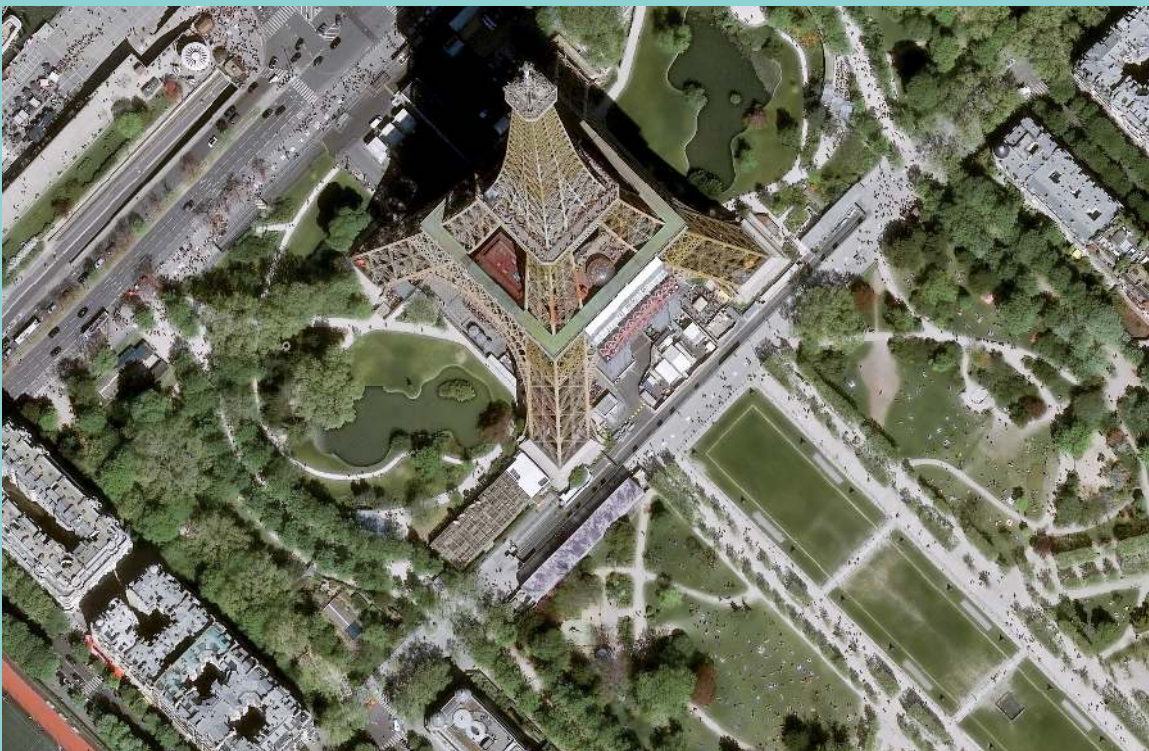


Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection

Vol. 226 (2024)

Spécial Pléiades NEO



Société
Française de
Photogrammétrie
et de Télédétection



Société
Française de
Photogrammétrie
et de Télédétection



Société
Française de
Photogrammétrie
et de Télédétection

Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection

© Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection
Association formée sous le régime de la loi de 1901
Siège social : 73, avenue de Paris, 94165 Saint-Mandé Cedex
e-mail : sfpt-bureau@sfpt.fr – web : sfpt.fr & rfpt.sfpt.fr

Rédactrice en chef : **Ewelina RUPNIK** (LASTIG, UGE, IGN-ENSG)
Rédacteur invité du numéro spécial *Pléiades NEO* : **Michael TONON** (CNES)

COMITE DE REDACTION

Jean-Stéphane BAILLY AgroParisTech	Cécile GOMEZ IRD Inde	Margareth SIMÕES EMBRAPA Brésil
Touria BAJJOUK IFREMER	Dominique GUYON INRA	Elisabeth SIMONETTO ESGT-CNAM
Agnès BEGUE CIRAD	Rafaele HENO IGN	Silva VALERO CESBIO
Thomas CORPETTI LETG-Rennes, UMR6554	Florent LAFARGE INRIA	Jan Dirk WEGNER ETH Zürich Suisse
Benoît DEFFONTAINES Université Gustave Eiffel UGE	Luc LAPIERRE Retraité, CNES	Olivier DE JOINVILLE Retraité DGAC
Nicolas DELBART Université Paris-Diderot	Marie-José LEFEVRE-FONOLLOSA Retraitee, CNES	Pierre-Louis FRISON LaSTIG, Univ Gustave Eiffel
Jean-Marc DELVIT CNES	Jérôme PICARD CNRS-UMR 8586 PRODIG	Nahossio GONGA GeoFit
Sylvie DURRIEU INRAE	Laurent POLIDORI CESBIO	Mehdi DAAKIR LASTIG, UGE, IGN-ENSG
Cyrielle GUÉRIN CEA	Jean-Paul RUDANT LaSTIG, Univ Gustave Eiffel	David SHEEREN ENSAT

BUREAU DE LA SFPT

Présidente :	Raphelle HENO (Aurélie SAND jusqu'au 6/2024)
Vice-Président :	Jean-Paul RUDANT
Secrétaire Général :	Michael TONON
Trésorier :	Luc LAPIERRE
Vice-trésorière :	Elisabeth SIMONETTO
Responsable du numérique :	Philippe ALBERT

CONSEIL D'ADMINISTRATION

Philippe ALBERT GEOFIT	Olivier DE JOINVILLE Retraité DGAC	Aurélie SAND CNES
François BECIRSPAHIC IGN	Jean-Marc LAHERRÈRE CNES	Maxime SEGUIN Ministère de la Culture
Jean-Marc DELVIT CNES	Luc LAPIERRE Retraité, CNES	Elisabeth SIMONETTO ESGT / CNAM
Jean Baptiste FERET INRAE	Clément MALLET LaSTIG, UGE, IGN-ENSG	Sylvia SYLVANDER CNES
Cyrielle GUERIN CEA	Sandrine MATHIEU ACRI-ST	Michaël TONON Airbus
Dominique GUYON INRAE	Nicolas PAPANODITIS LaSTIG, UGE, IGN-ENSG	Cécile VIGNOLLES CNES
Raphaële HÉNO IGN	Jean-Paul RUDANT LaSTIG, UGE, IGN-ENSG	



Michaël Chemouny
VP Geospatial Business, Space Digital
Airbus Defence and Space

Editorial

C'était en 1986 que le CNES au travers de sa filiale Spot Image lançait son premier satellite d'observation de la terre SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre). Une PME qu'aujourd'hui on qualifierait de start-up ! Des équipes passionnées, une expertise pointue, reconnue mondialement ont mis Toulouse au cœur du développement des activités liées au spatial et à la télédétection en particulier !



1986 : SPOT, le lancement de l'aventure spatiale française en Observation de la Terre



2021 : Pléiades Neo, l'aventure continue (Toulouse vue par Pléiades Neo) !

Depuis 38 ans, le marché a grossi, les technologies ont beaucoup évolué, la R&D n'en finit plus d'innover ! Ce qui ne change pas c'est l'esprit pionnier qui anime la communauté du spatial français.

En 2021, Airbus a lancé 2 satellites Pléiades Neo offrant la meilleure résolution du marché à ce jour, 30cm. Ces 2 satellites ont été conçus, construits, lancés, opérés et entièrement financés par le groupe Airbus.

Depuis lors, ces satellites ont déjà acquis presque 3 fois la surface de la terre et la qualité des images ravit tous ceux qui ont l'occasion de les utiliser.

Le 5 octobre 2023 à Toulouse a eu lieu le séminaire Pléiades Neo de la SFPT où nous avons pu découvrir de nouveaux usages des images, les avis des spécialistes, chercheurs, analystes sur l'apport de ces images et leur qualité. Le nombre de participants, la richesse et la qualité des interventions montrent une fois de plus l'engouement que suscitent ces nouvelles technologies au cœur de la ville qui les a vu naître en France.

Ce numéro spécial rassemble toutes ces présentations.

Je vous en souhaite une lecture enrichissante et inspirante !

DE PLÉIADES À PLÉIADES NEO : UNE ANALYSE DE L'AMÉLIORATION DE LA RESTITUTION 3D

David Youssefi¹, Dimitri Lallement¹, Christian Hümmer¹, Emmanuelle Sarrazin¹, Emmanuel Dubois¹,
Jean-Marc Delvit¹

¹: Centre Nationale d'Études Spatiales (CNES), 18 Avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, Cedex, France

Résumé

Fort de son expertise en géométrie et en 3D, le Centre National d'Études Spatiales (CNES) développe de nouveaux outils open-source capitalisant une partie de son savoir-faire. Ils sont destinés à être au cœur du segment sol de la mission CO3D et à servir tout l'écosystème aval. Le traitement de ces données impose de concevoir des chaînes robustes, capables de passer à l'échelle. De ce fait, les outils 3D du CNES sont massivement parallélisables, utilisant des technologies multiprocesseurs voire multi-nœuds tout en restant agnostique au matériel utilisé. Ces logiciels proposent des interfaces simples afin de permettre également leur utilisation en dehors des chaînes de traitement opérationnelles. Ces outils sont capables de produire un Modèle Numérique de Surface (MNS) à partir de couples stéréoscopiques d'images (CARS) dont l'étape majeure repose sur la mise en correspondance (Pandora). Par la suite, ils permettent d'extraire un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à partir du MNS produit (Bulldozer) et d'en dériver un Modèle Numérique de Hauteur (MNH). Suite à cela, des comparaisons entre tous ces modèles numériques d'élévation peuvent également être effectuées (Demcompare). Dans l'attente de l'arrivée des données CO3D, le CNES éprouve d'ores et déjà ces outils sur d'autres capteurs, dont Pléiades et plus récemment Pléiades Neo. Cet article qualifie l'amélioration de cette restitution 3D apportée par cette nouvelle génération de satellite. Les outils 3D du CNES sont sous licence libre et non contaminante (Licence Apache v2) afin de notamment permettre l'exploitation et la valorisation des données Pléiades et maintenant Pléiades Neo. Ils offrent enfin la possibilité de reproduire les résultats présentés dans cet article.

Mots clés : Pléiades, Pléiades Neo, Modèle Numérique de Surface, Modèle Numérique de Terrain, Code ouvert

Abstract

Based on its expertise in geometry and 3D, the Centre National d'Études Spatiales (CNES) is developing new open-source tools capitalizing on its knowledge. They are intended to be part of the CO3D mission's ground segment, and to serve the entire applicative ecosystem. Processing this data requires robust softwares able to scale up. As a result, CNES 3D tools are massively parallelizable, using multiprocessor and even multi-node technologies, while remaining hardware agnostic. These software offer simple interfaces so that they can also be used outside operational processing chains. The tools presented in this article can be used to produce a Digital Surface Model (DSM) from stereoscopic image pairs (using CARS). The main step for the DSM computation is the stereo matching and it's also performed using a CNES 3D tool (Pandora). They also allow to extract a Digital Terrain Model (DTM) from the produced DSM (using Bulldozer) and to derive a Digital Height Model (DHM). Following this, comparisons between all these digital elevation models can also be made (using Demcompare). In anticipation of CO3D data, the CNES is already testing these tools on other sensors, including Pléiades and more recently Pléiades Neo. This article describes the improvement in 3D reconstruction thanks to this new generation of satellites. CNES's 3D tools are licensed under a free and non-contaminating license (Apache v2 License), enabling the exploitation and enhancement of Pleiades and now Pleiades Neo data. They also offer the possibility of reproducing the results presented in the article.

Keywords : Pléiades, Pléiades Neo, Digital Surface Model, Digital Terrain Model, Open source

1. Contexte

1.1. Introduction

Depuis 2021, Pléiades Neo assure la continuité de la mission Pléiades, avec des performances accrues en termes de précision.

Fabriqués, détenus et exploités par Airbus Defence and Space, ces satellites nouvelle génération reprennent l'agilité de leurs aînés Pléiades HR 1A et 1B lancés maintenant il y a plus de 10 ans permettant des prises de vue complètement adaptées à de la restitution 3D.

L'agilité des satellites Pléiades HR et Pléiades Neo permettent en effet, d'assurer de multiples acquisitions en une seule passe. En acquérant des images de la même zone sous de multiples points de vue, il est ainsi possible de créer des cartes de la topographie communément appelées Modèles Numériques de Surface (MNS).

Comme l'illustre la Figure 1, le MNS est une représentation à la fois du sol, appelé Modèle Numérique de Terrain (MNT), et du sursol comme la végétation ou les

bâtiments. En retranchant le MNT au MNS, on obtient le Modèle Numérique de Hauteur (MNH) qui stocke l'information altimétrique du sursol indépendamment de la topographie du paysage.



FIGURE 1 : Différence entre le MNS et le MNT.

Dans le cadre de la future mission CO3D, dont l'objectif est de modéliser en 3D les surfaces émergées du globe (Lebègue et al., 2020), le CNES a développé une panoplie d'outils pour générer et comparer ces modèles numériques. L'arrivée massive de données 3D avec cette mission amène le CNES à assurer le passage à l'échelle de ses outils. Et étant donné que ces briques logicielles sont adaptables à d'autres capteurs, le CNES a voulu évaluer l'amélioration de la qualité des produits 3D entre Pléiades et Pléiades Neo.

1.2. Objectif de l'article

Depuis plus de 10 ans, les satellites Pléiades HR ont largement pu démontrer leur capacité à générer des données exploitables pour produire des MNS. L'objet de cet article est de qualifier l'amélioration de cette restitution 3D apportée par la nouvelle gamme de satellites PNEO, de façon quantitative et qualitative dans le cas de la reconstruction 3D urbaine.

Pour ce faire, les outils 3D open-source du CNES ont été utilisés : CARS (Youssefi et al., 2020) pour la génération de MNS, Bulldozer (Lallement et al., 2022) pour l'extraction de MNT à partir du MNS et Demcompare pour la qualification des Modèles 3D générés. Comme le but est d'évaluer l'apport des capteurs et non la performance des outils, ces chaînes sont utilisées avec les mêmes paramètres pour Pléiades et Pléiades Neo.

1.3. Données utilisées

Les données utilisées lors de cette étude sont deux paires d'images Pléiades HR (PHR) et Pléiades Neo (PNEO) acquises sur le centre-ville de Nice. L'acquisition PHR a eu lieu le 13 octobre 2018 à 10h15 (heure locale) et l'acquisition PNEO a eu lieu le 29 décembre 2021 à 10h29 (heure locale). La figure 2 représente les conditions d'acquisitions de chaque paire : les données PHR sont séparées d'un angle de 12° tandis que les données PNEO d'un angle de 20° . Ces conditions d'acquisition sont favorables à PHR pour voir les fonds de rue, mais PNEO profite d'un rapport B/H légèrement avantageux pour la précision altimétrique. Cependant, ces configurations restent relativement proches.

Ces données ont été préalablement recalées via une spatio-triangulation en utilisant la base de calage 3D SRP (Chandelier et al., 2021).

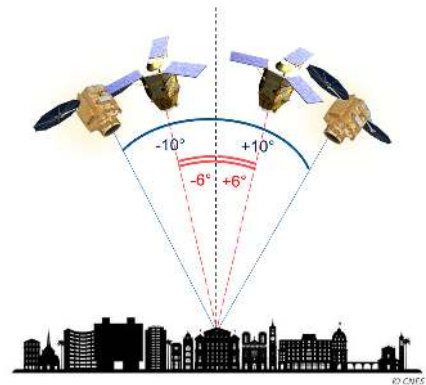


FIGURE 2 : Angles d'incidence pour la prise de vue stéréo PNEO (bleu) et PHR (rouge).

Le Lidar HD@¹ est utilisé dans cette étude comme donnée de référence. Les MNS PHR et PNEO sont comparés à la vérité terrain LiDAR HD@ à 50 cm : ils ont été projetés dans une grille régulière commune de 3000x3000 pixels, soit une zone d'étude de plus de 2 km². Le choix a été fait de travailler avec cette résolution de 50 cm comme compromis entre les résolutions des bandes panchromatiques (PAN) de PHR (70 cm) et de PNEO (30 cm) servant à générer les MNS.

1.4. Limites de l'analyse

Les résultats ne sont pas exhaustifs et présentent les différences de performances observées sur une zone urbaine particulière. Il mériterait une étude complémentaire sur d'autres villes ou d'autres types d'éléments comme la végétation. L'analyse s'est concentrée sur la thématique urbaine et la qualification de bâtiments assurant une stabilité temporelle en altitude, autorisant l'utilisation combinée des acquisitions PHR, PNEO et LiDAR HD@ à des dates différentes.

2. Évaluation des performances MNS

2.1. La chaîne de restitution stéréo CARS

CARS pour Chaîne Automatique de Restitution Stéréoscopique est une chaîne de photogrammétrie permettant d'extraire à partir de paires d'images le MNS comme l'illustre la figure 3.

L'outil réalise cette restitution d'altitude en enchaînant les étapes classiques d'un pipeline stéréo multi-vues décrites dans la figure 4, à savoir :

1. le ré-échantillonnage des images en géométrie épipolaire, géométrie dans laquelle les pixels composant les objets immobiles se déplacent le long des lignes, et ce, afin d'accélérer l'étape de mise en correspondance des pixels qui suit,
2. l'appariement dense des pixels (ou calcul de disparités) de la paire d'image réalisé par Pandora décrit dans la section 2.2 : pour chaque pixel d'une image de référence, on cherche à trouver le pixel correspondant,

1. Lien LiDAR HD@ : geoservices.ign.fr/lidarhd

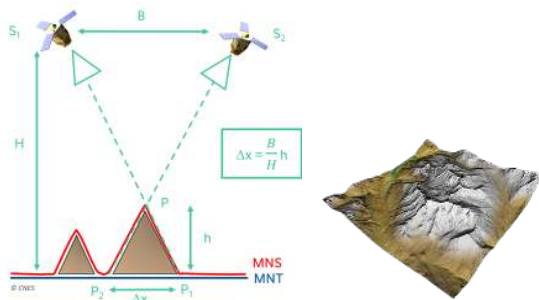


FIGURE 3: A gauche : Configuration à deux satellites séparés d'une distance B à une altitude H : le ratio B/H est classiquement utilisé pour qualifier cette configuration. A droite : un exemple de MNS.

3. la triangulation des lignes de visée issues des positions images des pixels qui se correspondent pour obtenir un nuage de points 3D

Les nuages de points 3D générés par paire peuvent alors être concaténés puis projetés dans une grille terrain régulière afin d'obtenir le Modèle Numérique de Surface final comme image géoréférencée d'altitude au sol.

A savoir, que toutes ces étapes sont réalisées par tuile permettant ainsi une parallélisation totale des traitements.

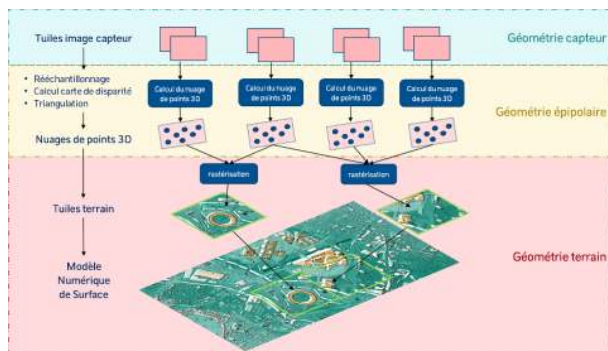


FIGURE 4: Principe simplifié du fonctionnement de CARS.

Ce pipeline multi-vues nécessite une étape de pré-traitement. En effet, les images satellite servant à générer les modèles 3D sont accompagnées de modèles géométriques souvent sous la forme d'une représentation compacte (RPC) (Grodecki et Dial, 2003) pour faciliter leur utilisation. Ces modèles peuvent comporter des imprécisions qui empêchent un ré-échantillonnage dans une géométrie épipolaire parfaite (où les correspondants se retrouveraient bien exactement sur la même ligne). C'est pourquoi, les mêmes étapes du pipeline multivues : 1. de ré-échantillonnage et 2. de mise en correspondance sont réalisées. Seulement cette fois, pour la mise en correspondance, ce sont des points homologues épars comme des SIFT (Lowe, 2004) qui sont utilisés. L'utilisation de ces points homologues permet de corriger la géométrie épipolaire. Ils permettent aussi d'avoir une première estimation des altitudes de la scène pour la mise en correspondance.

Les algorithmes de la chaîne sont décrits plus précisément dans (Michel et al., 2020). Aussi, le code est disponible sur PyPI² et GitHub³.

2.2. Le corrélateur Pandora

Pandora est un framework de mise en correspondance qui consiste à associer les points homologues entre deux images. Pandora prend en entrée une paire d'images rectifiées, c'est-à-dire en géométrie épipolaire. Dans cette géométrie, la recherche du point homologue se fait sur la même ligne, ce qui a l'avantage de réduire le temps de calcul. À partir de cette paire d'images, Pandora produit une carte de disparité, correspondant à l'écart en colonnes des pixels homologues.

Le calcul de mise en correspondance est inspiré des travaux de (Scharstein et Szeliski, 2002). Le principe consiste d'abord à calculer un volume de coûts. Pour ce faire, il s'agit d'évaluer une mesure de similarité entre un pixel donné de l'image de gauche et chaque pixel de l'image de droite inclus dans l'intervalle de disparité considéré. L'ensemble des mesures de coût forme la courbe de coût pour le pixel donné. Toutes les courbes de coût sont rassemblées dans un volume de coûts. La disparité est ensuite déduite du volume de coûts en sélectionnant le pixel de l'image de droite pour lequel le score de corrélation est le plus élevé (ou le plus faible en fonction de la mesure de similarité considérée). Des étapes supplémentaires peuvent être ajoutées afin d'améliorer la carte de disparité produite.

Pandora est très modulaire et facilement configurable. Il est possible de sélectionner les étapes à réaliser, de choisir parmi plusieurs méthodes à chaque étape et de configurer les paramètres de chaque méthode. Le code est disponible sur PyPI⁴ et GitHub⁵.

Dans la suite de l'article, le pipeline Pandora utilisé est le suivant :

1. calcul du volume de coûts obtenu à l'aide MCCNN (Žbontar et LeCun, 2015),
2. optimisation avec Semi-Global Matching (Hirschmuller, 2008),
3. sélection de la disparité,
4. affinage sous-pixellique avec vfit (Haller et al., 2010),
5. filtrage avec un filtre médian,
6. validation croisée (Fua, 1993).

2.3. L'outil d'analyse Demcompare

Demcompare est un outil de comparaison de Modèle Numérique d'Élévation (MNE). Il permet donc de comparer des MNS, MNT et MNH entre eux. Les résultats des comparaisons ont deux applications majeures : la qualification d'un produit 3D (comparaison d'un MNE avec une

2. Lien PyPI : pypi.org/project/cars

3. Lien GitHub : github.com/CNES/cars

4. Lien Pypi : pypi.org/project/pandora

5. Lien Github : github.com/CNES/pandora

référence) et la détection de changement (comparaison de deux MNE à deux dates différentes). Contrairement à une simple différence entre les deux MNE au format matriciel, Demcompare intègre des briques logicielles permettant de projeter les MNE dans une géométrie terrain commune à une résolution définie. Une étape de co-registation optionnelle basée sur la méthode de Nuth et Kääb (2011) permet de distinguer les différences altimétriques et planimétriques. En recalant ainsi les MNE, on s'assure d'analyser uniquement les différences d'élévation et pas un biais lié à des différences de modèles géométriques des MNE en entrée. L'outil intègre également un module de statistiques contenant un ensemble de métriques (médiane, écart-type, RMSE, etc.) permettant de qualifier les différences à l'échelle de la scène ou en fonction d'une classification. En effet, Demcompare est capable de gérer des classifications afin de faire des analyses en fonction de critères (notamment sémantiques) et propose également un module de classification par type de pente ([0%,5%], [5%,10%], etc.). L'outil a été conçu de sorte à être facile d'utilisation et propose notamment une interface en Python ou via des notebooks Jupyter. Il est évolutif et adaptable si l'on souhaite lancer une qualification plus précise. Demcompare est disponible sur Pypi⁶ et Github⁷.

