d'analyse des modèles 3D. Pour finir, des travaux sont en cours afin d'améliorer l'hydro-compatibilité de `Bulldozer` ainsi que sa capacité à restituer le haut des montagnes.

Références

Achanta, R., Shaji, A., Smith, K., Lucchi, A., Fua, P., Süsstrunk, S., 2012. Slic superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 34 (11), 2274–2282.

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.

Cournet, M., Sarrazin, E., Dumas, L., Michel, J., Guinet, J., Youssefi, D., Defonte, V., Fardet, Q., 2020. Ground truth generation and disparity estimation for optical satellite imagery. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLIII-B2-2020, 127–134.

de Franchis, C., Meinhardt-Llopis, E., Michel, J., Morel, J.-M., Facciolo, G., 2014. An automatic and modular stereo pipeline for pushbroom images. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II-3, 49–56.

Defonte, V., Dumas, L., Cournet, M., Sarrazin, E., 2021. Evaluation of MC-CNN based stereo matching pipeline for the co3d earth observation program. Dans : 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. pp. 7670–7673.

Hirschmuller, H., 2008. Stereo Processing by SemiGlobal Matching and Mutual Information. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 30 (2), 328–341.

Horn, B., 1981. Hill shading and the reflectance map. Proceedings of the IEEE 69 (1), 14–47.

https://doi.org/10.52638/rfpt.2026.741

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 15, 6456–6472.

Jenness, J. S., 2004. Calculating landscape surface area from digital elevation models. Wildlife Society Bulletin 32 (3), 829–839.

Krauß, T., d'Angelo, P., Schneider, M., Gstaiger, V., 2013. The fully automatic optical processing system catena at dlr. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-1/W1, 177–183.

Lallement, D., Lassalle, P., Ott, Y., 2023. Bulldozer, a free open source scalable software for dtm extraction. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLVIII-4/W7-2023, 89–94.

Lebègue, L., Cazala-Hourcade, E., Languille, F., Artigues, S., Melet, O., 2020. Co3d, a worldwide one one-meter accurary dem for 2025. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLIII-B1-2020, 299–304.

Malinowski, R., 2024. Uncertainty characterisation in stereophotogrammetry using satellite images. Thèse de doctorat, thèse de doctorat dirigée par Destercke, Sébastien Informatique : Unité de recherche Heudyasic (UMR-7253) Compiègne 2024.

Melet, O., Youssefi, D., L'Helguen, C., Michel, J., Sarrazin, E., Languille, F., Lebègue, L., 2020. Co3d mission digital surface model production pipeline. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLIII-B2-2020, 143–148.

Minár, J., Evans, I. S., Jenčo, M., 2020. A comprehensive system of definitions of land surface (topographic) curvatures, with implications for their application in geoscience modelling and prediction. Earth-Science Reviews 211, 103414.

Mussard, C., Constantin, A., Sarrazin, E., 2025. Mise en correspondance d'images satellites dans un espace latent variationnel contraint par information mutuelle. Dans : 30e Colloque sur le traitement du signal et des images. Strasbourg.

Qin, R., 2016. Rpc stereo processor (rsp) – a software package for digital surface model and orthophoto generation from satellite stereo imagery. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences III-1, 77–82.

Riley, S., Degloria, S., Elliot, S., 01 1999. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. Internation Journal of Science 5, 23–27.

Rupnik, E., Daakir, M., Pierrot Deseilligny, M., décembre 2017. MicMac – a free, open-source solution for photogrammetry. Open Geospatial Data, Software and Standards 2 (1).

Sarrazin, E., Cournet, M., Dumas, L., Defonte, V., Fardet, Q., Steux, Y., Jimenez Diaz, N., Dubois, E., Youssefi, D., Buffe, F., 2021. Ambiguity concept in stereo matching pipeline. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLIII-B2-2021, 383–390.

Tanguy, Y., Raille, C., Buffe, F., 2024. Smart land use masks : A simple and robust approach to produce low/high vegetation masks from a single high resolution satellite image. Dans : IGARSS 2024 - 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Athens, Greece, July 7-12, 2024. IEEE, pp. 4164–4168.

Youssefi, D., Michel, J., Sarrazin, E., Buffe, F., Cournet, M., Delvit, J.-M., L'Helguen, C., Melet, O., Emilien, A., Bosman, J., 2020. Cars : A photogrammetry pipeline using dask graphs to construct a global 3d model. Dans : IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. pp. 453–456.

https://doi.org/10.52638/rfpt.2026.741