2.4. Référence utilisée

Comme décrit dans la section 1.3, la donnée LiDAR HD® a été utilisée pour qualifier les MNS. La classification associée est aussi une donnée importante, car elle permet, comme présentée ci-après, d'isoler les statistiques pour les différentes classes (bâtiments et sol notamment). Aussi, comme la donnée LiDAR HD® est très résolue, elle permet de calculer les pentes locales (notamment sur les toits de bâtiments) et de mettre en évidence la restitution des pans de toits.

2.5. Analyse des résultats

2.5.1. Résultat sur la zone complète

Une première analyse ne prenant pas en compte les classes sémantiques montre une nette amélioration de la reconstruction 3D de Pléiades HR à Pléiades NEO.

Premièrement, on peut voir sur la figure 5 que le MNS PNEO comporte beaucoup moins de pixels sans donnée (nodata) que PHR. Ce résultat était attendu au vu de la différence de résolution (et donc à un nombre de mesures d'altitude augmenté). Mais ces pixels à l'altitude indéterminée sont surtout situés dans les zones d'ombres. Par conséquent, il n'y a pas que la résolution spatiale qui explique ce phénomène. Dans les ombres, le rapport signal à bruit amélioré combiné à un échantillonnage plus fin autorise des corrélations nouvelles.

Deuxièmement, on observe dans le tableau 1 que les médianes semblent relativement proches. Cette mesure

ne permet pas de montrer une réelle différence de performance lorsque toutes les classes sémantiques sont confondues.

Troisièmement, l'écart interquartile et le NMAD montrent plus distinctement l'amélioration de performance attendue entre PHR et PNEO. L'écart interquartile est une mesure de dispersion qui s'obtient en faisant la différence entre le troisième quartile et le premier quartile. C'est un estimateur statistique plus robuste qu'un écart-type. L'équation 1 définit le NMAD, acronyme anglais pour désigner l'écart-type absolu médian. Tout comme l'écart interquartile, cette mesure est insensible aux points aberrants. Elle est communément utilisée pour qualifier les performances d'un MNS.

$$\text{NMAD} = b * \text{median}(|x_i - \text{median}(x)|) \quad (1)$$

où $b = 1.4826$ est une constante liée à l'hypothèse de normalité des données sans tenir compte de l'anormalité induite par des points aberrants (Rousseeuw et Croux, 1993).

Ces mesures statistiques robustes aux points aberrants reflètent quantitativement l'amélioration visible sur l'histogramme présenté dans la figure 6. Seulement, l'histogramme est un mélange de distribution et donc, pour savoir plus précisément qualifier ces améliorations, il a été choisi d'isoler une partie des différentes classes sémantiques composant la scène.

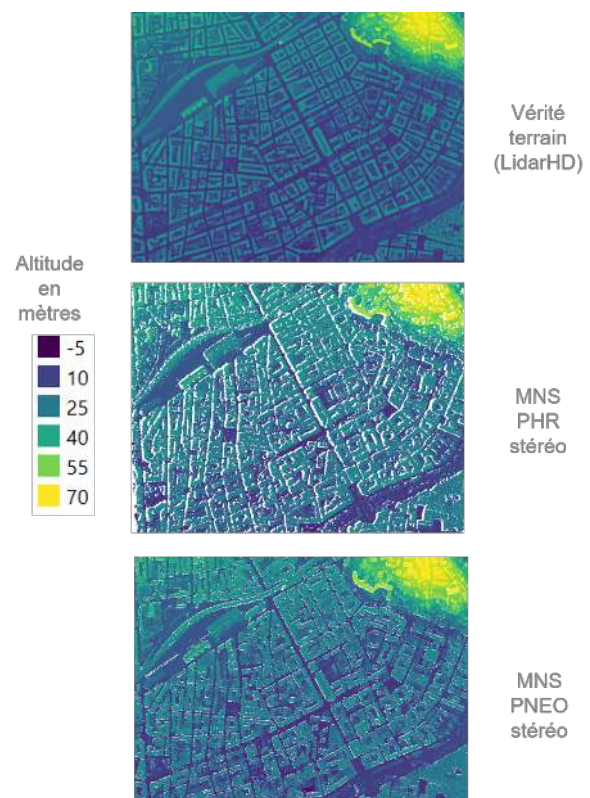


FIGURE 5: En haut : MNS LiDAR HD®. Au milieu : MNS PHR. En bas : MNS PNEO.

6. Lien Pypi : <https://pypi.org/project/demcompare/>

7. Lien Github : <https://github.com/CNES/demcompare>

Capteur	PHR	PNEO
nodata	16.31 %	5.23 %
Médiane	0.19 m	0.01 m
Écart interquartile	4.57 m	2.84 m
NMAD	1.79 m	1.11 m

TABLE 1: Statistiques des différences altimétriques sur toute la zone entre le MNS de référence LiDAR HD® et les MNS PHR et PNEO.

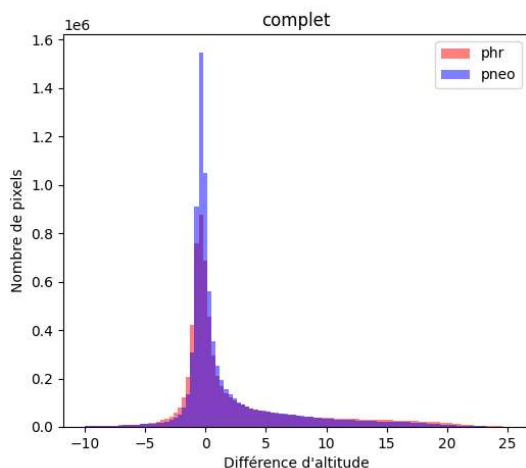


FIGURE 6: Histogramme des différences altimétriques PHR / LiDAR HD® en rouge et PNEO / LiDAR HD® en bleu sur toute la zone (le recouvrement est en violet).

2.5.2. Résultat sur la classe "bâtiment"

Grâce à la classification LiDAR HD®, il est possible d'isoler les pixels appartenant à du bâtiment dans les MNS associés. Comme la figure 7 le montre, on obtient une distribution plus proche d'une loi normale ce qui permet de qualifier plus précisément les performances sur les bâtiments. Les statistiques du tableau 2 montre une amélioration très nette des performances sur les mesures statistiques robustes à savoir l'écart interquartile et le NMAD.

Capteur	PHR	PNEO
nodata	5.94 %	1.43 %
Médiane	-0.34 m	-0.29 m
Écart interquartile	0.93 m	0.61 m
NMAD	0.68 m	0.44 m

TABLE 2: Statistiques des différences altimétriques sur la classe "bâtiment" entre le MNS de référence LiDAR HD® et les MNS PHR et PNEO.

La figure 8 permet de visualiser la pente des toits du LiDAR HD® et de les comparer aux différences d'altitude entre PHR et LiDAR HD®, et, PNEO et LiDAR HD®. On remarque que les toits pentus sont mieux restitués avec PNEO qu'avec PHR. Ceci permet d'espérer de pouvoir générer des maquettes 3D de bâtiments avec un nou-

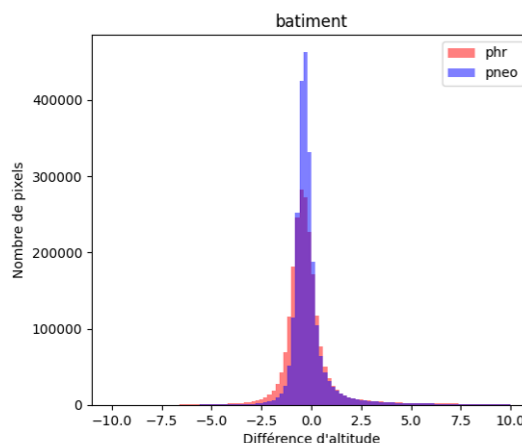


FIGURE 7: Histogramme des différences altimétriques PHR / LiDAR HD® en rouge et PNEO / LiDAR HD® en bleu sur la classe "bâtiment" (le recouvrement en violet).

veau niveau de détails grâce à PNEO.

2.5.3. Résultat sur la classe "sol"

Isoler la classe sol permet de compléter l'analyse. Les images de la figure 9 montrent que même sur PNEO, les principales erreurs sont commises dans la restitution des rues dues à l'adhérence de la corrélation. En effet, les pixels mis en correspondance dans le processus de photogrammétrie sont appariés grâce à leur voisinage. Les bords de bâtiments sont donc généralement imprécisément restitués. Aussi, ces zones, à fortes différences d'altitude par rapport à la référence, sont bien réduites grâce à la résolution augmentée de PNEO malgré des conditions d'acquisitions favorables pour PHR comme décrit dans la section 1.3.

Si on analyse l'histogramme en figure 10, on remarque que le nombre de points confondus entre le sol et les bâtiments (population avec une erreur autour de 15 m) est très grandement réduit avec PNEO, augmentant drastiquement le nombre de points justes (ajouté aux points valides qui étaient invalides avec PHR).

Capteur	PHR	PNEO
nodata	23.7 %	7.1 %
Médiane	1.21 m	-0.07 m
Écart interquartile	11.22 m	2.59 m
NMAD	3.04 m	0.90 m

TABLE 3: Statistiques des différences altimétriques sur la classe "sol" entre le MNS de référence LiDAR HD® et les MNS PHR et PNEO.

2.5.4. Résultats qualitatifs

Pour terminer, le zoom sur la gare de Nice dans la figure 11 sur le bâtiment confortent les observations précédentes. A savoir que le MNS PNEO est plus dense et restitue plus fidèlement la forme des toits. Il permet de

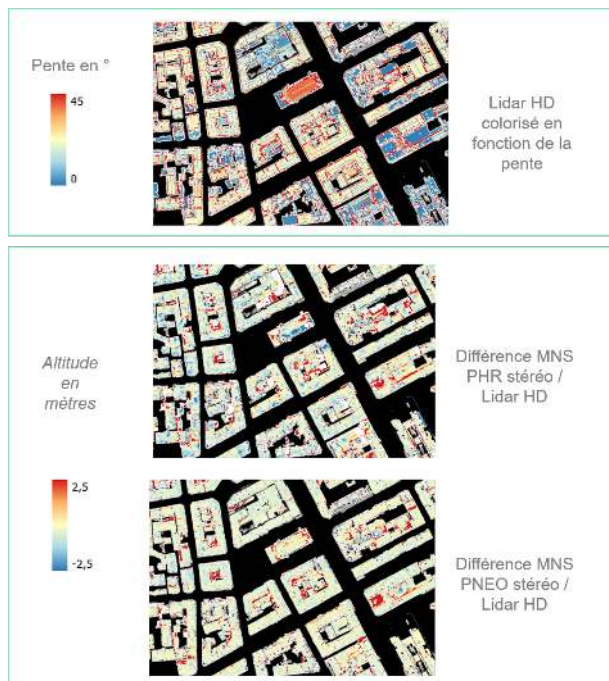


FIGURE 8: En haut, les pixels sont colorisés en fonction de la pente du LiDAR HD® (forte pente : rouge, faible pente : bleu). En bas, les pixels sont colorisés en fonction de la différence d'altitude (forte différence : rouge, faible différence : bleu).

détecter plus de détails notamment sur la voie dans cet extrait. Enfin, le profil de la figure 12 montre que comme pour le MNS PHR, le MNS PNEO estime bien la hauteur du haut des bâtiments. Cependant, la résolution élevée de PNEO permet de récupérer les fonds de rue et la cour intérieure avec une meilleure reconstruction des bords des bâtiments.

3. Évaluation des performances MNT

3.1. L'outil Bulldozer

Bulldozer est un outil dont l'objectif est d'extraire un MNT à partir d'un MNS. Contrairement à de nombreuses méthodes, il n'a besoin pas d'autres données exogènes en entrée comme un masque de sursol ou un masque d'eau. Bulldozer est conçu pour fonctionner avec des MNS raster à partir de divers types de capteurs : photogrammétrie satellitaire, photogrammétrie aérienne, LiDAR, etc. Comme décrit dans (Lallement et al., 2023), Bulldozer est basé sur une version modifiée du principe de simulation de lâché de drap multi-échelle et intègre une stratégie de tuilage prenant en compte une marge de stabilité ce qui permet de traiter des MNS de toute taille tout en garantissant une homogénéité dans les résultats produits. Des efforts ont notamment été faits sur la capacité de l'outil à traiter des MNS bruités comme l'on peut obtenir en imagerie satellitaire à cause des erreurs de corrélations sur les zones radiométriquement uniformes (ombres, eau, etc.). On peut vulgariser son fonctionnement avec l'illustration de la figure 13 : dans l'étape 1,

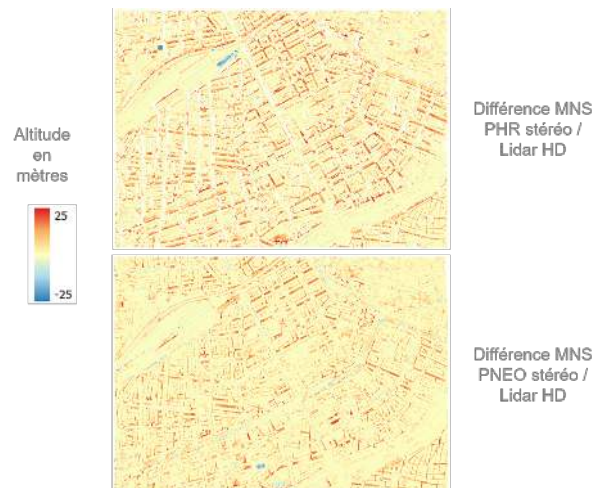


FIGURE 9: Différences altimétriques MNS PHR / LiDAR HD® et MNS PNEO / LiDAR HD® pour la classe "sol".

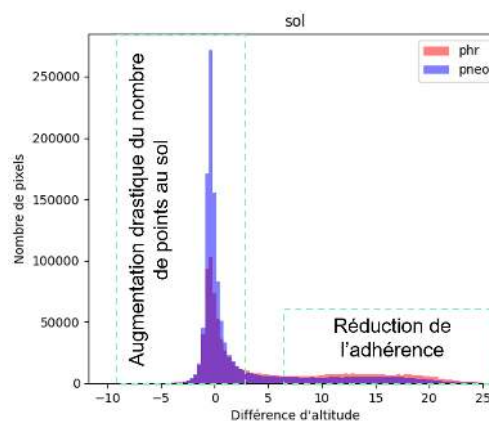


FIGURE 10: Histogramme des différences PHR / LiDAR HD® en rouge et PNEO / LiDAR HD® en bleu sur la classe "sol" (le recouvrement en violet).

on inverse le MNS en entrée puis dans l'étape 2 on simule un drap qui tombe sur ce MNS retourné et grâce à un système de points d'accroche sur les zones stables considérées comme du sol et une tension sur les autres zones, on obtient un drap dont la forme correspond au MNT à l'étape 3. Afin de faciliter sa prise en main par les utilisateurs, des travaux ont été menés sur son accessibilité avec notamment la création d'une interface QGIS, la mise en place interface de programmation d'application (API) en Python et la publication du code disponible sur les dépôts de code PyPI⁸ et Github⁹.

3.2. Référence utilisée

Afin de qualifier les MNT PHR et PNEO, il a été fait le choix dans cette étude de se baser sur un MNT de référence calculé à partir du LiDAR HD®. Il existe en France le RGE Alti®¹⁰ qui est une référence MNT produite par l'IGN, mais il a été préféré l'option d'utiliser un

8. Lien PyPI : pypi.org/project/bulldozer-dtm

9. Lien Github : github.com/CNES/bulldozer

10. Lien RGE Alti® : geoservices.ign.fr/rgealti



FIGURE 11: Visualisation des MNS sur la zone de la gare de Nice. En haut : MNS LiDAR HD@. Au milieu : MNS PHR. En bas : MNS PNEO.

MNT élaboré à partir de la référence MNS utilisée dans l'étude. En effet, cela permet de travailler à la même résolution que les MNS, de maîtriser la date de production sur la zone et de s'assurer de la cohérence géométrique et cartographique du produit. Comme le montre la figure 14, le MNT produit avec Bulldozer sur la donnée LiDAR HD@ peut être considéré comme une vérité terrain : il suit parfaitement le relief de la scène sans rentrer dans les bâtiments. Cela s'observe également à travers le MNH calculé avec ce MNT : on voit que le drap n'a pas décroché et donc sous-estimé l'altitude du sol dans la zone de colline en haut à droite de la scène et que les bâtiments sont bien restitués. La même configuration de l'outil a été utilisée pour effectuer l'extraction du MNT de référence LiDAR HD@, du MNT PHR et du MNT PNEO.

3.3. Analyse des résultats

Étant donné que le sol est une structure morphologique que l'on peut qualifier de basses fréquences, on pourrait s'attendre à ce que le changement de résolution apporté par PNEO n'améliore pas significativement la qualité des MNT produits comparé à des MNT issus de MNS PHR. En effet, les changements topographiques du sol sont rarement à l'échelle décimétrique. Comme la

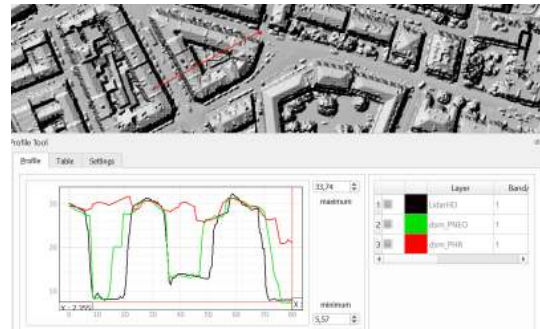


FIGURE 12: Profil 1D sur une rue et une cour intérieure en centre ville. Le MNS PNEO (vert) est plus fidèle à la référence MNS LiDAR HD@ (noir) que le MNS PHR (rouge).

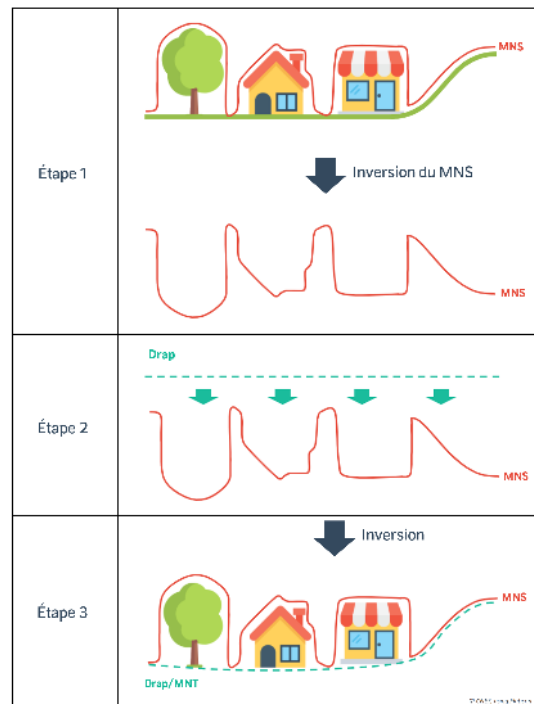


FIGURE 13: Principe simplifié du fonctionnement de Bulldozer.

figure 15 l'illustre, on observe bien une faible différence entre le MNT PNEO et PHR. La haute résolution de PHR suffit déjà à capturer les points au sol permettant une extraction du MNT fidèle à la réalité. Cependant, on remarque dans la figure 16, une nette dégradation de la qualité du MNT PHR par rapport à celui de PNEO. Cela s'explique par la qualité moindre du MNS PHR fourni en entrée de Bulldozer. Pour la même zone d'étude, dans la figure 17 si l'on regarde le MNT généré à partir du MNS PHR, le résultat du lâcher de drap est cohérent. Mais comme montré dans la section 2, le MNS PHR n'étant pas assez précis pour reconstituer le fond de rue, il surestime l'altitude des zones urbaines denses ce qui entraîne un décrochage du drap lors de l'extraction du MNT avec Bulldozer. Au contraire, le MNS PNEO en restituant le fond des rues est capable de fournir des points d'accroche fiables pour la descente de drap. On observe donc finalement que même si la résolution PHR est suffisante pour restituer un MNT fidèle au sol dans le cas de

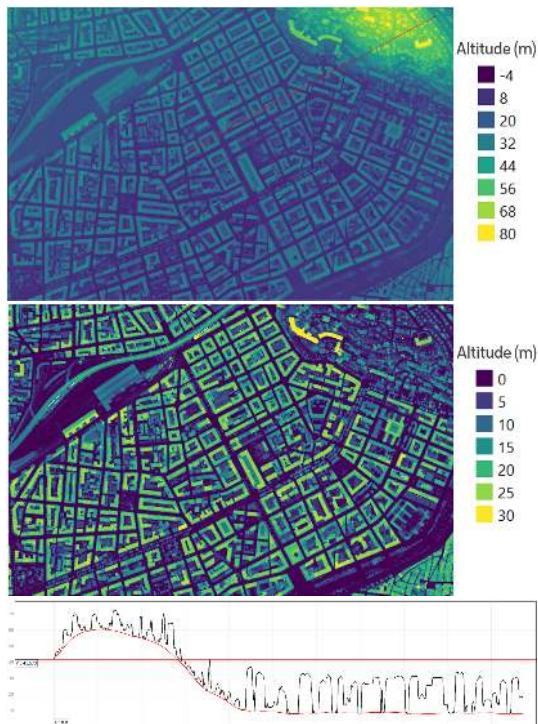


FIGURE 14: En haut : MNS LiDAR HD@. Au milieu : MNH calculé avec Bulldozer à partir du MNS LiDAR HD@. En bas : Profil 1D avec le MNS LiDAR HD@ (noir) et le MNT calculé avec Bulldozer (rouge).

paysage avec du sursol épars, dans le cas d'une scène urbaine dense, on préférera utiliser un MNS PNEO. On peut observer en bas à droite de la figure 18, que ce phénomène décrochage du drap est également visible pour PNEO dans le cas d'une zone urbaine très dense. Les occlusions liées à la prise de vue et la limite de résolution entraîne une mauvaise estimation du MNS qui aboutit à une zone considérée comme une colline par Bulldozer. Dans le cas de cette étude, la scène étant principalement urbaine, on note une nette amélioration des performances altimétriques du MNT PNEO comparé au MNT PHR comme l'illustre le tableau 4.

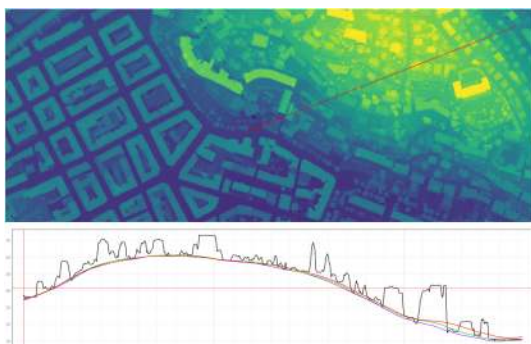


FIGURE 15: Comparaison des MNT PHR (rouge), PNEO (vert) et LiDAR HD@ (violet) en zone périurbaine. Le MNS LiDAR HD@ (noir) est affiché pour illustrer la densité de sursol de la zone, mais n'est utilisé que pour le calcul du MNT LiDAR HD@.

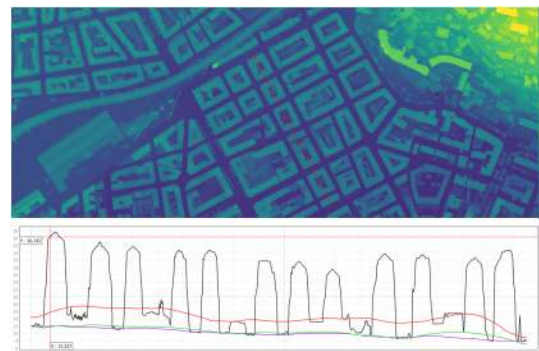


FIGURE 16: Comparaison des MNT PHR (rouge), PNEO (vert) et LiDAR HD@ (violet) en zone urbaine dense. Le MNS LiDAR HD@ (noir) est affiché pour illustrer la densité de sursol de la zone, mais n'est utilisé que pour le calcul du MNT LiDAR HD@.

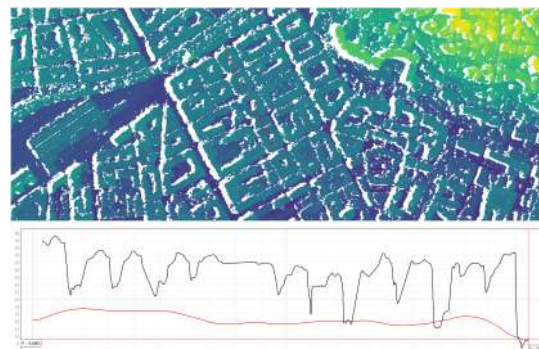


FIGURE 17: Profil 1D avec le MNS PHR (noir) et le MNT Bulldozer (rouge) extrait à partir de ce MNS.

4. Perspectives

Afin de compléter cette première analyse, des travaux complémentaires pourraient permettre d'avoir une vision plus globale de l'apport pour la 3D de la résolution plus fine de Pléiades Neo. Tout d'abord, il serait intéressant d'étudier les performances altimétriques MNS sur d'autres classes sémantiques et notamment sur la végétation. Comme expliqué dans la Section 1.4, cette tâche est compliquée, mais pourrait avoir une forte valeur ajoutée pour des applications spécifiques : estimation de la déforestation, suivi de la végétalisation urbaine, distinction végétation haute-végétation basse dans une carte d'occupation du sol, etc. Il serait également intéressant de consolider ces résultats en étudiant d'autres zones du globe avec des paysages différents (sol en sable, maison avec des toits en tôle, etc.) pour voir si malgré un changement de texture, les résultats sont consistants. Cependant, cela nécessite d'avoir une référence 3D comme le

Capteur	PHR	PNEO
Médiane	2.29 m	0.53 m
Ecart interquartile	3.11 m	1.42 m
NMAD	2.28 m	1.00 m

TABLE 4: Métriques MNT

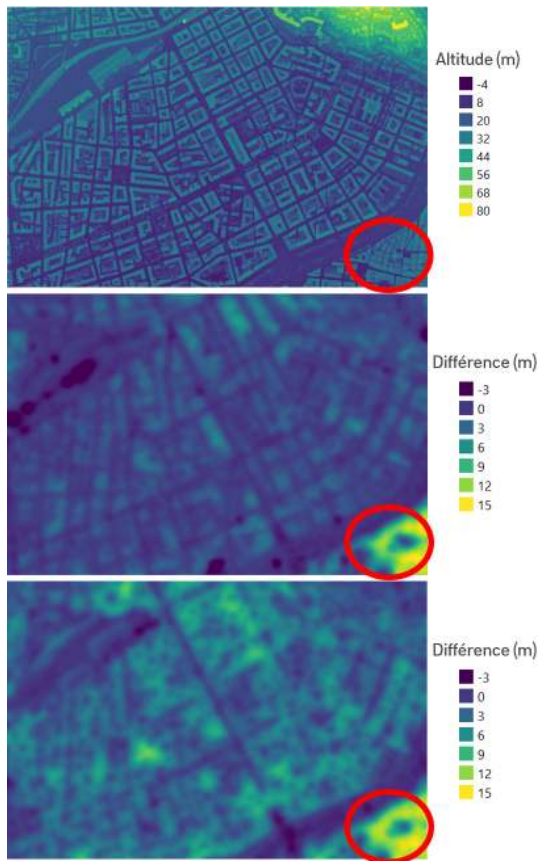


FIGURE 18: En haut : MNS LiDAR HD@ de référence pour illustrer la structure 3D de la scène. Au milieu : différence entre le MNT LiDAR HD@ de référence et le MNT PNEO, en rouge la zone de décrochage. En bas : différence entre le MNT LiDAR HD@ de référence et le MNT PHR, en rouge la zone de décrochage.

LiDAR HD@ et ce type de données en accès libre est rare. Même s'il semble que cela n'affectera pas énormément les résultats présentés dans l'étude, une comparaison avec de meilleures conditions d'acquisition pourrait être pertinente : prise de vue avec des angles plus proche, acquisition tri-stéréoscopique pour comparer la capacité à reconstituer les rues avec une prise de vue nadir, date des acquisitions satellites plus proche de la date de prise de vue LiDAR HD@. Un dernier axe de travail pourrait être d'affiner les paramètres des outils utilisés pour l'évaluation des performances. Comme décrit dans la Section 1.3, dans le cadre de l'étude, les outils 3D ont été utilisés avec des paramètres identiques pour chaque capteur et avec les valeurs par défaut. Il pourrait être intéressant de faire une comparaison avec la configuration optimale des options des outils pour chacun des capteurs afin d'analyser l'apport en performance 3D sur les meilleures versions des produits 3D possible.

Références

Chandelier, L., Coeurdevey, L., Favé, P., Barot, A., Jaussaud, M., oct. 2021. Srp, une base de calage 3d de très haute précision sur le continent africain. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection* 223 (1), 129–142.

URL <https://rfpt.sfpt.fr/index.php/RFPT/article/view/569>

Fua, P., 1993. A parallel stereo algorithm that produces dense depth maps and preserves image features. *Machine Vision and Applications* 6 (1), 35–49.

Grodecki, J., Dial, G., 01 2003. Block adjustment of high-resolution satellite images described by rational polynomials. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 69, 59–68.

Haller, I., Pantilie, C., Oniga, F., Nedevschi, S., June 2010. Real-time semi-global dense stereo solution with improved sub-pixel accuracy. Dans : 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. pp. 369–376.

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

Lallement, D., Lassalle, P., Ott, Y., 2023. Bulldozer, a free open source scalable software for dtm extraction. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*

URL <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W7-2023-89-2023>

Lallement, D., Lassalle, P., Ott, Y., Demortier, R., Delvit, J.-M., 2022. Bulldozer : An automatic self-driven large scale digital terrain model extraction method from digital surface model. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*

URL <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-B2-2022-409-2022>

Lebègue, L., Cazala-Hourcade, E., Languille, F., Artigues, S., Melet, O., 2020. Co3d, a worldwide one-meter accuracy dem for 2025. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*

URL <http://dx.doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-B1-2020-299-2020>

Lowe, D., 11 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision* 60, 91–110.

Michel, J., Sarrazin, E., Youssefi, D., Cournet, M., Buffe, F., Delvit, J., Emilien, A., Bosman, J., Melet, O., L'Helguen, C., 2020. A new satellite imagery stereo pipeline designed for scalability, robustness and performance. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences V-2-2020*, 171–178.

Nuth, C., Kääb, A., 2011. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *The Cryosphere* 5.

Rousseeuw, P., Croux, C., 12 1993. Alternatives to median absolute deviation. *Journal of the American Statistical Association* 88, 1273–1283.

Scharstein, D., Szeliski, R., avril 2002. A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms. *International Journal of Computer Vision* 47 (1), 7–42.

URL <https://doi.org/10.1023/A:1014573219977>

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.

Žbontar, J., LeCun, Y., octobre 2015. Stereo Matching by Training a Convolutional Neural Network to Compare Image Patches. *arXiv e-prints*, arXiv :1510.05970.

MODELISATION DE LA BATHYMETRIE PAR PLEIADES NEO EN BAIE DE SAINT-MALO : TRANSFERT RADIATIF ET RESEAUX DE NEURONES

Antoine COLLIN¹, Dorothée JAMES¹, Coralie MONPERT², Sophie LOYER², Pirta PALOLA³, Lisa WEDDING³, Eric FEUNTEUN¹

Centre de GeoEcologie Littorale, Ecole Pratique des Hautes Etudes - PSL
35800 Dinard, France

1: antoine.collin@ephe.psl.eu; dorothee.james@ephe.psl.eu; eric.feunteun@ephe.psl.eu

Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
29200 Brest, France

2 : coralie.monpert@shom.fr; sophie.loyer@shom.fr
Oxford Seascape Ecology Lab, University of Oxford,
Oxford, OX1 3QY, United Kingdom

3: pirta.palola@ouce.ox.ac.uk; lisa.wedding@ouce.ox.ac.uk

Résumé

Malgré l'intérêt croissant pour la cartographie des fonds marins, seul un quart d'entre eux a pu être levé fidèlement à une résolution de l'ordre du km (30 arc-secondes). Ceci s'explique par les lourds coûts engendrés par les campagnes par bateau (sonar) et/ou par avion (lidar). Ainsi, la bathymétrie dérivée de satellite connaît un essor considérable depuis deux décennies. En fer de lance, l'imagerie multispectrale à très haute résolution spatiale de Pléiades Neo dispose de 6 bandes (4 visibles, 1 *red edge*, et 1 infrarouge) pourvues d'une résolution spatiale de 1,2 m, surclassant ainsi l'imagerie multispectrale de Pléiades-1 dotée de 4 bandes (3 visibles et 1 infrarouge) à 2 m. En s'appuyant sur un jeu de données Pléiades Neo 4 acquis au-dessus des eaux modérément turbides de la baie de Saint-Malo, ce travail a permis de quantifier les contributions des bandes *deep blue* et *red edge* à la prédiction de la bathymétrie lidar en regard de la nature de la modélisation, et de l'architecture du réseau neuronal. Premièrement, la modélisation semi-analytique (transfert radiatif) basée sur les transformées de ratio, testées individuellement et linéairement: le remplacement de la bande bleu par la bande *deep blue* a diminué la régression linéaire standard (bleu-vert-rouge-infrarouge, $R^2=0,36$) de 11,1%, mais le remplacement de la bande rouge par *red edge*, a produit le même score. Deuxièmement, la modélisation semi-analytique basée sur la transformée de ratio Pléiades-1 versus la combinaison des 15 transformées Pléiades Neo : augmentations respectives de 52,8% de la régression linéaire ($R^2_{\text{Pléiades-1}}=0,36$, et $R^2_{\text{Pléiades Neo}}=0,55$), et de 36,2% de la régression non-linéaire par réseau de neurones à deux couches cachées à trois neurones ($R^2_{\text{Pléiades-1}}=0,58$, et $R^2_{\text{Pléiades Neo}}=0,79$). Finalement, la modélisation empirique basée sur la bonification spectrale de la simulation de Pléiades-1 par *deep blue* et *red edge* a généré un gain maximal de 6% pour la régression linéaire ($R^2_{\text{Pléiades-1}}=0,50$, et $R^2_{\text{Pléiades Neo}}=0,53$) et de 1,4% pour la régression non-linéaire par réseau de neurones à deux couches cachées à trois neurones ($R^2_{\text{Pléiades-1}}=0,73$, et $R^2_{\text{Pléiades Neo}}=0,74$).

Mots-clés : bathymétrie, transfert radiatif, réseaux de neurones, bleu profond, bord rouge, Saint-Malo

Abstract

Despite the growing interest in mapping the seabed, only a quarter of them has been able to be reliably surveyed at a resolution of the order of one km (30 arc-seconds). This is explained by the heavy costs generated by campaigns by boat (sonar) and/or by plane (lidar). Thus, satellite-derived bathymetry has leveraged considerable growth over the past two decades. As a spearhead, the very high spatial resolution multispectral imagery of Pléiades Neo has 6 bands (4 visible, 1 red edge, 1 infrared) with a spatial resolution of 1,2 m, thus surpassing multispectral imagery of Pléiades-1 provided with 4 bands (3 visible and 1 infrared) at 2 m. Based on a Pléiades Neo 4 dataset acquired above the moderately turbid waters of the Bay of Saint-Malo, this work enabled to quantify the contributions of the deep blue and red edge bands to the prediction of lidar bathymetry with regard to the nature of the modeling, and the architecture of the neural network. First, semi-analytical modeling (radiative transfer) based on ratio transforms, tested individually and linearly: replacing the blue band with the deep blue band decreased the standard linear regression (blue-green-red-infrared, $R^2 = 0,36$) of 11,1%, but replacing the red band with red edge produced the same score. Secondly, semi-analytical modeling based on the Pléiades-1 ratio transform versus the combination of the 15 Pléiades Neo transforms: respective increases of 52.8% in linear regression ($R^2_{\text{Pléiades-1}}=0,36$, and $R^2_{\text{Pléiades Neo}}=0,55$), and 36,2% of the non-linear regression by neural network with two hidden layers provided with three neurons ($R^2_{\text{Pléiades-1}}=0,58$, and $R^2_{\text{Pléiades Neo}}=0,79$). Finally, empirical modeling based on the spectral enhancement of the simulation of Pléiades-1 by deep blue and red edge generated a maximum gain of 6% for linear regression ($R^2_{\text{Pléiades-1}}=0,50$, and $R^2_{\text{Pléiades Neo}}=0,53$) and 1,4% for non-linear regression by neural network with two hidden layers provided with three neurons ($R^2_{\text{Pléiades-1}}=0,73$, and $R^2_{\text{Pléiades Neo}}=0,74$).

Keywords: bathymetry, radiative transfer, neural networks, deep blue, red edge, Saint-Malo

1. Introduction

1.1 Cartographie de la bathymétrie

La connaissance fine de la profondeur et de la nature des fonds des lacs, rivières, fleuves, mers et océans constitue la clé de voûte de la gestion éclairée et proactive des activités humaines sur ces rivages, ainsi que leur protection intrinsèque (Pouteau et al., 2013 ; Collin et al., 2014a).

Toutefois, une étude récente et exhaustive, impliquant l'organisation en charge de la cartographie de la bathymétrie mondiale, GEBCO, et la fondation Nippon (Mayer et Roach, 2021), ont montré que seulement 15% de la bathymétrie mondiale ont pu être levés et contrôlés avec des méthodes scientifiques fiables à une résolution de 30 arc-secondes (c'est-à-dire 926 m à l'équateur). Les auteurs appellent à produire des protocoles communs pour standardiser puis assembler les données régionales existantes, ainsi qu'à développer de nouvelles technologies pour atteindre une cartographie mondiale à l'horizon 2030, à 30 arc-secondes.

Les technologies conventionnelles de levé des fonds marins reposent sur l'emploi du :

- sonar embarqué sur bateau (Le Quilleuc et al., 2023),
- lidar embarqué sur avion (Collin et al., 2023a) ou satellite (Le Quilleuc et al., 2022),
- capteur multispectral embarqué sur satellite (Collin et Planes, 2011), avion (Collin et al., 2023b), ou plus récemment sur drone aérien (Collin et al., 2024, in prep.).

Le coût surfacique du levé bathymétrique (acquisition et traitement) de ces trois catégories est ostensiblement en faveur du satellite, lorsque l'eau n'est pas trop turbide (coefficient d'atténuation diffuse, $K_d < 0.4 \text{ m}^{-1}$) et n'est pas trop profonde ($Z < 30 \text{ m}$).

1.2 Bathymétrie par satellite

Deux méthodes d'extraction de la bathymétrie par satellite peuvent être distinguées :

- semi-analytique via un modèle de transfert radiatif (Stumpf et al., 2003),
- empirique via un modèle d'apprentissage automatique (Collin et Hench, 2015).

1.2.1. Méthode semi-analytique

Cette méthode repose sur la modélisation de la propagation de la lumière dans l'eau sachant que l'eau absorbe différenciellement les longueurs des ondes électromagnétiques optiques. Le modèle de transformée de ratio (Stumpf et al., 2003) permet d'en déduire la hauteur de la colonne d'eau, c'est-à-dire, la profondeur :

$$Z = m_1 \frac{\ln(nVG_i)}{\ln(nVG_j)} - m_0 \quad (1)$$

où VG_i = valeurs de gris de la bande spectrale i ; VG_j = valeurs de gris de la bande spectrale j ; m_1 = coefficient directeur de la régression linéaire; m_0 = ordonnée à l'origine de la régression linéaire; n = une constante garantissant la positivité du logarithme naturel.

Cette méthode a été appliquée dans les eaux claires du lagon de Moorea avec le satellite WorldView-2 (Collin et Hench, 2012), d'Ishigaki via le satellite QuickBird-2 modifié par Google Earth (Collin et al., 2014b), de Fatu Huku via le satellite Sentinel-2 (Collin et al., 2016), ou de Takapoto via le satellite Pléiades-1 (Collin et al., 2018). En général, ces diverses études montraient une fiabilité satisfaisante (coefficient de détermination, $R^2 > 0,7$) entre les valeurs prédites et les valeurs observées d'un jeu de données de validation.

1.2.2. Méthode empirique

L'avènement de l'apprentissage automatique a permis d'améliorer significativement la fiabilité des modèles d'extraction en utilisant les bandes spectrales en tant que prédicteurs et des vérités-terrains acoustiques (sonar) ou optiques (lidar).

Ainsi, un modèle basé sur un réseau de neurones a permis de prédire la bathymétrie à Moorea à partir de la combinaison de réflectance bleu-vert-rouge issue de Pléiades-1 avec un R^2 à 0,8 (Collin et Hench, 2015). En bénéficiant de plusieurs bandes spectrales, la bathymétrie en eau plus turbide a pu être prédite en baie de Saint-Malo à partir des valeurs de réflectance violet-bleu-vert-jaune-rouge dérivées de WorldView-3 avec un R^2 de 0,9 (Collin et al., 2017). Cette approche a aussi été testée avec la constellation de nano-satellites Planetscope SuperDove, dotée d'une très haute résolution temporelle (quotidienne) : la prédiction de la bathymétrie sur les îles de Bréhat et Saint-Barthélémy ont atteint, respectivement 10 m et 25 m de profondeur, avec des R^2 de 0,76 et 0,94 (Collin et al., 2023c).

1.2.3. Problématique

En tant que fleuron national, l'imagerie multispectrale Pléiades Neo dispose de six bandes (quatre visibles, une « bord rouge », une infrarouge) pourvues d'une résolution spatiale de 1,2 m, surclassant ainsi l'imagerie multispectrale de Pléiades-1 dotée de quatre bandes : trois visibles et une infrarouge, à 2 m.

Se pose ainsi cette problématique : quelle est la contribution de la bande *deep blue* et de la bande *red edge* à la prédiction de la bathymétrie en fonction :

- de la nature de la modélisation (semi-analytique individuelle ou combinée ; empirique) ?
- de l'architecture du réseau neuronal ?

Une imagerie Pléiades Neo 4 et un nuage de points lidar, acquis au-dessus de la baie de Saint-Malo permettront d'y répondre.

2. Méthodologie

2.1 Site d'étude

La baie de Saint-Malo (48°40'N, 2°4'10''O; Bretagne, France) se situe le long de la façade sud de la Manche. Elle se caractérise par une grande diversité de profondeurs : du zéro topographique (IGN69, dont la côte verticale se trouve à un peu moins de 7 m du trait de côte) à - 25 m localisé dans le chenal naturel du fleuve (ria) de la Rance (Figure 1).

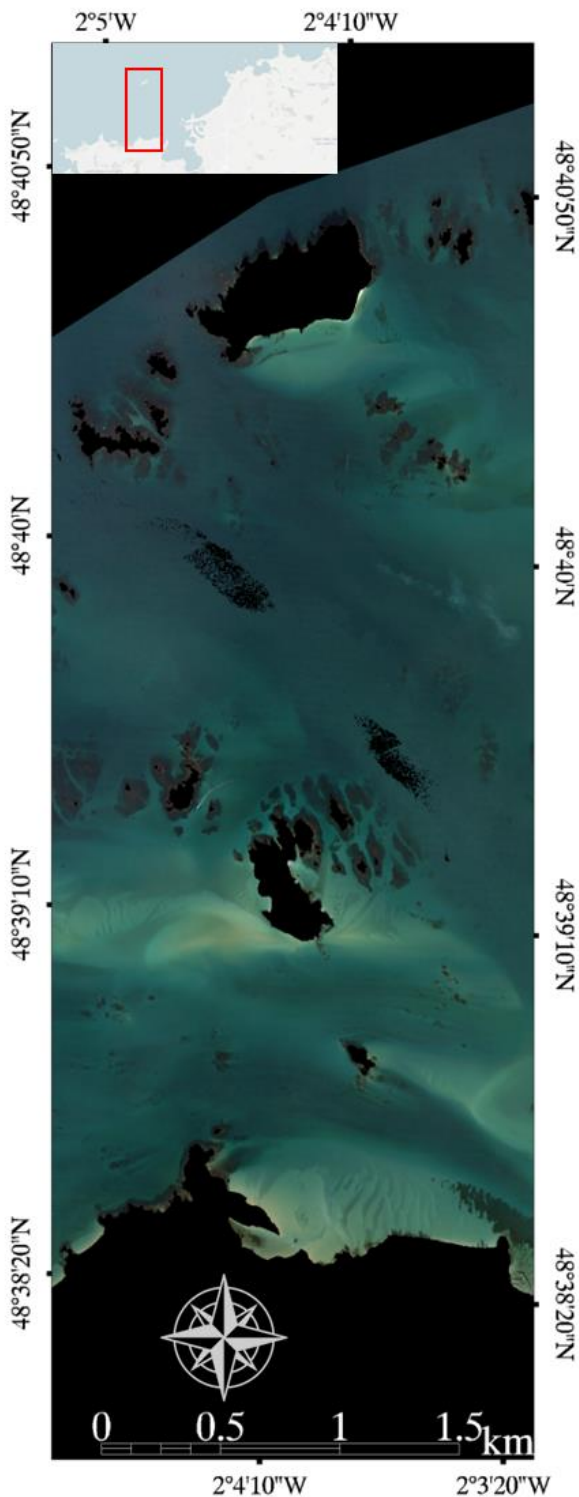


Figure 1: Carte en couleur naturelle issue de l'imagerie Pléiades Neo montrant la localisation d'une partie de la baie de Saint-Malo (48°40'N, 2°4'10''O)

Soumise à un régime macrotidal (voire mégatidal : 13-14 m d'amplitude en marées d'équinoxe), la baie présente

une grande variété de substrats benthiques, et donc de leurs albédos respectifs, qui fluctuent au gré des courants de marée et des vagues (houle et mer de vent) de secteur dominant Nord-Ouest – Ouest. Les substrats peuvent être :

- abiotiques (vase, sable, gravier, cailloutis, galet, roche) ou,
- biotiques (forêts d'algues rouges, brunes et vertes, prairie d'herbiers marins de zostères).

2.2 Imagerie Pléiades Neo

2.2.1. Source de l'imagerie

Provenant du capteur Pléiades Neo 4, l'imagerie a été acquise le 7 décembre 2022 (11h42min48sec, UTC) au-dessus du Pays de Saint-Malo.

Les capteurs Pléiades Neo surpassent ceux de Pléiades-1 en termes de résolution spatiale (passant de 2 à 1,2 m en multispectral, et de 0,5 à 0,3 en panchromatique), et de résolution spectrale (ajoutant une bande *deep blue* et une bande *red edge* à la gamme standard bleu-vert-rouge-infrarouge, Tableau 1).

Noms de bandes	Plus basse longueur d'onde (nm)	Plus haute longueur d'onde (nm)
<i>Deep blue</i>	400	450
Bleu	450	520
Vert	530	590
Rouge	620	690
<i>Red edge</i>	700	750
Infrarouge	770	880

Tableau 1: Spécificités techniques de Pléiades Neo

2.2.2. Traitement de l'imagerie

Les données multispectrales ont, par la suite, été corrigées géométriquement et radiométriquement.

L'orthorectification s'est appuyée sur l'enregistrement de la trigonométrie soleil-satellite-scène au sein des *rational polynomial coefficients*, engendrant une imagerie dans le datum national RGF 93, projeté en Lambert 93, ainsi qu'au sein du repère vertical IGN 69 (correspondant au zéro topographique). La calibration radiométrique a permis de convertir les valeurs de gris (12 bits) en valeur de radiance ($W.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$) au-dessus de l'atmosphère. Puis ces dernières valeurs physiques ont été transformées en radiance sous l'atmosphère, en paramétrant le module de correction atmosphérique FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*), basé sur MODTRAN (*MODerate resolution atmospheric TRANsmission*). Enfin, en prenant en compte l'irradiance du soleil ($W.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$) sous l'atmosphère lors de l'acquisition, le ratio de réflectance sous l'atmosphère, donc à la surface de la terre / de l'eau (sans unité) a pu être calculé.

Le masquage de la terre a pu être réalisé en se conformant à la hauteur d'eau mesurée au marégraphe de Saint-Malo au moment de l'acquisition de l'imagerie : -3,5 m. Cette hauteur d'eau a aussi pu être corroborée par les faibles valeurs de réflectance au sein de la bande infrarouge.

2.3 Lidar topobathymétrique

Un levé topobathymétrique par lidar aérien a été réalisé en mai et juin 2018 par le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) dans le cadre du Plan d'Action pour la Prévention des Inondations (PAPI) de Saint-Malo. Le lidar utilisé était le Leica HawkEye 3 collectant au moins quatre mesures.m⁻², jusqu'à -23,5 m.

Le nuage de point, nettoyé par le SHOM, fut rasterisé à 1,2 m de résolution spatiale dans le datum horizontal RGF 93 / Lambert 93, et vertical IGN 69 (Figure 2).

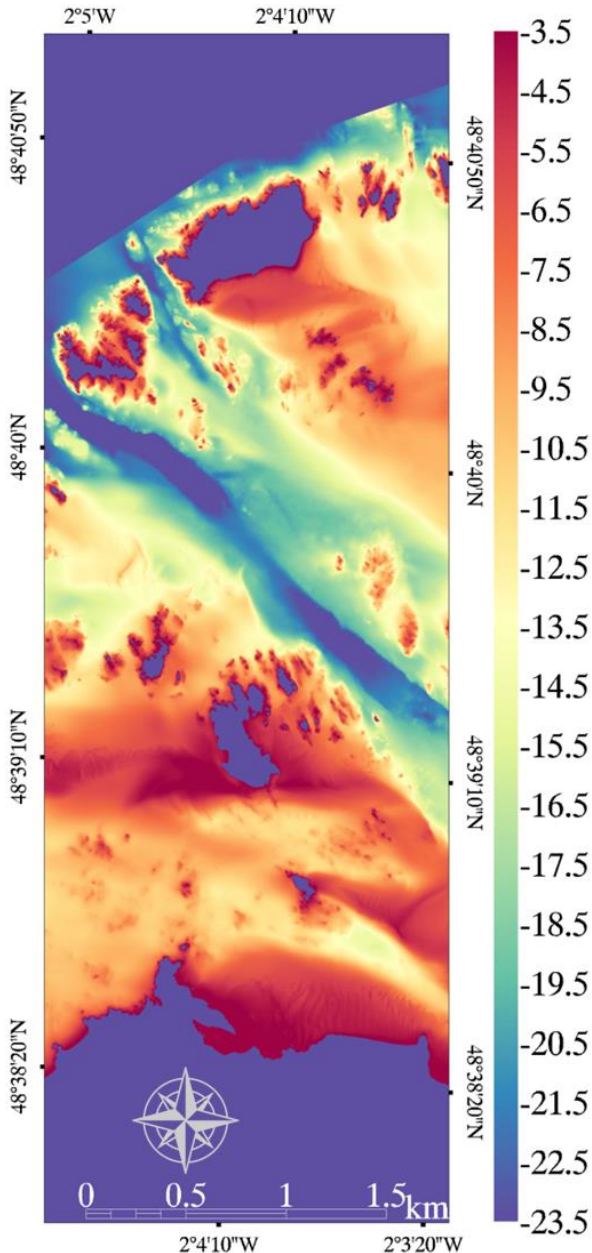


Figure 2: Carte du lidar topobathymétrique (IGN 69) montrant la localisation d'une partie de la baie de Saint-Malo (48°40'N, 2°4'10''O)

2.4 Modélisation de la bathymétrie

2.4.1. Echantillonnage

La couche lidar a, premièrement, été segmentée au pas de 1 m, entre -3,5 et -23,5 m, afin d'obtenir une distribution homogène des classes de profondeurs à prédire. Deuxièmement, chacun des 20 jeux de données résultants a fait l'objet d'un échantillonnage aléatoire de 3000 pixels, répartis uniformément en 3 sous-jeux de données :

- 1000 points de calibration,
- 1000 points de validation,
- 1000 points de test.

Seul ce dernier sous-jeu de données, combinant les 20 classes, servira à la quantification de la précision des modélisations.

2.4.2. Modèle semi-analytique

L'approche semi-analytique d'extraction de la bathymétrie repose sur l'équation 1 dont l'application nécessite l'entrée de quatre bandes multispectrales.

Ainsi, l'évaluation des contributions des nouvelles bandes *deep blue* et *red edge* comparera les prédictions issues :

- de la transformée de ratio bleu-vert-rouge-infrarouge (simulation de Pléiades-1), versus,
- des 15 transformées de ratio:
 - *deep blue*-bleu-vert-rouge,
 - *deep blue*-bleu-vert-*red edge*,
 - *deep blue*-bleu-vert-infrarouge,
 - *deep blue*-bleu-rouge-*red edge*,
 - *deep blue*-bleu-rouge-infrarouge,
 - *deep blue*-bleu-*red edge*-infrarouge,
 - *deep blue*-vert-rouge-*red edge*,
 - *deep blue*-vert-rouge-infrarouge,
 - *deep blue*-vert-*red edge*-infrarouge,
 - *deep blue*-rouge-*red edge*-infrarouge,
 - bleu-vert-rouge-*red edge*,
 - bleu-vert-*red edge*-infrarouge,
 - bleu-rouge-*red edge*-infrarouge, et
 - vert-rouge-*red edge*-infrarouge.

En premier temps, les 15 transformées seront testées à l'aide de régressions linéaires univariées, donc de manière individuelle.

En second temps, la transformée issue de la simulation de Pléiades-1, d'une part, et la combinaison des 15 transformées dérivées de Pléiades Neo, d'autre part, serviront de prédicteurs à la réponse lidar en construisant cinq types de régressions (ex. : Figure 3):

- une linéaire (moindres carrés),
- quatre non-linéaires basés sur les réseaux de neurones (une couche cachée à un neurone, une couche cachée à trois neurones, deux couches cachées à un neurone, deux couches cachées à trois neurones).

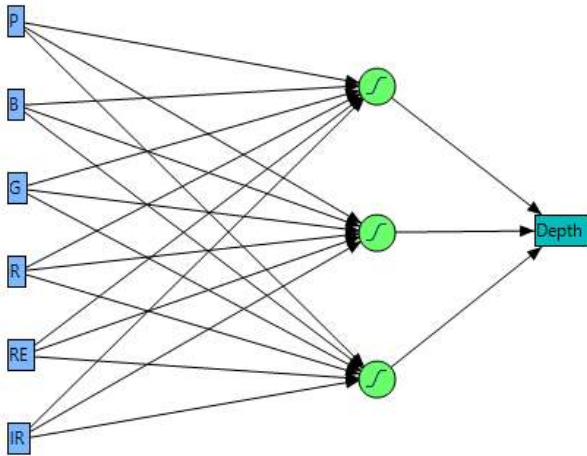


Figure 3 : Réseau de neurones basé sur les six bandes spectrales de Pléiades Neo, comme prédicteurs de la réponse lidar, caractérisé par une architecture d'une couche cachée à trois neurones

2.4.3. Modèle empirique

L'approche empirique s'attèlera à quantifier la contribution des bandes *deep blue* et *red edge* en mettant en regard les résultats de classification dérivés de trois jeux de données constitués de bandes de réflectance :

- bleu-vert-rouge-infrarouge,
- *deep blue*-bleu-vert-rouge-infrarouge,
- *deep blue*-bleu-vert-rouge-*red edge*-infrarouge.

De la même façon que précédemment, ces jeux de données serviront de prédicteurs à la réponse lidar en construisant cinq types de régressions :

- une linéaire (moindres carrés),
- quatre non-linéaires basés sur les réseaux de neurones (une couche cachée à un neurone, une couche cachée à trois neurones, deux couches cachées à un neurone, deux couches cachées à trois neurones).

2.4.4. Indicateurs de prédiction

La fiabilité des modèles a été quantifiée en se basant sur le coefficient de détermination R^2_{test} .

3. Résultats et Discussion

3.1 Modélisation semi-analytique de la bathymétrie

3.1.1. Transformées individuelles en régression linéaire

La transformée de ratio, intégrant les bandes bleu-vert-rouge-infrarouge, a prédit le sous-jeu de données test du lidar bathymétrique avec un coefficient de détermination (régression linéaire) de 0,36.

D'une part, le remplacement de la bande bleue par la bande *deep blue* (transformée *deep blue*-vert-rouge-infrarouge) a entraîné une diminution de la régression linéaire à 0,32. D'autre part, le remplacement de la bande rouge par la bande *red edge* (transformée bleu-vert-*red edge*-infrarouge) a produit un score de 0,36, identique à celui émanant de Pléiades-1 (Figure 4).

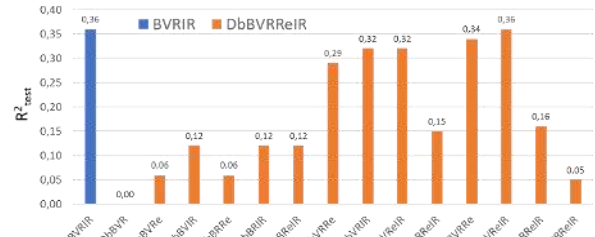


Figure 4 : Scores de prédiction de la modélisation semi-analytique (transformée de ratio) comparant, individuellement, l'unique ratio Pléiades-1 avec les 15 ratios Pléiades Neo, en régression linéaire

L'ajout des bandes *deep blue* et *red edge* dans le lot des bandes disponibles pour établir des transformées individuelles a donc un effet mitigé en régression linéaire:

- diminution de la performance lorsque la bande bleu est remplacée par la bande *deep blue* (-11,1%),
- stabilité de la performance lorsque la bande rouge est remplacée par la bande *red edge* (0,0%).

3.1.2. Transformées combinées

L'ajout des bandes *deep blue* et *red edge*, faisant passer de la transformée de ratio, simulant Pléiades-1, à la combinaison des 15 transformées de ratio, émanant de Pléiades Neo, a permis d'améliorer considérablement les scores de prédictions de la bathymétrie, et ce, pour tous les modèles, quel que soit leur nature ou leur complexité (Figure 5).

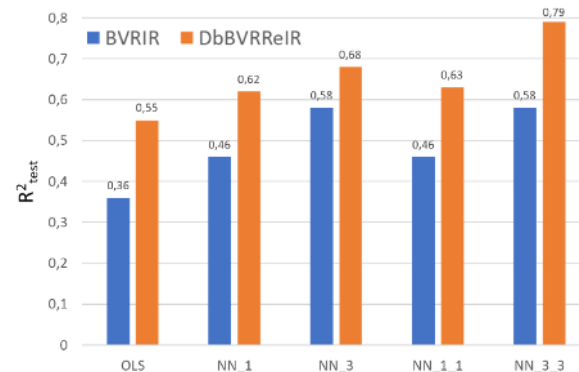


Figure 5 : Scores de prédiction de la modélisation semi-analytique (transformée de ratio) comparant l'unique ratio Pléiades-1 avec les 15 ratios Pléiades Neo, en fonction de divers types de régression (OLS : linéaire, NN : réseau de neurones non linéaire)

L'approche semi-analytique basée sur Pléiades Neo versus Pléiades-1 a permis une augmentation de 52,7% de la régression linéaire, 34,8%, 17,2%, 36,9% et 36,2% des régressions non-linéaires par réseau de neurones à une couche cachée pourvue d'un neurone, une couche cachée pourvue de trois neurones, deux couches cachées pourvues d'un neurone, deux couches cachées pourvues de trois neurones, respectivement.

Alors que le meilleur modèle dérivé du ratio de Pléiades-1 a atteint un R^2 de 0,58 avec chacun des deux réseaux de neurones à trois neurones (une couche cachée et deux

couches cachées), le meilleur modèle découlant des ratios de Pléiades Neo est parvenu à un R^2 de 0,79 avec un réseau de neurones, basé sur deux couches cachées avec trois neurones.

Ce dernier score est inférieur à celui produit avec Pléiades-1 pour la modélisation semi-analytique de la bathymétrie du lagon de Takapoto ($R^2=0,93$, Collin et al., 2018). Ceci peut logiquement s'expliquer par le fait que ce lagon présente des eaux cristallines ($K_d < 0.05 \text{ m}^{-1}$), parmi les plus claires au Monde (Collin et al., 2021), contrairement à celles de Saint-Malo.

Bien que la non-linéarité des modèles ait logiquement produit de meilleurs résultats, il est important de souligner que la performance des réseaux de neurones croît avec la complexité de leur architecture. Si les jeux de données de calibration/validation/test sont trop épars, il y a un risque de sur-ajustement (Lumban-Gaol et al., 2021). Toutefois, cet écueil est peu probable pour notre étude impliquant 180000 points en jeu.

3.2 Modélisation empirique de la bathymétrie

L'ajout successif des bandes *deep blue* et *red edge*, faisant passer de la combinaison de prédicteurs, simulant Pléiades-1 (bleu-vert-rouge-infrarouge), à la combinaison Pléiades-1 + *deep blue*, puis celle de Pléiades Neo, a entraîné de légers accroissements des scores de prédictions de la bathymétrie, de manière générale. Seul le réseau de neurones à deux couches cachées munis de trois neurones, lors de l'ajout de la bande *deep blue*, a subi une légère diminution de la performance de prédiction (Figure 6).

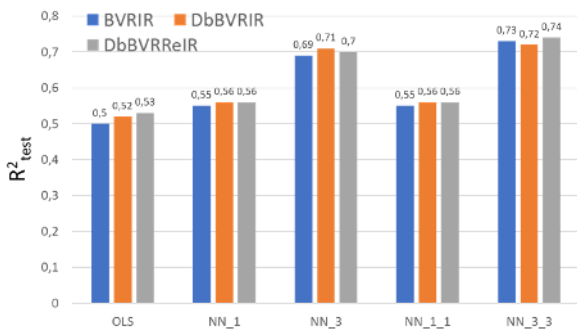


Figure 6: Scores de prédiction de la modélisation empirique comparant la combinaison de bandes bleu-vert-rouge-infrarouge (BVRIR, Pléiades-1), BVRIR + *deep blue*, BVRIR+*deep blue*+*red edge* (Pléiades Neo), en fonction de divers types de régression (OLS : linéaire, NN : réseau de neurones non linéaire)

L'approche empirique basée sur la bonification de la simulation de Pléiades-1 par *deep blue* a produit un gain de 4% pour la régression linéaire, 1,8%, 2,9%, 1,8% et -1,4% pour les régressions non-linéaires par réseau de neurones à une couche cachée pourvue d'un neurone, une couche cachée pourvue de trois neurones, deux couches cachées pourvues d'un neurone, deux couches cachées pourvues de trois neurones, respectivement.

L'approche empirique basée sur Pléiades Neo (suite à l'ajout final du *red edge* à la précédente combinaison de bandes spectrales) a généré un gain (par rapport à la simulation de Pléiades-1) de 6% pour la régression

linéaire, 1,8%, 1,4%, 1,8% et 1,4% pour les régressions non-linéaires par réseau de neurones à une couche cachée pourvue d'un neurone, une couche cachée pourvue de trois neurones, deux couches cachées pourvues d'un neurone, deux couches cachées pourvues de trois neurones, respectivement. En résumé, l'ajout du *deep blue* et du *red edge* a accru :

- la régression linéaire simple de 6%,
- les deux réseaux de neurones à un neurone de 1,8% ;
- les deux réseaux de neurones à trois neurones de 1,4%.

Le meilleur modèle dérivé de la combinaison standard (Pléiades-1, bleu-vert-rouge-infrarouge) a atteint un R^2 de 0,73 avec le réseau de neurones le plus complexe (deux couches cachées à trois neurones). Le modèle le plus performant de la combinaison de bandes Pléiades-1 + *deep blue* a été construit avec ce même réseau ($R^2=0,72$). La meilleure prédiction de la combinaison Pléiades Neo a aussi été façonnée avec ce modèle ($R^2=0,74$).

La fiabilité de cette modélisation empirique de la bathymétrie corrobore les récents résultats obtenus avec les quatre bandes (bleu-vert-rouge-infrarouge) de PlanetScope Dove ($R^2=0,76$), et les huit bandes (*deep blue*-bleu-vert1-vert2-jaune-rouge-*red edge*-infrarouge) de PlanetScope SuperDove ($R^2=0,77$) autour de l'île de Bréhat (Collin et al., 2023c), dont la turbidité est très proche de celle de la baie de Saint-Malo. Dans cette dernière étude, les nouvelles bandes vert1 et jaune apportaient un meilleur gain que les bandes *deep blue* et *red edge* dans cette gamme de turbidité. Toutefois, pour des eaux plus claires (île de Saint-Barthélémy), les bandes *deep blue* et vert1 étaient les plus contributives à l'amélioration de l'extraction de la bathymétrie.

3.3 Modélisation spatiale

La formule de la meilleure modélisation (15 transformées de ratio Pléiades Neo avec un réseau de neurones à trois couches cachées à trois neurones) a été appliquée à l'ensemble des pixels (Figure 7 et Figure 8).

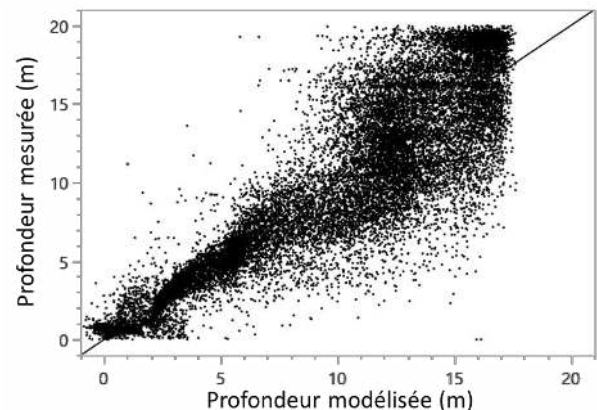


Figure 7: Nuage de points de test (N=60000) des profondeurs mesurées et modélisées (15 transformées de ratio de Pléiades Neo, comme prédicteurs de la réponse lidar, dans une architecture de deux couches cachées à trois neurones)

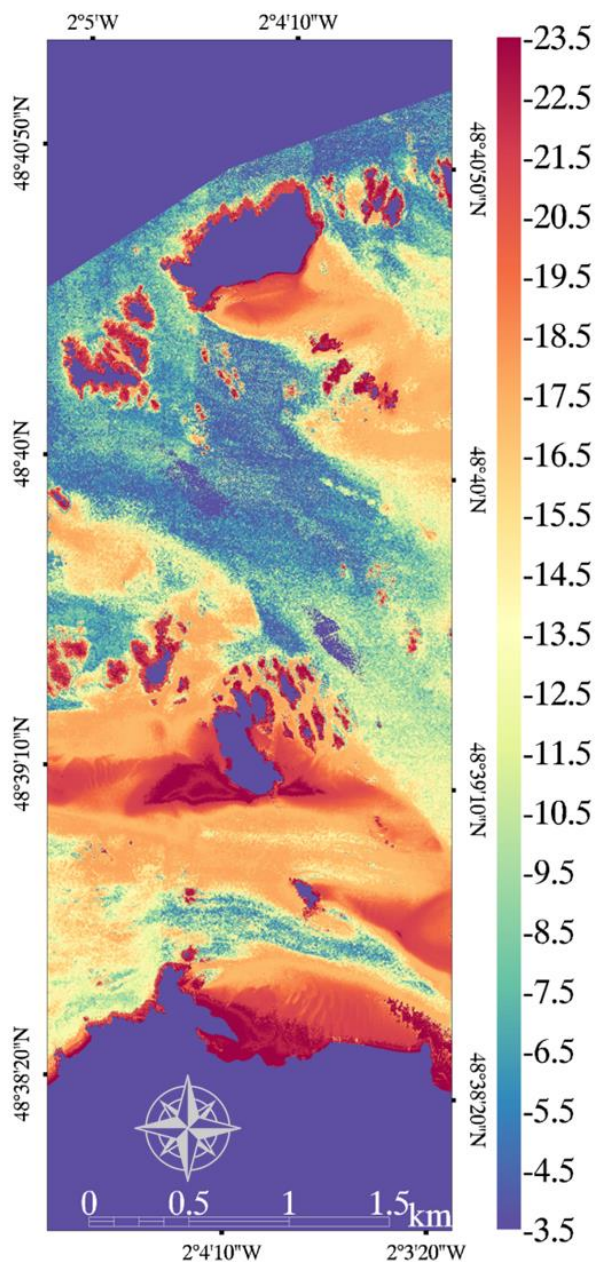


Figure 8: Modélisation de la bathymétrie (IGN 69) issue du réseau de neurones basé sur les 15 transformées de ratio de Pléiades Neo, comme prédicteurs de la réponse lidar, basée sur une architecture de deux couches cachées à trois neurones

L'analyse de la dispersion du nuage de points (Figure 7) révèle une prédiction très satisfaisante de 1 à 9 m de profondeur, puis une sous-estimation au-delà. Ce résultat, visible sur la carte modélisée (Figure 8) corrobore les résultats empiriques effectués en baie de Saint-Malo avec le satellite WorldView-3, où une profondeur maximale de 9 m avait été estimée (Collin et al., 2017). Les scores très élevés de cette dernière étude (de 0,69 à 0,94) sont à relativiser du fait du faible nombre de points d'échantillonnage (108 de calibration et 54 de validation,

sans points de test) acoustiques (le jeu de données lidar n'existait pas), qui étaient, alors, très vulnérables au sur-ajustement des réseaux de neurones. Il serait très pertinent de comparer les résultats de WorldView-3 et de Pléiades Neo en utilisant les mêmes jeux de données lidar dans une future recherche.

En effectuant la différence des modèles numériques bathymétriques prédits et observés, des zones de sous-estimation et sur-estimation tendent, respectivement, vers le bleu et le rouge (Figure 9).

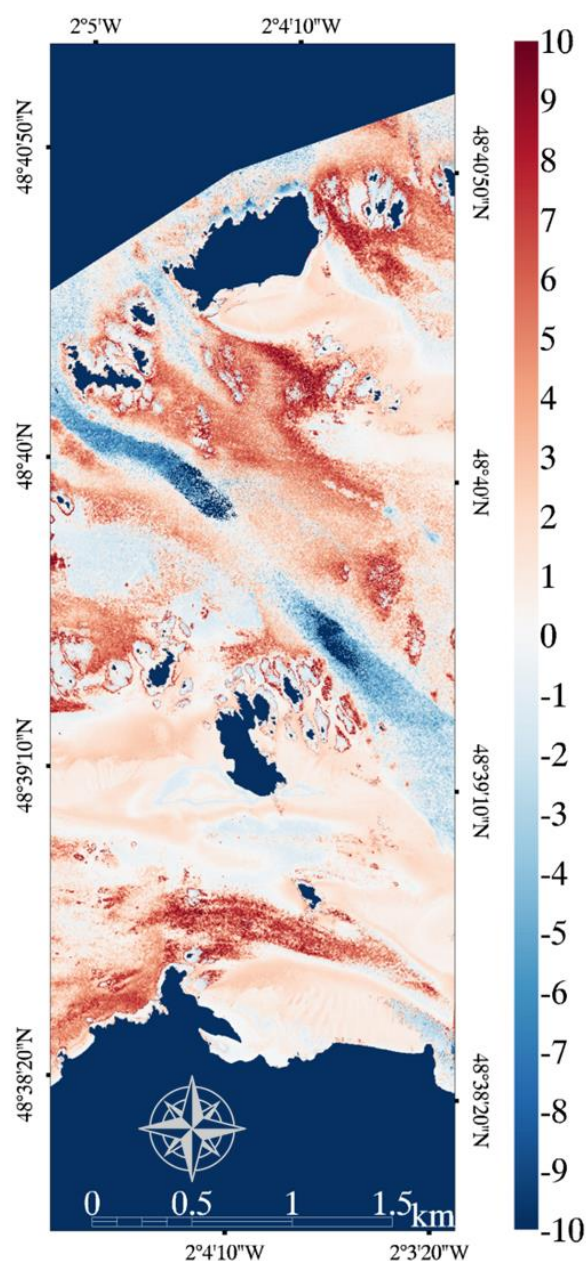


Figure 9: Carte de différence de la bathymétrie modélisée (réseau de neurones basé sur les 15 transformées de ratio de Pléiades Neo) et mesurée (lidar)

Ainsi, les secteurs les plus profonds, caractérisés par le paléo-chenal de la Rance, présentent la plus grande sous-estimation du modèle. Ce constat est à mettre en relation avec le fort hydrodynamisme de cet « entonnoir » estuarien véhiculant une plus grosse charge sédimentaire, traduite par une turbidité plus importante. A contrario, les zones les plus sur-estimées ne correspondent pas aux secteurs les plus superficiels, mais plutôt aux fonds les moins réfléchissants, comme les graviers et cailloux (Collin et al., 2023b).

4. Conclusions

L'imagerie Pléiades Neo 4 a été étudiée pour son potentiel d'extraction de la bathymétrie en baie de Saint-Malo, c'est-à-dire dans un milieu où les eaux sont moyennement turbides ($0,2 \text{ m}^{-1}$ de coefficient d'atténuation diffuse). Cette étude s'est attelée à comparer les résultats de modélisation issus d'un jeu de données simulé de Pléiades-1 (bleu-vert-rouge-infrarouge) versus le jeu de données de Pléiades Neo (*deep blue*-bleu-vert-rouge-*red edge*-infrarouge) à l'aide d'un jeu de données lidar stratifié de 0 à 20 m muni de 180000 points.

Deux principales méthodes de modélisation ont été testées : l'approche semi-analytique (transformée de ratio) et l'approche empirique.

Pour la première, qui s'appuie sur le transfert radiatif, deux séries de régressions ont été produites :

- une série de régressions individuelles linéaires : le remplacement du bleu par le *deep blue* a diminué le score de -11,1% ($R^2=0,32$), tandis que le remplacement du rouge par le *red edge* a produit une prédiction similaire de 0,0% ($R^2=0,36$).
- une série de régressions combinées : la combinaison des 15 transformées de Pléiades Neo versus la transformée de Pléiades-1 a accru de 52,7% la régression linéaire ($R^2=0,55$), et de 36,2% la régression non-linéaire par réseau de neurones à deux couches cachées à trois neurones ($R^2=0,79$).

Concernant la modélisation empirique, l'ajout des bandes *deep blue* et *red edge* aux quatre bandes bleu-vert-rouge-infrarouge a accru de 6% la régression linéaire ($R^2=0,53$) et de 1,4% la régression non-linéaire par réseau de neurones à deux couches cachées à trois neurones ($R^2=0,74$).

Ces résultats, statistiquement robustes, serviront de socle à des études ultérieures s'intéressant à l'évolution de la précision bathymétrique en regard de la turbidité, à l'imagerie « pansharpenée » à 0,3 m, et à la topobathymétrie dérivée de Pléiades Neo.

Références

- Collin A., Bulot A., Pastol Y., LeGoff L., Feunteun E., 2023b. *Classification des habitats benthiques par segmentation sémantique d'imagerie optique et LiDAR ouverte : Ortho-Littorale et Litto3D en baie de Saint-Malo*. 4th merlGéo, Le Havre, pp. 44-47.
- Collin A., Chancerelle Y., Pouteau, R., 2014a. *Reefscape Ecology Within the South Pacific: Confluence of the Polynesia Mana Network and Very High Resolution Satellite Remote Sensing*. Underwater Seascapes: from geographical to ecological perspectives, pp. 245-262.
- Collin A., Duvat V., Pillet V., Salvat B., James, D., 2018. *Understanding interactions between shoreline changes and reef outer slope morphometry on Takapoto Atoll (French Polynesia)*. Journal of Coastal Research n°85, pp. 496-500.
- Collin A., Etienne S., Feunteun E., 2017. *VHR coastal bathymetry using WorldView-3: colour versus learner*. Remote Sensing Letters N°8(11), pp. 1072-1081.
- Collin A., Hench, J.L., 2012. *Towards deeper measurements of tropical reefscape structure using the WorldView-2 spaceborne sensor*. Remote Sensing n° 4(5), pp. 1425-1447.
- Collin A., Hench, J.L., 2015. *Extracting shallow bathymetry from very high resolution satellite spectral bands and a machine learning algorithm*. International Council of the Exploration of the Sea (ICES) CM, 24.
- Collin A., James D., Lamontagne N., Hardy R., Monpert C., Feunteun E., 2024. *Ultra-high-resolution bathymetry estimation using a visible airborne drone, photogrammetry and neural network*. Paralia n°18, pp. 477-484.
- Collin A., Laporte J., Koetz B., Martin-Lauszer F.R., Desnos Y.L., 2016. *Mapping bathymetry, habitat and potential bleaching using Sentinel-2*. In: 13th International Coral Reef Symposium n°51 Remote sensing of coral reefs: transitioning from developmental to operational, pp. 416-430.
- Collin A., Nadaoka K., Nakamura T., 2014b. *Mapping VHR Water Depth, Seabed and Land Cover Using Google Earth Data*. ISPRS International Journal of Geo-Information n°3(4), pp. 1157-1179.
- Collin A., Palola P., James D., Pastol Y., Monpert C., Loyer S., ..., Wedding L., 2023c. *Superdove-Modelled Bathymetry Using Neural Networks Along a Turbidity Gradient: Breat, Saint-Barthelemy and Tetiaroa Islands*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences n° 48, pp. 1351-1356.
- Collin A., Pastol Y., Letard M., Le Goff L., Guillaudeau J., James D., Feunteun, E., 2023a. *Increasing the Nature-Based Coastal Protection Using Bathymetric Lidar, Terrain Classification, Network Modelling: Reefs of Saint-Malo's Lagoon?*. In: Niculescu, S. (eds) European Spatial Data for Coastal and Marine Remote Sensing. Springer, Cham., pp. 235-241.
- Collin A., Planes, S., 2011. *What is the value added of 4 bands within the submetric remote sensing of tropical coastscape? Quickbird-2 vs WorldView-2*. In: 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, pp. 2165-2168.
- Collin A., Prot P., Bouazzaoui H., Bnikkou S., 2021. *Spatiotemporal Patterns Of the Sea Surface Temperature Using Statistical Anomaly Detection Across the 18-Year-Old Global Scale*. In: IEEE OCEANS, San Diego – Porto, pp. 1-7.
- Le Quilleuc A., Collin A., Jasinski M.F., Devillers R., 2022. *Very High-Resolution Satellite-Derived Bathymetry and*

- Habitat Mapping Using Pleiades-1 and ICESat-2*. Remote Sensing n°14(1), p. 133.
- LeQuilleuc A., Husset M.-C., Collin A., Feunteun E., 2023. *Cartographie prédictive d'un coquillage invasif via l'apprentissage automatique des données acoustiques multi-fréquentielles et vérités-terrain : Crepidula fornicata en Baie du Mont-Saint-Michel*. 4th merlGéo, Le Havre, pp. 165-167.
- Lumban-Gaol Y.A., Otori K.A., Peters, R.Y., 2021. *Satellite-derived bathymetry using convolutional neural networks and multispectral Sentinel-2 images*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences n°43, pp. 201-207.
- Mayer L., Roach J.A., 2021. *The quest to completely map the world's oceans in support of understanding marine biodiversity and the regulatory barriers we have created*. Marine Biodiversity of Areas beyond National Jurisdiction, pp. 149-166.
- Poteau R., Collin A., Archambault P., Stoll B., 2013. *Modeling reef health from upstream socio-ecological components using GIS and RS*. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Melbourne, pp. 306-309.
- Stumpf R.P., Holderied K., Sinclair, M., 2003. *Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types*. Limnology and Oceanography n°48, pp. 547–556.

Apport des données Pléiades Neo pour la détection des dommages au bâti :

Comparaison avec des données Pléiades-HR sur le séisme au Maroc de septembre 2023

Mathilde Mauger-Vauglin¹, Stéphanie Battiston¹, Mathias Studer¹, Emilie Bronner²

1 : ICube-SERTIT, Illkirch, France ; maugervauglin@unistra.fr ; s.battiston@unistra.fr ; mathias.studer@unistra.fr

2 : CNES, Toulouse, France ; emilie.bronner@cnes.fr

Résumé

Cette étude approfondie de l'utilisation des données satellitaires Pléiades Neo dans la détection des dommages aux bâtiments, comparée aux données Pléiades-HR, s'est concentrée sur l'évaluation des performances de ces deux capteurs suite au séisme au Maroc en septembre 2023. Les résultats indiquent de manière concluante que la résolution spatiale supérieure des images Pléiades Neo améliore significativement l'interprétation du paysage et la détection des dommages dans les zones bâties. En particulier, ce gain en résolution a permis d'identifier 74% de bâtiments endommagés supplémentaires à Marrakech et de rectifier 24% et 11% de la classification des dommages, respectivement dans les secteurs de Marrakech et d'Imidal. L'étude souligne également la capacité de Pléiades Neo à détecter des détails du paysage urbain, comme les créneaux des remparts de la ville, offrant ainsi la possibilité de repérer des dommages sur d'autres objets ou infrastructures de taille équivalente, une capacité qui n'est pas aussi prononcée avec Pléiades-HR. Les résultats illustrent et confirment les avantages substantiels des données Pléiades Neo pour l'évaluation post-catastrophe, avec une précision accrue dans la détection et la caractérisation des dommages au bâti. L'importance de l'angle d'acquisition des images, mais également la complémentarité de Pléiades Neo par rapport à Pléiades-HR dans le contexte de la cartographie d'urgence, ont également été évoquées. Cette étude atteste des avantages des images Pléiades Neo par rapport à Pléiades-HR dans la gestion des dégâts au bâti suite à des événements catastrophiques.

Mots-Clés : Pléiades Neo, Pléiades-HR, Évaluation des dégâts, Cartographie de crise, Séisme, Maroc

Abstract

This in-depth study of the use of Pleiades Neo satellite data in detecting damage to buildings, compared to Pleiades-HR data, focused on evaluating the performance of these two sensors following the September 2023 earthquake in Morocco. The results conclusively indicate that the higher spatial resolution of Pleiades Neo images significantly enhances landscape interpretation and damage detection in built areas. Specifically, this resolution gain led to the identification of an additional 74% damaged buildings in Marrakech to rectify 24% and 11% of the damage classification in the Marrakech and Imidal sectors, respectively. The study also highlights Pleiades Neo's capability to detect urban landscape details, such as crenels of ramparts, providing the potential to identify damages on other objects or structures of equivalent size; a capacity not as pronounced with Pleiades-HR. The results illustrate and confirm the substantial advantages of Pleiades Neo data for post-catastrophe assessment, with improved precision in damage detection and characterization. The significance of acquisition angle in imaging and the complementarity of Pleiades Neo with respect to Pleiades-HR in the context of emergency mapping were also emphasized. This study attests to the benefits of Pleiades Neo images over Pleiades-HR in managing building damage following catastrophic events.

Keywords: Pleiades Neo, Pleiades-HR, Damage assessment, Crisis Mapping, Earthquake, Morocco

1. Contexte de l'étude

1.1 Cadre de l'analyse

La constellation Pléiades-HR a démontré à maintes reprises ses capacités et son utilité en contexte de crise pour la détection des dommages suite à la survenance d'un événement catastrophique (Huber *et al.*, 2013; Maxant *et al.*, 2013; Yésou, Chastanet, *et al.*, 2015; Yésou, Escudier, *et al.*, 2015). Elle compte aujourd'hui parmi les satellites les plus sollicités par les dispositifs de cartographie d'urgence mondiaux (Charte Internationale Espace et Catastrophes Majeures, Copernicus Emergency Management Service). La nouvelle constellation Pléiades Neo, aux performances encore supérieures à celles de Pléiades-HR en termes de

résolutions spatiale (30cm) et spectrale (6 bandes), a certainement un rôle à jouer dans le domaine de la gestion des risques et des crises, en optimisant les capacités offertes par le spatial (ESA, 2022).

Le CNES a ainsi sollicité le SERTIT pour étudier l'apport des données Pléiades Neo dans des cas de catastrophes en milieu urbain densément peuplé et en milieu rural au travers de démonstrateurs dédiés. Le séisme qui a durement frappé la région de Marrakech-Safi au Maroc le 8 septembre 2023 a été retenu pour un premier démonstrateur, les dommages occasionnés étant considérables et ayant autant touché des zones urbaines denses que des villages de montagne.

Une première comparaison des données Pléiades-HR et Pléiades Neo lors de l'éruption volcanique dans les îles Tonga en janvier 2022 avait mis en évidence la finesse de la résolution spatiale des images Pléiades Neo, permettant d'analyser les dommages et le paysage avec plus de confiance. L'analyse d'images Pléiades Neo en contexte opérationnel de cartographie d'urgence lors du séisme en Turquie survenu en février 2023 a également fourni des résultats prometteurs pour la détection des dommages au bâti.

Ainsi, ce démonstrateur sur le séisme au Maroc a non seulement l'objectif d'analyser précisément les capacités des données Pléiades Neo pour ce type d'application, mais aussi celui de dégager des recommandations pour les activités de cartographie d'urgence et pour l'intégration de ces données dans le cadre de la Charte Internationale Espace et Catastrophes Majeures.

1.2 Utilisation des données Pléiades Neo dans les dispositifs de cartographie d'urgence

La constellation Pléiades-HR est couramment sollicitée par les deux principaux dispositifs de cartographie d'urgence lors d'événements catastrophiques depuis sa mise en opération. Elle est aujourd'hui l'une des sources de données optiques très haute résolution les plus fréquemment utilisées en raison de ses performances spatiales, spectrales et de revisite (International Charter Space & Major Disasters, 2023). Afin de garantir la continuité et la qualité des services fournis par Pléiades-HR, le programme Copernicus et la Charte Internationale Espace et Catastrophes Majeures ont fait le choix d'intégrer la constellation Pléiades Neo à leurs ressources spatiales. Ainsi, Pléiades Neo fait partie intégrante des Copernicus Contributing Missions, tant pour des besoins standards que pour des acquisitions en mode urgent. Suite à une période de validation, Pléiades Neo a été intégré comme contribution française aux satellites de la Charte en octobre 2023. Ce satellite sera utilisé lors de catastrophes avec dommages au bâti (de type séisme, explosion technologique ...) et sera commandable seulement par les Project Managers des activations de la Charte (experts veillant à la bonne coordination de toutes les étapes).

La Charte Internationale Espace et Catastrophes Majeures a été créée en 1999 à l'initiative de l'ESA (Agence spatiale européenne) et du CNES (Centre National d'Etudes Spatiales), avec pour objectif de fournir gratuitement des données satellites dans le cadre de demandes urgentes de la part de pays touchés par des catastrophes naturelles ou d'origine humaine partout dans le monde. Ce dispositif fondé sur la coopération entre les agences spatiales propose ainsi un système unifié d'acquisition de données satellites afin de faciliter leurs accès aux acteurs de la gestion de crise par le biais d'utilisateurs autorisés (Bessis, Béquignon, et Mahmood 2004 ; International Disasters Charter 2024). La Charte Internationale Espace et Catastrophes Majeures est opérationnelle depuis 2000 et compte aujourd'hui 17 agences membres et 7 fournisseurs de données spatiales.

Copernicus Emergency Management Service (CEMS) est l'un des principaux services du programme européen Copernicus : il fournit gratuitement et sur demande des informations géospatiales pour la gestion d'événements d'origine naturelle ou humaine survenant partout dans le monde. Le volet Mapping de CEMS intervient en support

à la gestion de crise (Rapid Mapping) et à la prévention, à la mitigation et au relèvement (Risk & Recovery Mapping). Il joue un rôle crucial dans la réponse aux catastrophes en fournissant des informations cartographiques précises, actuelles, standardisées et facilement accessibles pour orienter les opérations de secours et la gestion de crise. Le service CEMS, opérationnel depuis 2012, fournit dans les heures et jours qui suivent un événement, des informations géospatiales basées sur des images satellite aux utilisateurs autorisés (sécurité civiles européennes) et associés (entités publiques locales, régionales, organisation internationales, ONG) (Copernicus, 2024).

Suite au tremblement de terre du 8 septembre 2023 ayant fortement affecté la région de l'Atlas et de Marrakech au Maroc, les deux dispositifs, Charte et CEMS Rapid Mapping (CEMS RM), ont été activés quelques heures après les secousses, afin d'évaluer les dommages à partir d'images satellites optiques très haute résolution spatiale. Les zones d'analyses ont été établies de façon coordonnée entre les deux dispositifs de gestion de crise. Des images Pléiades-HR et Pléiades Neo ont été acquises pour couvrir l'événement (GDACS, 2023).

1.3 Séisme de Marrakech-Safi du 8 septembre 2023

Le 8 septembre 2023 à 22h11 UTC, un séisme d'une magnitude comprise entre 6,7 et 6,9 sur l'échelle de Richter a frappé la région de Marrakech-Safi au Maroc. Il s'agit du plus important tremblement de terre enregistré par des stations sismiques de l'histoire du pays. L'épicentre de ce tremblement de terre meurtrier se situe à environ 70 kilomètres au sud-ouest de Marrakech au niveau de la région montagneuse du Haut Atlas, dans le centre du pays. Dans cette zone montagneuse, de nombreux villages ont subi de lourds dégâts sur le bâti et les réseaux de transports, compliquant l'accès pour les services de secours. Les secousses de ce séisme ont été ressenties jusque dans les villes de Rabat et Casablanca, sur la côte Atlantique nord, ainsi qu'à Essaouira et Agadir à l'ouest (Yeck *et al.*, 2023).

2. Méthodologie

2.1 Définition des zones d'étude

L'objectif du démonstrateur étant de travailler sur des secteurs aux caractéristiques variées tout en apportant de la valeur ajoutée complémentaire aux produits déjà délivrés par le dispositif CEMS RM et la Charte Internationale, un inventaire complet des acquisitions Pléiades-HR et Pléiades Neo post-événementielles, des zones d'intérêt et des produits à valeur ajoutée effectués dans les deux dispositifs a été réalisé. Ce recensement a permis de mettre en évidence des zones :

- non couvertes par les deux dispositifs en termes de produits cartographiques,
- aux paysages différents : urbain dense, zone rurale, secteur de plaine, zone de relief,
- où des dégâts sont visibles ou ont été rapportés.

Deux zones d'étude ont ainsi été définies, Marrakech et Imidal :

2.1.1 Marrakech

Cette première zone se trouve à environ 70km au nord-est de l'épicentre, dans un secteur de plaine, et correspond à une zone urbaine dense (Figure 1). Elle couvre la partie sud du quartier de la Medina et est complémentaire de l'analyse réalisée par UNOSAT dans le cadre de la Charte, sur les quartiers alentours (SERTIT, 2023; UNITAR, 2023). Selon la presse, des dégâts ont été répertoriés dans cette zone, en particulier dans le Mellah, quartier situé au nord du quartier Jhane Laafia, dont le bâti est dense et ancien.

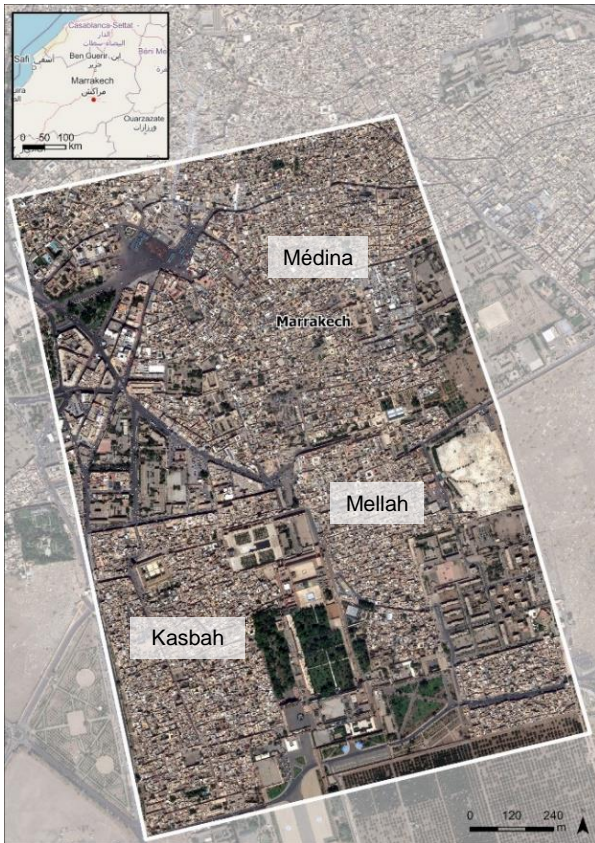


Figure 1 : Emprise de la zone de Marrakech

2.1.2 Imidal

La seconde zone se trouve à environ 30km à l'est de l'épicentre, dans un secteur de montagne, et correspond à des zones rurales au bâti peu dense (Figure 2). Elle couvre les villages de Ourigh, Tiniskt, Imidal et Imgdal. Selon la presse, de nombreux et importants dégâts ont été relevés dans ce secteur.

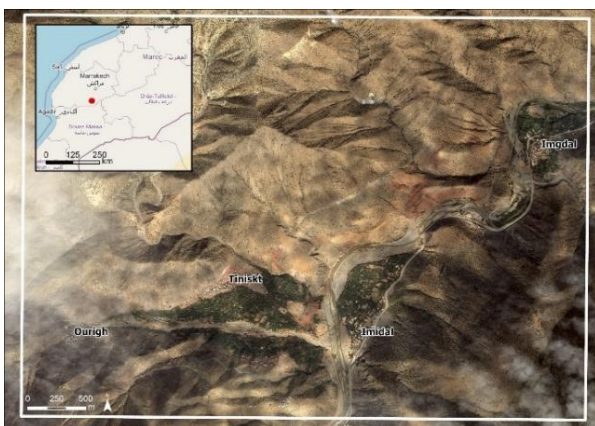


Figure 2 : Emprise de la zone d'Imidal

2.2 Sélection des images

La réalisation de l'étude nécessite une acquisition Pléiades-HR et une acquisition Pléiades Neo pour chacune des deux zones. Pour qu'une comparaison soit possible, les deux images doivent avoir un angle d'incidence et une date d'acquisition les plus proches possibles. Les Tableau 1 et Tableau 2 ci-dessous présentent les images utilisées.

Capteur	Date d'acquisition	Angle d'incidence
Pléiades-HR 1B	10.09.2023 10:15 UTC	25.82°
Pléiades Neo-3	11.09.2023 11:13 UTC	28.56°

Tableau 1 : Images utilisées sur le secteur de Marrakech

Les angles d'incidence sur le secteur de Marrakech sont importants pour une analyse des dommages au bâti mais restent acceptables et ont l'avantage d'être très similaires (Tableau 1). Les dates d'acquisition sont parfaites puisque très proches l'une de l'autre et de la date du séisme.

Il est à noter qu'une image Pléiades Neo-4 acquise le 10 septembre 2023 sur Marrakech a été mise à disposition par Airbus DS. Toutefois, du fait d'un angle d'incidence trop important (43.43°), cette donnée n'a pas pu être considérée pleinement dans cette étude et a tout de même été analysée pour illustrer l'influence de l'angle d'observation sur l'interprétation de l'image et l'identification des dégâts. Quelques captures (section 3.4 Influence de l'angle) illustrent ces effets.

Capteur	Date d'acquisition	Angle d'incidence
Pléiades-HR 1B	22.09.2023 11:23 UTC	6.24°
Pléiades Neo-4	15.10.2023 11:17 UTC	9.16°

Tableau 2 : Images utilisées sur le secteur d'Imidal

Sur le secteur d'Imidal, une demande d'acquisition Pléiades Neo avec un angle d'incidence le plus proche possible de l'acquisition Pléiades-HR planifiée pour le 22 septembre a été faite auprès d'Airbus DS. Malheureusement, pour respecter la contrainte liée à l'angle, la première tentative d'acquisition n'a pu avoir lieu que début octobre, et la première image exploitable n'a été acquise que le 15 octobre 2023 ; elle comporte un couvert nuageux relativement important, mais une partie de la zone d'étude est exploitable. Cette image a donc été utilisée pour effectuer l'interprétation des dommages. Il est à noter qu'un long délai dans l'acquisition des données Pléiades Neo est à constater car la demande de programmation a été faite en dehors du mécanisme d'urgence Charte, le satellite Pléiades Neo n'étant pas encore totalement intégré au moment du séisme.

Les 23 jours d'écart entre les deux observations Pléiades-HR et Pléiades Neo sont assez importants, sachant que des travaux de déblaiement ont pu être effectués entre les deux dates. Toutefois les angles

d'acquisition similaires sont indispensables pour cette étude. Après analyse de l'image, la situation au sol a peu changé entre les deux dates, l'utilisation de ces données reste donc pertinente.

2.3 Analyse des dommages

L'analyse des images et la classification des dégâts s'est faite conformément aux procédures appliquées dans le cadre de la cartographie d'urgence :

- Analyse des images par photo-interprétation par un opérateur qualifié et expérimenté,
- En suivant le guide d'identification et de classification des dégâts utilisé par la communauté mondiale de cartographie d'urgence (IWG-SEM),
- Comparaison en premier lieu de l'image Pléiades-HR post-événement avec les images de référence, à savoir :
 - Fond ESRI World Imagery (Worldview-3, 0.3m du 28.04.2023),
 - Fond Google Satellite (Worldview-3, 0.3m du 14.06.2019),
- Comparaison ensuite de l'image Pléiades Neo post-événement avec les images de référence,

- Validation des analyses par un autre opérateur qualifié,
- Comparaison des résultats Pléiades-HR et Pléiades Neo.

Les conséquences d'un séisme sur les infrastructures urbaines et rurales observables sur des images satellites peuvent être variées : bâtiments endommagés, voies de communication obstruées ou endommagées, autres infrastructures affectées, installation de camps de tentes pour les personnes déplacées, etc... Mises à part les ruelles obstruées par les bâtiments effondrés dans les villages de montagne, aucun impact significatif sur le réseau routier n'a été observé sur les images Pléiades-HR et Pléiades Neo. Des camps de tentes ont été détectés sur les deux types d'images, mais sans différence majeure d'interprétation. Cette étude se focalise donc sur les dommages aux bâtiments, dont l'interprétation est souvent la plus difficile.

Le guide d'interprétation ci-dessous (Tableau 3) suit la classification des dégâts aux bâtiments causés par des événements de type séisme ou cyclone / tempête / ouragan communément suivie par la communauté mondiale de cartographie d'urgence. Cette classification suit les recommandations faites par l'International Working Group on Satellite-based Emergency Mapping (IWG SEM, 2023).





Classe	Interprétation	Illustration
No visible damage Pas de dommage visible	Classe attribuée à tous les bâtiments totalement similaires à l'image de référence. Aucun élément visible sur l'image ne permet d'identifier un quelconque dommage. La vision satellitaire étant généralement nadirale, il n'est cependant pas possible de détecter d'éventuels dégâts sur les façades.	
Possibly damaged Possiblement endommagé	Classe attribuée en cas d'incertitude. Il peut y avoir des indices permettant d'estimer que la structure est potentiellement affectée, comme la présence de débris au sol, autour de celui-ci.	
Damaged Endommagé	Classe attribuée aux structures ayant visiblement subi des dégâts : soit une partie de l'édifice s'est effondrée, soit la toiture est impactée.	
Destroyed Détruit	Classe attribuée aux structures dont tout ou partie (>50%) de l'édifice s'est effondré.	

Tableau 3 : Guide d'interprétation et classification des dégâts au bâti suite à un séisme. Illustrations réalisées à partir d'images Pléiades-HR utilisées dans le cadre de cette étude.

Malgré le fait que ce guide d'interprétation ait été réalisé avec des images Pléiades-HR, il est à noter que la classification reste la même pour l'interprétation des images Pléiades Neo.

3. Analyse des résultats

3.1 Résultats par zone et par capteur

L'analyse et la classification des dégâts ont été d'abord faites sur les images Pléiades-HR afin de ne pas être influencé par de potentiels dégâts visibles uniquement sur les images Pléiades Neo.

3.1.1 Marrakech

La première évaluation des dommages au bâti sur la zone de Marrakech avec Pléiades-HR a conduit au résultat présenté en Figure 3.

L'analyse de l'image Pléiades-HR1B sur le secteur de Marrakech a mis en évidence 103 structures endommagées ou possiblement endommagées, selon la classification suivante :

Possiblement endommagé	Endommagé	Détruit
43	59	1

Tableau 4 : Classification des dégâts sur Marrakech à partir de l'image Pléiades-HR1B acquise le 10.09.2023

L'évaluation des dommages sur la zone de Marrakech avec Pléiades Neo-3 a amené au résultat illustré en Figure 4.

Cette analyse a mis en évidence 270 structures endommagées ou possiblement endommagées, selon la classification suivante :



Figure 3 : Analyse des dégâts sur Marrakech à partir de l'image Pléiades-HR1B acquise le 10.09.2023

3.2 Comparaison statistique des résultats Pléiades-HR / Pléiades Neo

La résolution spatiale de Pléiades Neo étant plus fine que celle de Pléiades-HR, les résultats issus de l'analyse Pléiades Neo sont considérés comme étant la référence. Ainsi, dans le cas par exemple de dommages détectés

Possiblement endommagé	Endommagé	Détruit
83	178	9

Tableau 5 : Classification des dégâts sur Marrakech à partir de l'image Pléiades Neo-3 acquise le 11.09.2023

3.1.2 Imidal

En ce qui concerne l'évaluation des dégâts sur le secteur Imidal les résultats obtenus sont les suivants.

L'analyse de l'image Pléiades-HR1B a mis en évidence 241 structures endommagées ou possiblement endommagées, selon la classification :

Possiblement endommagé	Endommagé	Détruit
36	67	138

Tableau 6 : Classification des dégâts sur le secteur d'Imidal à partir de l'image Pléiades-HR1B acquise le 22.09.2023

L'analyse de l'image Pléiades Neo-4 a mis en évidence 227 structures endommagées ou possiblement endommagées, et 23 structures sans dommage visible, selon la classification suivante :

Possiblement endommagé	Endommagé	Détruit
12	63	152

Tableau 7 : Classification des dégâts sur le secteur d'Imidal à partir de l'image Pléiades Neo-4 acquise le 15.10.20



Figure 4 : Analyse des dégâts sur Marrakech à partir de l'image Pléiades Neo-4 acquise le 11.09.2023

avec Pléiades-HR mais non détectés avec Pléiades Neo, cela ne signifie pas que Pléiades-HR a des capacités supérieures à celles de Pléiades Neo mais au contraire que Pléiades Neo permet d'affiner l'analyse et de lever les doutes. Il en est de même pour l'interprétation du niveau des dommages.

3.2.1 Marrakech

Ainsi, sur le secteur de Marrakech, zone urbaine dense aux dommages éparses, l'image Pléiades Neo permet clairement, d'une part de détecter davantage de bâtiments endommagés (+179) et d'autre part d'affiner l'interprétation sur la présence ou non de dommages (12 objets) et sur le niveau de dommages (24% des objets) (Tableau 8).

Analyse PHR	Analyse PNeo	Total
Dégât défecté	Dégât non détecté	12*
Dégât non détecté	Dégât défecté	179
Dégât interprété comme plus important	Dégât interprété comme moins important	3
Dégât interprété comme moins important	Dégât interprété comme plus important	19
Interprétation identique		69

Analyse PHR	Analyse PNeo
103	270

Tableau 8 : Comparaison des analyses Pléiades-HR et Pléiades Neo sur le secteur de Marrakech

* Il s'agit d'erreurs d'interprétation liées à la résolution de l'image Pléiades-HR

3.2.2 Imidal

Sur le secteur d'Imidal, zone rurale et montagneuse de villages fortement affectés, l'image Pléiades Neo permet également d'affiner l'interprétation des dommages, puisqu'une part non négligeable de dommages a été surestimée ou sous-estimée avec Pléiades-HR. Dans ce type de paysage, de structure urbaine et de densité de dommages, Pléiades Neo ne recense pas spécialement plus de bâtiments endommagés que Pléiades-HR, qui semble déjà bien détecter les dégâts, mais permet

d'affiner l'analyse, de lever les doutes et de corriger les mauvaises détections liées à la résolution de Pléiades-HR. Le Tableau 9 regroupe l'ensemble de ces résultats.

Analyse PHR	Analyse PNeo	Total
Dégât défecté	Dégât non détecté	24
Dégât non détecté	Dégât défecté	10
Dégât interprété comme plus important	Dégât interprété comme moins important	2
Dégât interprété comme moins important	Dégât interprété comme plus important	21
Interprétation identique		194

Analyse PHR	Analyse PNeo
241	227

Tableau 9 : Comparaison des analyses Pléiades-HR et Pléiades Neo sur le secteur d'Imidal

3.3 Comparaison visuelle des différences Pléiades-HR / Pléiades Neo

Le gain en précision et donc en facilité de détection des dommages sur les images Pléiades Neo est illustré par des exemples concrets présentés dans les figures suivantes.

L'apport des données Pléiades Neo pour la détection des dommages en milieu urbain sur des objets de petite taille est parfaitement illustré par l'exemple présenté en Figure 5. L'image Pléiades-HR (au centre) ne permet pas d'identifier les remparts de la médina de Marrakech comme tels, et encore moins de détecter les créneaux les composant. Sur l'image Pléiades Neo (à droite), il est non seulement possible de détecter et individualiser les créneaux des remparts, mais aussi d'observer les segments de remparts endommagés et les débris au sol causés par la chute de créneaux.



Figure 5 : Segment de remparts de la médina de Marrakech endommagé

L'exemple suivant illustre l'effondrement du minaret de la Mosquée Kharbouch sur la place Jemaa el-Fna de Marrakech (Figure 6). Si les dommages sur le minaret et les débris au sol liés à son effondrement ne sont pas clairement identifiables sur l'image Pléiades-HR (Figure 6c), ils sont déjà plus nettement observables sur l'image Pléiades Neo (Figure 6d). Il faut cependant reconnaître l'utilité des médias en complément des données d'observation de la Terre pour la reconnaissance de ce dommage précis (Figure 6a).



(a) Photographie in-situ post-séisme
© Reuters / Abdelhak Balhaki



(b) Avant séisme



(c) PHR 10.09.2023

Soupçon de débris au sol



(d) PNeo 11.09.2023

Présence de débris au sol

Figure 6 (a, b, c, d) : Illustration de l'effondrement du minaret de la Mosquée Kharbouch sur la place Jemaa el-Fna à Marrakech

La sous-détection de bâtiments sur l'image Pléiades-HR est illustrée par la Figure 7. En effet, les bâtiments sont analysés comme étant possiblement affectés « Possibly damaged » sur l'image Pléiades Neo (Figure 7c) et n'avaient pas été détectés comme endommagés sur l'image Pléiades-HR (Figure 7b).



(a) Avant séisme



(b) PHR 10.09.2023

Débris au sol non identifiés sur l'image Pléiades-HR

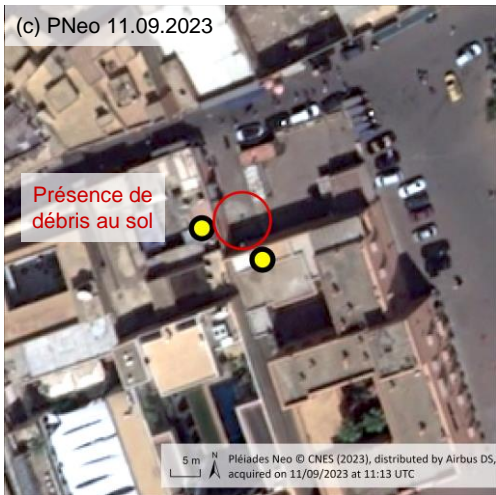


Figure 7 (a, b, c) : Illustration de bâtiments "Possibly damaged" dans le secteur de Marrakech

Un exemple de bâtiment analysé comme étant endommagé « Damaged » sur l'image Pléiades Neo (Figure 8c) et qui avait bien été détecté comme endommagé sur l'image PHR (Figure 8b), est présenté en Figure 8.



Figure 8 (a, b, c) : Illustration d'un bâtiment "Damaged" dans le secteur de Marrakech

3.4 Influence de l'angle

L'angle d'acquisition des images influe beaucoup dans la capacité de détection des dégâts (Figure 9). En effet, sur l'image Pléiades Neo-3 acquise le 11/09/2023 avec un angle d'incidence de $28,56^\circ$ (Figure 9a), il est possible de détecter des dommages uniquement sur la partie du sud du rempart. A l'inverse, sur l'image Pléiades Neo-4 acquise le 10/09/2023 avec un angle d'incidence de $43,43^\circ$ (Figure 9b), il est possible de détecter des dommages uniquement sur la partie du nord du rempart.



(a) Image Pléiades Neo-3 acquise le 11.09.2023 avec un angle d'incidence de $28,6^\circ$



(b) Image Pléiades Neo-4 acquise le 10.09.2023 avec un angle d'incidence de $43,43^\circ$

Figure 9 (a, b) : Illustration de l'influence de l'angle dans l'identification des dommages

Certes un angle important peut permettre dans certains cas de détecter des dommages ou des indices sur des façades de bâtiment qui ne seraient pas visibles avec une observation plus proche du nadir. Toutefois, de forts angles empêchent de voir des débris dans les rues dissimulées par les bâtiments environnants, surtout quand elles sont étroites. Or la présence de débris est l'un des indices les plus importants pour détecter les dommages au bâti. C'est ce que démontre clairement la Figure 10 ci-après.



(a) Image Pléiades Neo-3 acquise le 11.09.2023 avec un angle d'incidence de **28,6°**



(b) Image Pléiades Neo-4 acquise le 10.09.2023 avec un angle d'incidence de **43,43°**

Figure 10 (a, b) : Illustration de l'influence de l'angle dans l'identification des dommages : angle trop fort entraînant la non détection des dégâts

4. Conclusion, recommandations et perspectives

La résolution spatiale des images Pléiades Neo offre indéniablement un gain important dans l'interprétation du paysage et la détection et l'évaluation du niveau de dégâts en milieu bâti par rapport aux images Pléiades-HR. En effet, les images Pléiades Neo ont par exemple permis de détecter 74% de bâtiments endommagés en plus sur la zone de Marrakech. Par ailleurs, ces données

ont permis d'affiner la classification de certains dégâts, surestimés ou sous-estimés par l'analyse Pléiades-HR.

D'autres part, Pléiades Neo est capable de détecter des éléments du paysage urbain de taille réduite, comme les créneaux des remparts et les dégâts associés. Cela laisse imaginer la possibilité de déceler des dommages sur d'autres objets ou infrastructures de taille équivalente, au contraire de Pléiades-HR.

Même si les images Pléiades Neo, du fait de leur résolution, impliquent un stockage et potentiellement des temps de prétraitement plus importants, elles permettent de diminuer considérablement le temps d'analyse pour un opérateur dans le processus de photo-interprétation.

Ainsi, bien que les images Pléiades-HR permettent de dresser une première analyse des dégâts post-séisme, les données Pléiades Neo s'imposent donc comme étant indispensables pour effectuer une interprétation plus exhaustive et plus précise des dégâts en milieu urbain et en paysage rural bâti. Cela est encore plus vrai dans les paysages de type Atlas marocain, où le bâti et le sol se confondent de par leur couleur et leur texture.

Pour les événements de grande ampleur de type séisme (mais également pour tous les événements nécessitant une analyse des dégâts aux infrastructures, comme les tempêtes, ouragans, cyclones...), il semble primordial de prioriser les images Pléiades Neo sur les zones urbaines les plus sinistrées. Les images Pléiades-HR pourraient être exploitées en complément sur des zones périphériques.

Dans un contexte d'urgence, les premières images satellites pertinentes disponibles, quel que soit l'angle d'acquisition, sont et doivent être exploitées afin de dresser un premier bilan des dommages. Cependant, comme constaté plus haut, l'angle d'observation influe de manière non négligeable sur la capacité à détecter des dégâts. Un angle le plus faible possible doit être privilégié quand cela est possible. Il serait intéressant d'utiliser les images Pléiades-HR et Pléiades Neo de manière complémentaires, afin d'optimiser les acquisitions d'un jour à l'autre selon l'angle d'incidence.

Un second démonstrateur est envisagé sur une ville occidentale afin d'évaluer l'apport des données Pléiades Neo sur un autre type d'architecture urbaine.

L'étude s'est focalisée sur la détection de dommages au bâti suite à un événement de type séisme à partir de données monoscopiques Pléiades-HR et Pléiades Neo. Les deux constellations offrent des capacités stéréoscopiques, il pourrait être intéressant d'étudier la différence de potentiel sur les aspects 3D pour la détection des dommages au bâti.

D'autre part, l'apport des bandes spectrales additionnelles proposées par Pléiades Neo pourrait être analysé sur d'autres types d'événements plus adéquats (les bandes du visible étant le plus pertinentes dans un contexte de séisme).

Enfin, de par sa conception et sa technologie récente, Pléiades Neo offre une très grande réactivité dans le chargement du plan d'acquisition (toutes les 50 minutes contre toutes les 8 heures pour Pléiades-HR) et dans la

mise à disposition des données (possible en seulement 30 minutes après l'acquisition). Ce sont des atouts supplémentaires et primordiaux dans la réponse à l'urgence.

5. Remerciements

Cette étude a été soutenue par le CNES afin de mieux connaître l'apport du nouveau capteur Pléiades Neo, proposé à la Charte Internationale Espace et Catastrophes Majeures depuis octobre 2023, en complément des données SPOT et Pléiades-HR.

Les images Pléiades Neo utilisées dans le cadre de cette étude ont été fournies par Airbus DS (© CNES 2023, distribution Airbus DS), l'image Pléiades-HR du 22 septembre 2023 ayant d'autre part été acquise dans le cadre des travaux de la CIEST², Cellule d'Intervention et d'Expertise Scientifique et Technique.

Références

- Bessis, J.-L., Béquignon, J. and Mahmood, A. (2004) 'The International Charter "Space and Major Disasters" initiative', *Acta Astronautica*, 54(3), pp. 183–190. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0094-5765\(02\)00297-7](https://doi.org/10.1016/S0094-5765(02)00297-7).
- Copernicus (2024) *The Emergency Management Service - Mapping, Copernicus EMS - Mapping*. Available at: <http://emergency.copernicus.eu/mapping/ems/emergency-management-service-mapping>.
- Esa (2022) *Pleiades Neo - eoPortal*. Available at: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/pleiades-Neo#launch-1>.
- GDACS (2023) *Smcs*. Available at: <https://smcs.unosat.org/event/282>.
- Huber, C. *et al.* (2013) *Synergy of VHR pleiades data and SWIR spectral bands for flood detection and impact assessment in urban areas: Case of Krymsk, Russian Federation, in July 2012*, p. 4541. Available at: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2013.6723845>.
- International Charter Space & Major Disasters (2023) *Disasters Charter Annual Report*. Available at: <https://disasterscharter.org/documents/10180/22404724/Disasters-Charter-Annual-Report-2022>.
- International Disasters Charter (2024) *Home - International Disasters Charter*. Available at: <https://disasterscharter.org/fr/web/guest/home>.
- IWG SEM (2023) *IWG SEM*. Available at: https://www.un-spider.org/sites/default/files/IWG_SEM_Guidelines_Building%20Damage%20Assessment_v1_0.pdf.
- Maxant, J. *et al.* (2013) 'Contribution of Pleiades HR imagery for disaster damage mapping : initial feedback over Asia, Africa, Europe or the Caribbean'.
- SERTIT (2023) 'Service de cartographie rapide', *SERTIT*. Available at: <https://sertit.unistra.fr/rms/>.
- UNITAR (2023) *Earthquake in Morocco on 9 September 2023*. Available at: <https://experience.arcgis.com/experience/c6682b3811894bff9ffcfa58c166d742/page/UNOSAT/>.
- Yeck, W.L. *et al.* (2023) 'Rapid Source Characterization of the 2023 Mw 6.8 Al Haouz, Morocco, Earthquake', *The Seismic Record*, 3(4), pp. 357–366. Available at: <https://doi.org/10.1785/0320230040>.
- Yésou, H., Chastanet, P., *et al.* (2015) 'Contribution de l'imagerie Pléiades à la cartographie rapide des dégâts suite à des catastrophes majeures: retours d'expériences après deux ans d'actions de cartographie rapide localisées en Asie, en Afrique, en Europe et aux Caraïbes', *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, (209), pp. 81–87. Available at: <https://doi.org/10.52638/rfpt.2015.236>.
- Yésou, H., Escudier, A., *et al.* (2015) 'Exploitation de l'imagerie Pléiades-THR en cartographie réactive suite à des catastrophes naturelles ayant affecté le territoire français en 2013', *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, (209), pp. 39–45. Available at: <https://doi.org/10.52638/rfpt.2015.210>.

DE PLÉIADES À PLÉIADES NEO : ENJEUX ET OPPORTUNITÉS. L'EXPÉRIENCE D'UN PRODUCTEUR DE DONNÉES.

Sophie Delpierre¹, Maxime Chauvin², Nahossio Gongga-Saholiariliva¹, Camille Lhenry¹, Yann Desmarais¹,
Jérôme Leroux², Jules Roger², Baptiste Benard², Philippe Albert^{†1}, Ivan Pristchepa¹

1: Geofit Montpellier, Le Syracuse, 2 av. Monteroni d'Arbia, 34920 Le Crès

2: Geofit Nantes, 7 rue Alfred Kastler, 44307 Nantes

Résumé

Avec 50 années d'expérience dans le traitement de l'information géospatiale, le Groupe GEOFIT intervient entre autres dans les domaines de la photogrammétrie et de la télédétection. Une de ses entités emploie plus de 50 personnes en France pour produire des données cartographiques, en deux ou trois dimensions, à partir d'acquisitions aériennes ou de données satellitaires. GEOFIT Montpellier est notamment, en tant que sous-traitant, attributaire depuis 2016 d'un marché de la Direction Générale de l'Armement destiné à la production de cartes au 50 000^{ème} et de plans de villes au 5000^{ème} : le programme GEOMAPS, qui fait suite au programme TOPOBASE des années 2005-2015. Depuis, les équipes de GEOFIT ont visualisé, traité, ajusté, étalonné, échantillonné, des millions de km² d'images Pléiades pan-sharpées à 50 cm de résolution. Ces mêmes images ont été utilisées pour l'entraînement de modèles d'intelligence artificielle dans un objectif de produire des couches d'appui internes à la production vecteur. Plusieurs dizaines de photo-interprètes ont "pané/balayé" et interprété de multiples paysages, urbains, péri-urbains, ruraux, plus ou moins anthropisés et ont eu à produire des bases de données vectorielles conformes aux exigences militaires. Depuis l'année 2023, ces mêmes équipes de data-scientists, ingénieurs, analystes images, photo-interprètes font évoluer leur métier en appliquant leur expérience aux nouvelles images issues de Pléiades Neo. Quels sont les implications et impacts ? Est-ce une simple évolution ou un "game changer" ? Il y a-t-il une opportunité à utiliser de nouveaux canaux ? Qu'en est-il des standards vecteurs ? L'IA sait-elle et peut-elle faire des prédictions Pléiades Neo depuis un apprentissage Pléiades ? GEOFIT a évoqué ces questions lors du séminaire Pléiades Neo du 5 octobre 2023 (Toulouse, France).

Mots clés : Production vecteur, Optique très haute résolution, Pléiades, Pléiades Neo, Photo-interprétation, Résolution, Résolution mixte, Apprentissage profond, Segmentation sémantique, Apprentissage par transfert

Abstract

GEOFIT has 50 years' experience in geospatial information processing and is involved in fields such as photogrammetry and remote sensing. GEOFIT Montpellier employs over 50 people in France to produce two- and three-dimensional cartographic data from aerial and satellite acquisitions. As a subcontractor, GEOFIT Montpellier has been awarded a contract since 2016 by the French Defence Procurement Agency (DGA) to produce 50,000-scale maps and 5,000-scale city maps : the Geomaps program, following on the Topobase program of 2005-2015. Meanwhile, GEOFIT teams have visualized, processed, adjusted, calibrated and sampled millions of km² of Pleiades pan-sharpened images at 50 cm resolution. These images were used to train artificial intelligence models, with the aim of producing internal support layers for vector production. Several dozen photo-interpreters "panning" and interpreting multiple landscapes, urban, peri-urban, rural, more or less anthropized, had to produce vector databases in line with military requirements. Since 2023, these same teams of data scientists, engineers, image analysts and photo-interpreters have been evolving their profession by applying their experience to the new images produced by Pleiades Neo. What are the advantages and disadvantages ? Is this a simple evolution or a 'game changer' ? Are the new channels useful ? What about vector standards ? Is AI capable of making Pleiades Neo inferences from Pleiades training ? GEOFIT addressed these questions at the Pleiades Neo Seminar held in Toulouse (France) on October 5, 2023.

Keywords : Vector Production, VHR, PNEO, PHR, Digitation mapping, Resolution, Combined Resolution, Deep Learning, Semantic Segmentation, Transfer learning

1. Introduction

La photo-interprétation est un processus d'analyse et d'extraction d'informations à partir d'images géoréférencées (photographies aériennes ou images satellite) permettant de comprendre la surface terrestre et ses caractéristiques. En tant que producteur, GEOFIT a développé des chaînes de production vecteur par photo-interprétation s'adaptant régulièrement aux avancées technologiques, que l'on se place au niveau de l'imagerie et des capteurs d'acquisition ou au niveau algorithmique et software avec le développement d'outils d'aide à la photo-interprétation.

Dans le cadre de marchés Défense, GEOFIT intervient comme producteur de données vectorielles. Jusqu' alors, les équipes de production ont pu bénéficier d'imagerie Très Haute Résolution (THR) Pléiades Haute Résolution (PHR) de résolution 50 cm. Elles exploitent depuis quelques mois des images satellite de résolution encore plus fine, *i.e.* des Pléiades Neo (PNEO) dont la résolution de 30 cm est quasi équivalente à des orthophotographies de résolution similaire. Cette gamme de résolution est exploitée dans certains projets (hors Défense) à des échelles de rendu cartographique inférieures au 1/3000^{ème} en zone rurale et au 1/1000^{ème} en zone urbaine et péri-urbaine (Figure 1).



FIGURE 1 – Compositions Colorées vraies couleurs, CC-VC, en zone urbaine (1/500^{ème}). **Haut** : PHR, **Bas** : PNEO.

Une évaluation de l'impact de l'intégration de ces nouvelles données dans notre outil de production nous a permis de saisir cette nouveauté comme une opportunité d'évaluer nos processus et la donnée d'entrée. Cela nous a permis également de faire évoluer en interne la mise à disposition de "couche d'appui" THR provenant

d'indicateurs innovants issus de modèles utilisant l'apprentissage profond. Ces couches d'appui sont souvent des masques vectorisés issus de prédictions des modèles avec ou sans post-traitement (vectoriel ou image). Elles servent de support et d'aide à la photo-interprétation.

Dans le cadre de notre présentation et de cet article, nous abordons les avantages et inconvénients compilés lors des premières exploitations des images PNEO sur certains chantiers cartographiques.

Dans un premier temps, le passage des PHR aux PNEO est évalué empiriquement et qualitativement, nous parlons du ressenti et de l'expertise des photo-interprètes.

Dans un second temps, nous exposons quels sont les apports de ces données dans nos processus de production de couches d'appui internes pour aider nos photo-interprètes à l'extraction vecteur.

2. Photo-interprétation

Les sections qui suivent ont pour objectif d'illustrer les éléments essentiels relevés par les photo-interprètes lors de l'utilisation de données multi-sources (images) ou du passage d'un type d'image à un autre avec une ou des mises à jour à l'échelle. Les exemples les plus significatifs sont présentés afin d'éclairer tant le processus de production des données vecteur que le travail du photo-interprète, et ce, du point de vue du producteur de données. Les images utilisées sont pan-sharpées, la résolution est de 50 cm (70 cm ré-échantillonnées à 50 cm) pour les PHR, la résolution est de 30 cm pour les PNEO.

GEOFIT réalise la photo-interprétation pour les productions GEOMAPS en exploitant la bande proche-infrarouge¹ et en utilisant des compositions colorées infrarouges (*i.e.* Proche-Infrarouge / Rouge / Vert). Cette approche permet de mieux différencier la végétation des sols nus ainsi que d'autres éléments anthropiques (*cf.* Figure 2). Ces compositions colorées (CC) sont nommées CC-PIR dans la suite du document. Dans les sections suivantes, les images pourront être proposées en Composition colorée « vraies couleurs » à titre d'illustration, elles sont alors nommées CC-VC dans le reste du document. Les bandes Red Edge ou Deep Blue des PNEO ne sont pas exploitées sur nos différents chantiers.

2.1. Spécifications MUVD

Dans le cadre de GEOMAPS, pour la filière de production des plans de villes (F5), les règles d'extraction sont définies par le modèle de référence MUVD : MGCP Urban Vector Data (**Defence Geospatial Information Working Group (DGIWG 262) (2021)**) pour une cible cartographique 1/5000^{ème}). Cette cible cartographique, les règles d'extraction, restent identiques quel que soit le capteur utilisé. La Figure 4 illustre le fait que le rendu

1. Note : les vecteurs de production GEOMAPS ne sont pas présentés dans cette étude. Les illustrations vecteurs visibles sur certaines figures sont issus d'une saisie GEOFIT produite à des fins de communication

vectorel reste identique (les règles d'extraction étant similaires) quel que soit le capteur utilisé, bien que l'opérateur / photo-interprète appréhende différemment l'espace en fonction de la résolution et de la netteté de l'image.

Cependant, la précision de l'écart de pointé nécessaire pour remplir les spécifications GEOMAPS doit être explicitement inférieure ou égale à un pixel, quelle que soit la résolution de l'image. De ce fait, les objets dont les limites pouvaient être floues en PHR sont dorénavant concernés par les spécifications en PNEO et, du fait de la taille réduite des pixels sur PNEO le positionnement du pointé est moins permissif que sur les images PHR.



FIGURE 2 – Compositions Colorées PIR (1/4000^{ème}).
Haut : PHR, Bas : PNEO.

2.2. Simple comparaison visuelle

En photo-interprétation, le type d'image, les résolutions spatiales et spectrales ainsi que la saisonnalité (temporalité) viennent contraindre ou faciliter la perception des objets de surface, leur extraction ainsi que leur restitution. Viennent s'ajouter aux caractéristiques intrinsèques des capteurs et images, la capacité d'analyse de la morphologie des objets, de leurs dimensions, de leurs couleurs et teintes, de leur texture ou encore de l'ombrage et du relief qui apportent des informations indispensables à l'interprétation et l'extraction des objets (Figure 2). En dernier point, les éléments cités précédemment ont des impacts selon la(les) production(s) cible(s).

L'une des premières conséquences liée à l'usage d'images de résolution plus fine que des PHR est de permettre au photo-interprète de scanner sa zone d'étude de manière « optimisée ». En effet, le photo-interprète analyse et appréhende plus rapidement le paysage et ses éléments. Il se dirige donc plus rapidement vers sa cible cartographique.

En milieu urbain, la délimitation des bâtiments et l'identification du type de toit majoritaire sur la zone d'étude

s'avèrent être facilitées par la finesse de résolution et des détails présents à l'image.

L'interprétation est de fait plus intuitive sur la PNEO. La Figure 3 est un exemple de comparaison visuelle entre les images PHR et PNEO en amont du processus d'extraction vectorielle. Il est ainsi possible de distinguer des niveaux de détail et de netteté différents.

Il est également notable que la couleur de certains éléments anthropiques tend moins vers le rouge dans les images PNEO. Cela s'explique probablement par des méthodes de correction atmosphérique différentes. Les images PHR GEOMAPS utilisent une correction *Top-Of-Atmosphere* tandis que les images PNEO utilisent une correction *Bottom-Of-Atmosphere* (Poilvé et al. (2022)). Cela apporte un rendu radiométrique plus proche de la réalité physique.



FIGURE 3 – CC-PIR (1/1250^{ème}).
Haut : PHR, Bas : PNEO.



FIGURE 4 – CC-PIR (1/500^{ème}). Vecteurs relatifs aux bâtiments en rouge (*saisie interne GEOFIT*) Gauche : PHR, Droite : PNEO.

2.3. Objets particuliers et structuration du paysage

Le fait d'avoir une résolution plus fine permet un repérage plus rapide des objets particuliers ou des objets structurants du paysage, notamment en milieu urbain. Les Figures 5 et 6, montrent qu'il est plus facile d'identifier les superstructures de toit, les détails visibles tels que les indentations ou encore les différences de niveau et de matériaux des toits.



FIGURE 5 – Détails sur des CC-VC, distinction des indentations (1/500^{ème}). Haut : PHR Bas : PNEO.



FIGURE 6 – Détails sur des CC-VC — distinction des niveaux et indentations (1/600^{ème}). Haut : PHR Bas : PNEO.

Les images PNEO apportent également un « confort d'interprétation », notamment pour l'identification des petits objets qui, bien que visibles sur les images PHR, sont plus facilement repérables sur les PNEO. L'extraction est plus facile, l'œil cherche moins la délimitation des contours.

Les Figures 7 à 10 illustrent (i) un exemple d'objets du type antenne ou pylône pour lesquels la structure, la base et l'ombre sont plus visibles ; (ii) des exemples d'objets du type « petits réservoirs d'eau » ou (iii) l'exemple d'objets fins du type canaux urbains ou passage d'accès à des habitations. Ces exemples apparaissent plus nettement et distinctement sur les images PNEO.



FIGURE 7 – Détection d'antenne/Pylône (1/500^{ème}). Haut : PHR, Bas : PNEO.

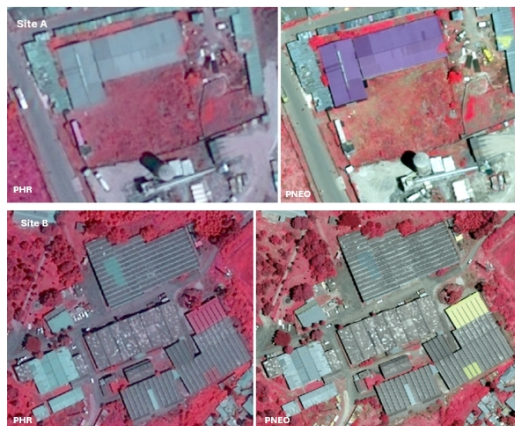


FIGURE 8 – Exemples de deux sites industriels (1/500^{ème}). Gauche : PHR Droite : PNEO.

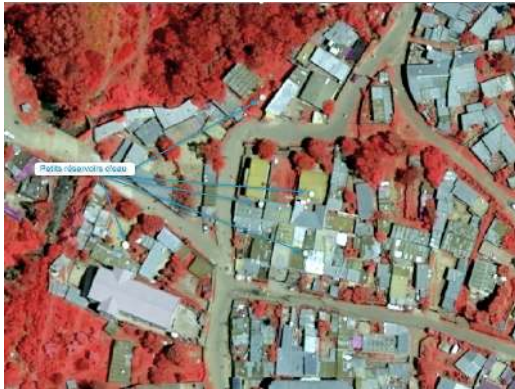


FIGURE 9 – Détection de petits réservoirs d'eau(1/500^{ème}). **Haut** : PHR, **Bas** : PNEO.

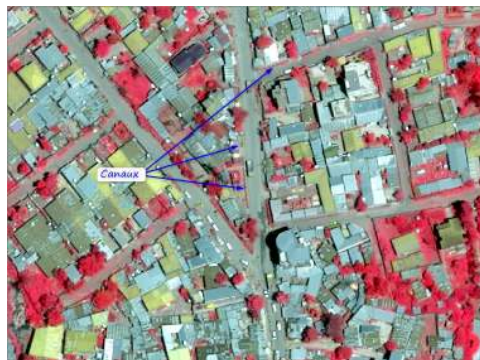


FIGURE 10 – Détection des canaux (1/500^{ème}). **Haut** : PHR, **Bas** : PNEO.

Il est également plus aisé pour le photo-interprète de déterminer les limites et fonctions des sites industriels grâce à la meilleure interprétation des petits objets, les composants (*e.g.* bassins, citernes, cheminées, aérateurs...) et des objets fins (*e.g.* clôtures, convoyeurs, pipelines...), Figure 8.

2.4. Zones urbaines denses, zones rurales

Dans des zones urbaines extrêmement denses, là où il était parfois complexe de faire des délimitations des bâtiments et structures de toit en s'appuyant sur des PHR, la résolution des PNEO 30 cm permet une individualisation qui n'aurait peut-être pas pu être réalisée sur des PHR 50 cm (Figure 11). On comprend que les images PNEO permettent de faciliter l'interprétation grâce à la finesse des détails, mais le mode d'extraction doit être plus minutieux afin de respecter les critères d'extraction de la cible GEOMAPS F5 (qui s'adaptent en partie à la résolution de l'image).



FIGURE 11 – Zoom au 1/500^{ème} sur une PHR et zoom au 1/300^{ème} sur une PNEO. **Haut** : PHR, **Bas** : PNEO.

Le fait d'utiliser des images PNEO permet une meilleure visibilité des détails, mais cela implique aussi une précision plus importante dans le pointé pour s'adapter aux spécifications, car la résolution est plus importante (voir sous-section 2.1). De ce fait, l'opérateur doit adapter son seuil de saisie pour un rendu similaire. Il est en moyenne au 500^{ème} sur des PHR 50 cm et au 300^{ème} sur des PNEO (Figure 12).



FIGURE 12 – Zoom au 1/500^{ème} sur des PHR et zoom au 1/300^{ème} sur des PNEO. **Haut** : PHR, **Bas** : PNEO.

Il en va de même quelle que soit la thématique extraite. Ici pour l'occupation du sol, pour un paysage avec des délimitations précises, l'opérateur est en moyenne au 2000^{ème} sur des Pléiades 50 cm et au 1500^{ème} sur des PNEO, Figure 13.



FIGURE 13 – Zoom au 1/2000^{ème} sur une PHR et zoom au 1/1500^{ème} sur une PNEO. **Gauche** : PHR, **Droite** : PNEO.

2.5. Impact de la parallaxe

La hauteur des bâtiments et l'angle d'acquisition des images influencent fortement l'extraction des vecteurs en milieu urbain. Les Figures 14 et 15 illustrent bien l'effet de la parallaxe (dévers) sur des bâtiments de moyenne et de grande taille. L'identification et le positionnement des bases des bâtiments sont plus précis avec une image PNEO de 30 cm qu'avec une image PHR de 50 cm. Toutefois, malgré cet avantage, il reste indispensable d'appliquer un décalage systématique des vecteurs pour corriger l'effet de parallaxe, car les contours sont extraits à partir des toits.



FIGURE 14 – Parallaxe sur de grands ensembles(1/500^{ème}). **Haut** : PHR, **Bas** : PNEO.



FIGURE 15 – Parallaxe sur des immeubles de taille moyenne (1/500^{ème}). **Haut** : PHR, **Bas** : PNEO.

2.6. Bilan

À cible équivalente, la production de données cartographiques est impactée par le passage à la PNEO 30 cm.

D'un côté, l'interprétation est plus aisée :

- avec une meilleure différenciation et identification des objets ;
- avec moins de doutes ou d'hésitations sur les délimitations et les codages attributaires (par exemple les types de toits) ;
- avec un travail d'interprétation plus reposant pour les yeux des photo-interprètes.

De l'autre côté, l'extraction est plus minutieuse :

- il est nécessaire de respecter les parallaxes et d'ajuster continuellement les emprises à la base,
- un phénomène de mesure et « re-mesure » des indentations induit une augmentation relative du temps de saisie sur certains objets.
- La subdivision des bâtiments (en réponse aux règles d'extraction) est plus importante dans la mesure où la résolution des images permet de mieux interpréter l'individualisation des objets, ainsi que des différents niveaux qui les composent.
- les niveaux de zoom sont plus fins, ce qui apporte un pointé plus précis, mais un temps plus long à la saisie.

Ainsi, il est nécessaire d'établir un équilibre entre gain à l'interprétation et perte de temps à l'extraction (dont l'importance est variable et est fonction des thématiques et des paysages). *Qu'en est-il pour l'évolution des modèles d'apprentissage et des prédictions IA ? Les sections suivantes abordent cette question du changement de résolution dans la production de couches d'appui à la photo-interprétation.*

3. L'IA au service de la production cartographique

3.1. L'application de l'IA à l'imagerie satellite

L'IA, et plus particulièrement l'apprentissage profond, a connu un essor significatif dans le domaine de l'analyse d'images depuis les années 2010. Entraînés sur de larges bases de données annotées, les réseaux de neurones sont capables de détecter, classer et segmenter des zones spécifiques : leurs applications dans le domaine de l'imagerie satellite sont donc nombreuses.

3.2. L'IA comme pré-production cartographique

L'utilisation de l'IA pour une pré-production cartographique a pour but d'identifier et de détourner les objets d'intérêt sur des images satellite. Cette phase préliminaire permet la production de couches d'appui. L'intégration dans une production des objets issus de l'IA peut être directe ou indirecte, ainsi les objets sont des objets de référence pouvant être totalement ou partiellement intégrés dans la production en fonction du contexte. La qualité de la pré-production ainsi que les exigences spécifiques au produit final conditionnent l'orientation d'utilisation des couches d'appui et donc de ce type de pré-production.

Pour réaliser cette pré-production, l'IA est utilisée pour deux tâches spécifiques : la **segmentation sémantique** et la **segmentation d'instance**. La segmentation sémantique a pour but d'associer à chaque pixel d'une image un même label correspondant à une classe. Par exemple, le label "1" est associé à tous les objets de la classe "bâtiment". La segmentation d'instance attribue un label unique à chaque occurrence d'une même classe. En reprenant l'exemple précédent, chaque bâtiment se verrait attribuer un label différent, permettant leur distinction mutuelle ainsi que leur différenciation par rapport aux autres classes (utile dans un environnement urbain dense).

3.3. Framework IA

Le framework IA développé pour l'aide à la production cartographique s'articule autour de trois modules : la création de bases de données d'apprentissage, l'entraînement des modèles IA et l'inférence sur les données à traiter avec le modèle retenu (Figure 16).

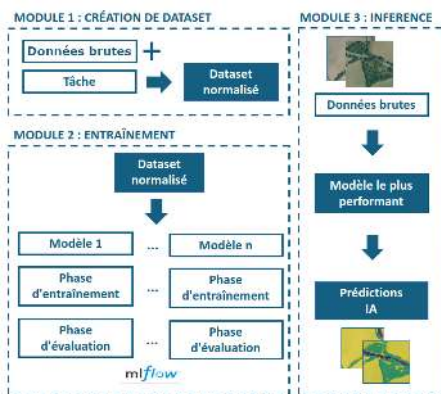


FIGURE 16 – Schéma du framework IA développé - GEOFIT.

Le premier module permet de créer un jeu de données adapté à l'entraînement supervisé d'un modèle d'apprentissage profond, indépendamment de son architecture et de la tâche requise (segmentation sémantique ou segmentation d'instance). Il est également indépendant du format des données d'entrée, pour les images ou leur vérité terrain.

Le second module est un module de suivi et de comparaison des entraînements permettant de sélectionner le meilleur modèle et ses hyper-paramètres optimaux pour la tâche à effectuer. Ce module s'appuie sur **MLflow (Zaharia et al. (2018))**, une plateforme de MLOps mettant en place une base de données des modèles entraînés et de l'ensemble des métriques utilisées pendant les entraînements.

Différentes métriques sont utilisées lors de l'apprentissage d'un modèle. Durant l'entraînement, une **métrique de coût (loss)**, calculée à chaque époque sur les données d'apprentissage, quantifie l'écart entre les prédictions du modèle et la vérité terrain, permettant d'adapter continuellement les poids du modèle (Figure 17).

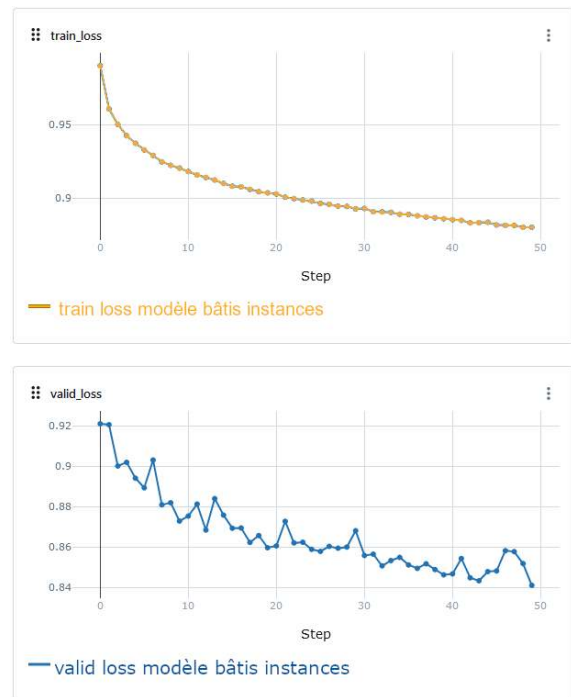


FIGURE 17 – Fonction de coût (loss) sur les données d'entraînement et de validation enregistrée par MLflow.

En phase de test, la métrique *Intersection over Union (IoU)* est calculée pour évaluer les performances du modèle sur de nouvelles données. Elle met en correspondance la zone prédite par le modèle et la zone réelle de l'objet, en calculant le rapport entre la zone d'intersection et la zone d'union de la prédiction et la vérité terrain (Figure 18).

Le dernier module permet d'exploiter le modèle choisi pour réaliser des détections IA de manière simple et robuste. Pour traiter efficacement les images satellites sur la carte graphique des serveurs de calcul, celles-ci sont découpées en tuiles régulières (*i*). Un recouvrement est

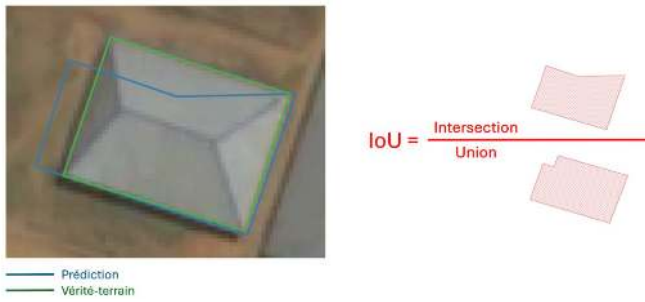


FIGURE 18 – Schéma de la métrique IoU.

utilisé entre les tuiles de manière à maximiser la probabilité qu'un objet se trouve au centre de celle-ci. En effet, un objet centré a plus de contexte et est donc plus facile à prédire pour le modèle.

Pour agréger les différentes prédictions sur un même objet, un système de vote majoritaire, privilégiant les prédictions des tuiles où l'objet est centré, est mis en place (ii). Le résultat est une image de même taille que l'image traitée en entrée avec une valeur de prédiction par pixel (iii) (Figure 19).

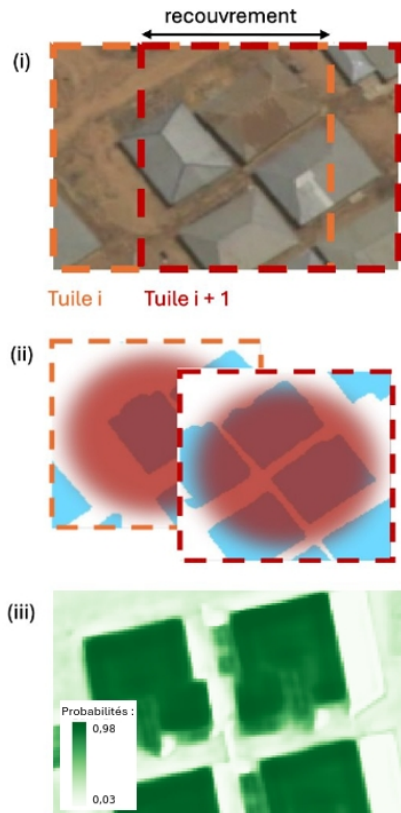


FIGURE 19 – Schéma du système de vote majoritaire.

3.4. Modèles utilisés

La production des couches d'appui fait référence à deux architectures de l'état de l'art : **U-Net** (segmentation sémantique) et **MaskRCNN** (segmentation d'instance). Ces architectures de réseaux de neurones ont toutes les deux fait leurs preuves pour leurs tâches respectives dans divers domaines d'applications (par exemple : **Yu et al. (2019)**, **Vuola et al. (2019)**, **Cao et al. (2023)**, **Hou et al. (2021)**).

U-Net est un réseau de neurones convolutifs développé par **Ronneberger et al. (2015)** pour la classification et la segmentation sémantique. Son architecture en forme de "U" présente les composantes principales suivantes (Figure 20) :

- L'encodeur, qui a pour but d'extraire les informations utiles de l'image de manière condensée à plusieurs échelles spatiales.
- Le décodeur, qui extrait des données condensées par l'encodeur. Il s'agit des informations les plus pertinentes pour construire une couche de "caractéristiques" (*feature maps*) de résolution équivalente à l'image à traiter. Cette couche sera utilisée par la "tête de segmentation" (*segmentation head*) du réseau pour effectuer la segmentation sémantique.
- Les connexions directes, qui transfèrent les informations de l'encodeur au décodeur. Elles comprennent les détails spatiaux souvent perdus lors des opérations de *pooling* (couche permettant de sous-échantillonner l'image pour réduire sa dimension).

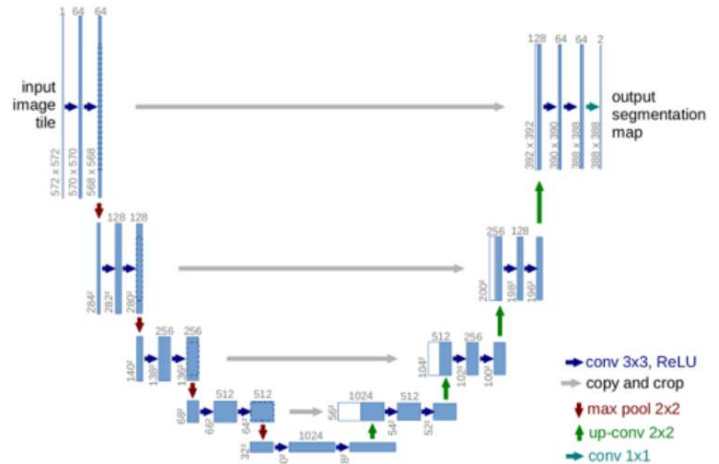


FIGURE 20 – Schéma de l'architecture du réseau U-Net.

MaskRCNN est un modèle de segmentation d'instance proposé par **He et al. (2017)**. Ces composantes principales sont les suivantes (Figure 21) :

- Une *backbone* permettant d'extraire les caractéristiques de l'image pour construire des *feature maps*, jouant un rôle similaire à l'encodeur de U-Net ;
- Les composantes RPN (*Region Proposal Network*) et RoI Align (*Region of Interest Alignment*), dont le but est de proposer plusieurs régions, formes et tailles pouvant contenir des objets d'intérêt à partir des *feature maps* ;
- La composante de détection d'objet, dont le rôle est de prédire, pour chaque RoI, la catégorie de l'objet contenu ainsi que les coordonnées de sa boîte englobante ;
- La composante de détection d'instance, qui ajoute une branche de segmentation générant un masque binaire pour chaque région d'intérêt. Ce masque indique quels pixels, à l'intérieur de la région d'in-

térêt, appartiennent à l'objet à détecter.

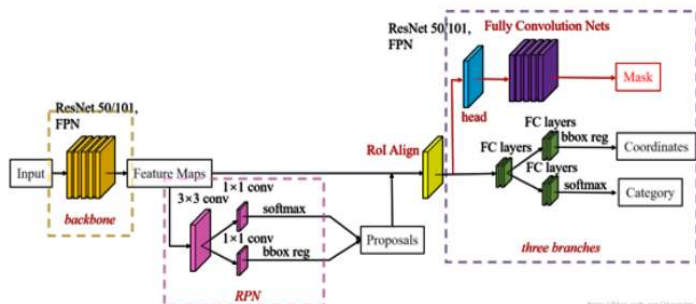


FIGURE 21 – Schéma de l'architecture du réseau MaskRCNN.

3.5. L'apport des Pléiades NEO pour l'IA

L'objectif est d'étudier les améliorations potentielles des pré-productions cartographiques IA liées à l'utilisation d'images PNEO par rapport aux images PHR.

En premier lieu, les résultats d'étude interne montrent qu'il existe des améliorations directes lors de prédictions réalisées avec des modèles historiquement entraînés sur des images PHR sur de nouvelles images PNEO. Des analyses numériques et "à dire d'experts" ont été conduites pour mettre en évidence ce gain de performance sur les classes d'objets suivantes : bâtiments (cf. Section §3.5.2) et réseaux routiers (cf. Section §3.5.3).

Pour aller plus loin, nous présentons quelques résultats d'études internes provenant de l'utilisation de nouveaux modèles utilisant différentes stratégies d'entraînement sur des données hybrides PHR - PNEO (cf. Section §3.6). Ces études se concentrent sur la tâche de segmentation sémantique pour les thématiques du "bâti" et des "routes" sur des zones urbaines.

3.5.1. Données utilisées

Les mêmes modèles IA entraînés sur des données PHR ont été appliqués sur des couples d'images PHR / PNEO. Les données utilisées sont décrites dans le tableau 1.

Paysage	Date PHR	Date PNEO
Résidentiel et industriel	06/02/2024	04/10/2023
Résidentiel	06/10/2023	04/10/2023
Résidentiel et industriel	06/10/2023	04/10/2023
Désertique	10/01/2024	19/01/2022

TABLEAU 1 – Dates des images PHR et NEO en fonction des thématiques d'étude.

Les trois premiers échantillons sont issus d'images d'une capitale dans la corne de l'Afrique avec différents niveaux de densité urbaine. Leurs caractéristiques sont les suivantes : **zone 1** : 6.8 km² pour 15500 bâtiments et 900 routes, **zone 2** : 0.16km² pour 2000 bâtiments et 34 routes, **zone 3** : 1.5 km² pour 8000 bâtiments et 310

routes. Le dernier échantillon (**zone 4**) est une zone désertique de 1 km² dans l'ouest de l'Afrique avec des objets épars et peu nombreux (moins de 10 routes et structures) (Figure 22). Afin d'évaluer la qualité des prédictions IA, une vérité terrain vecteur issue d'une production manuelle GEOFIT (réalisée pour cette communication) a été utilisée. L'étude porte sur les thématiques "bâti" et "réseau routier".



FIGURE 22 – Extrait des 4 zones Pléiades 50 cm (PHR).

3.5.2. Thématique bâti

Pour la thématique "bâti", une analyse automatique des prédictions IA sur images PHR / PNEO a été mise en place. Il s'agit d'un calcul d'IoU entre les objets bâtis issus de la vérité terrain et ceux prédits par les modèles IA. Le résultat de ce calcul est une couche vecteur contenant le score IoU pour chaque bâti de la vérité terrain. Par exemple, si un bâti a été omis par le modèle, le score IoU sera nul. Comme la figure 23 l'illustre sur les prédictions IA sur les petits bâtiments, le nombre d'omissions sur l'image PNEO est inférieur à ce qui peut être relevé sur l'image PHR. Cette analyse automatique montre que les images PNEO permettent d'obtenir systématiquement de meilleurs résultats pour la thématique "bâti".

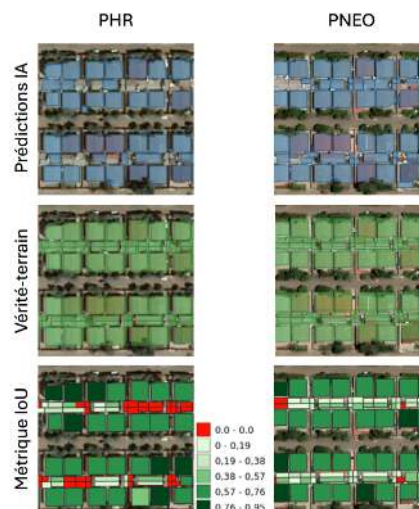


FIGURE 23 – Exemple de comparaison automatique avec la métrique IoU sur un échantillon de la zone 3

Le tableau 2 reporte les gains sur le score d'IoU moyen par zone et sur le taux d'omissions des prédictions PNEO par rapport aux prédictions PHR. La zone 4 n'a pas été traitée automatiquement, car les vecteurs de vérité terrain sont des ponctuels et non des polygones.

Zone	Mean IoU (%)	Omission (%)
Zone 1	+13	-20
Zone 2	+12	-28
Zone 3	+8	-34

TABLEAU 2 – Gains sur l'IoU moyenne et sur le taux d'omissions des prédictions sur images PNEO par rapport à PHR.

Pour compléter cette évaluation automatique, une analyse "à dire d'experts" a été réalisée pour mettre en évidence les différences entre les prédictions issues d'images PHR et PNEO. La figure 24 montre que l'utilisation d'images PNEO permet une meilleure individualisation des bâtiments dans un contexte urbain dense (cf. Figure 24, colonne (1)) ainsi que de limiter les omissions cf. Figure 24, colonne (2).

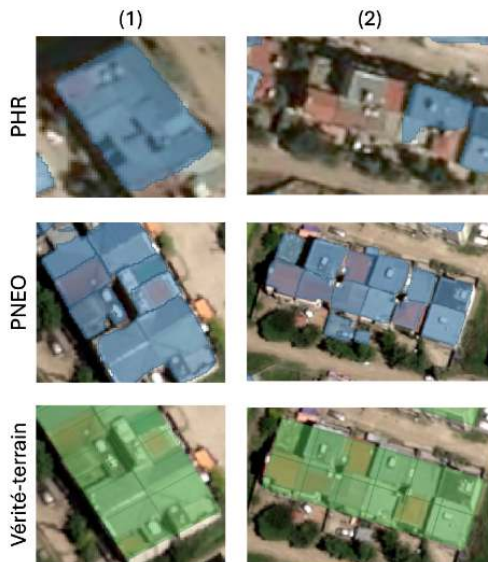


FIGURE 24 – Exemples de prédictions de bâtis sur images PHR et PNEO.

Cependant, de fausses détections sont relevées sur les camions et les rochers (Figure 25).



FIGURE 25 – Exemples de fausses détections bâtis sur PNEO.

Une de nos hypothèses, expliquant cette confusion, est relative au fait que les modèles utilisés pour faire les prédictions sur les images PNEO ont été entraînés uniquement sur des images PHR.

Ainsi, des camions ou des rochers, à une résolution de 30 cm, apparaissent similaires à des bâtiments à une résolution de 50 cm pour le modèle.

3.5.3. Thématique réseau routier

Pour la thématique réseau routier, seule une analyse "à dire d'experts" a été menée pour qualifier les prédictions IA issues des images PHR et PNEO. La Figure 26 montre que dans un contexte urbain, avec un quadrillage régulier, les prédictions du réseau routier sur les deux types d'images sont similaires.



FIGURE 26 – Exemple de prédictions du réseau routier (bleu) sur PHR / PNEO avec vérité terrain (rouge).

Cependant, les images PNEO permettent d'identifier des chemins carrossables non-visibles sur des images PHR, notamment dans des zones moins densément peuplées (Figure 27). C'est tout particulièrement le cas pour la zone 4 de l'expérience concernant une zone désertique où les chemins se confondent dans la végétation et le paysage.

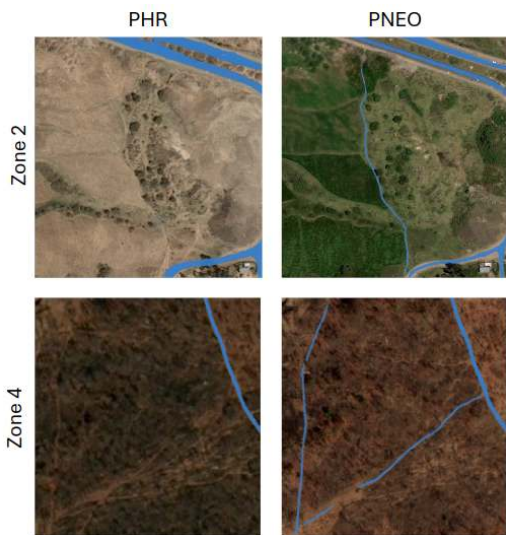


FIGURE 27 – Identification des chemins carrossables sur les images PNEO.

3.6. Entraînements sur des données PNEO

L'objectif est d'explorer les modes d'adaptation des modèles IA entraînés sur des images PHR afin qu'ils puissent être performants sur des images PNEO. Les défis identifiés proviennent des différences entre les images PHR et PNEO qui sont listés ci-après :

- Différence de **résolution spatiale** : Les images PHR ont une résolution de 50 cm, contre 30 cm pour les images PNEO. La résolution plus élevée des images PNEO révèle des détails supplémentaires qui ne sont pas visibles sur les images PHR. De plus, la différence de résolution provoque une différence de taille apparente des objets. Par exemple, un camion sur une image PNEO aura une taille apparente similaire à celle d'un bâtiment sur une image PHR.
- Différence de **colorimétrie** : les bandes spectrales et les processus de pré-traitement peuvent différer entre les deux systèmes.
- Différence de **qualité** : les données PNEO présentent une meilleure qualité en termes de rapport signal/bruit et donc moins d'artefacts que les données PHR.

Ces différences entre images PHR et PNEO peuvent affecter les performances d'un modèle IA entraîné exclusivement sur des données PHR. Quatre stratégies d'adaptation sont explorées :

- La première stratégie (**stratégie 1**) consiste en une **utilisation directe** (*zero-shot learning*) des modèles PHR sur les images PNEO. L'idée est d'utiliser la capacité de généralisation de ces modèles : si les caractéristiques apprises durant leurs entraînements sont suffisamment générales et robustes, ils seront capables de généraliser leur apprentissage à des images PNEO. Il s'agit de la stratégie utilisée pour les comparaisons exposées dans

la section 3.5.2.

- La deuxième stratégie envisagée (**stratégie 2**) est aussi une **utilisation directe** des modèles PHR, mais en effectuant au préalable un **pré-traitement** sur les images PNEO pour réduire leur résolution spatiale à celle des images PHR. Ainsi, les objets présents sur les images PNEO sous-échantillonnées auront des caractéristiques et tailles similaires aux objets présents sur les images PHR utilisées lors de l'entraînement des modèles.

- La troisième stratégie (**stratégie 3**) utilise un **ré-entraînement** des modèles PHR sur des images PNEO en utilisant une approche d'**apprentissage par transfert** (Yosinski et al. (2014)). Cette technique consiste à utiliser un modèle pré-entraîné (ici, les modèles PHR) comme base pour l'entraînement d'un nouveau modèle sur de nouvelles données (ici, les images PNEO). L'avantage de cette méthode est de faire bénéficier au nouveau modèle des connaissances acquises par le modèle précédent. Cela permet de réduire le temps et les coûts d'entraînement, car moins d'images PNEO annotées seront nécessaires pour que le nouveau modèle converge.

- Enfin, la dernière stratégie (**stratégie 4**) envisagée consiste en un **ré-entraînement complet** de nouveaux modèles sur une base d'apprentissage hybride composée d'images PHR (38 000 images) et PNEO (20 000 images).

3.7. Résultats obtenus pour les différentes stratégies

Afin de comparer les performances des modèles issues des différentes stratégies sur les quatre zones de l'étude, les métriques **Intersection-over-Union** (IoU), **rappel** (*recall*) et **précision** (*precision*) ont été calculées sur chaque prédiction.

- La métrique IoU est définie dans la section §3.3.
- La précision mesure la proportion des prédictions positives correctes par rapport à l'ensemble des prédictions du modèle.
- Le rappel mesure la proportion de vrais positifs qui ont été correctement identifiés par le modèle par rapport au nombre d'éléments positifs dans la vérité terrain.

L'ensemble de ces métriques est calculé sur des images PNEO issues des trois zones urbaines décrites précédemment au regard d'une vérité terrain issue de productions cartographiques par photo-interprétation.

Le tableau 3 présente ces métriques moyennées sur l'ensemble des zones pour chacune des stratégies pour la segmentation des bâtiments. Le tableau 4 contient les mêmes métriques calculées sur les routes. La Figure 28 illustre les résultats pour chacune des stratégies pour les PHR et les PNEO.



FIGURE 28 – Comparaison des prédictions des modèles en fonction de la stratégie 1 à 4. À gauche, prédictions sur les bâtiments de la zone 1. À droite, sur les routes de la zone 2.

Stratégie	mIoU	mRec.	mPrec.
Stratégie 1	0.730	0.785	0.912
Stratégie 2	0.736	0.797	0.907
Stratégie 3	0.843	0.917	0.912
Stratégie 4	0.856	0.926	0.919

TABLEAU 3 – Bâtiments : Métriques moyennées pour toutes les zones par stratégies

Stratégie	mIoU	mRec.	mPrec.
Stratégie 1	0.491	0.516	0.912
Stratégie 2	0.493	0.521	0.912
Stratégie 3	0.316	0.333	0.854
Stratégie 4	0.514	0.537	0.921

TABLEAU 4 – Réseau Routier : Métriques moyennées pour toutes les zones par stratégies

- La **stratégie 1** constitue notre modèle "baseline" à comparer aux nouveaux entraînements utilisant les données PNEO. Il correspond à un modèle similaire à celui employé dans les comparaisons précédentes ayant appris uniquement sur PHR (pour plus de détails, se référer aux analyses numériques et "à dire d'experts" en 3.5.2 et 3.5.3). Cette stratégie semble directement fournir des prédictions "acceptables" pour les bâtiments et "moyennes" pour les routes.

- Le sous-échantillonnage (**stratégie 2**) semble produire des résultats avec des bâtiments plus complets (cf. Figure 28) ce qui améliore le rappel. Cependant, il existe encore des confusions importantes avec des objets plus petits, comme décrit dans la section précédente. Il semble même que la perte de résolution diminue légèrement la précision globale du modèle pour les bâtiments.

- L'apprentissage par transfert (**stratégie 3**) améliore nettement les prédictions pour les modèles spécialisés sur le bâti, mais dégrade les performances pour les routes.

De nombreuses routes de petite et moyenne taille semblent manquer, ce qui diminue fortement le rappel. Une hypothèse pourrait être que les caractéristiques des routes dans les deux images sont trop éloignées du fait d'une prise de vue à une période différente (voir tableau 1).

- L'apprentissage avec une base de données contenant des données des deux types (**stratégie 4**) amène des résultats nettement meilleurs sur l'ensemble des trois métriques évaluées. C'est particulièrement le cas pour les routes qui sont bien mieux détectées et où de plus petits chemins sont moins omis. Pour le bâti, les segmentations sont un peu mieux délimitées si on les compare à celles obtenues avec les modèles par transfert, ce qui améliore légèrement la précision.

Pour conclure, **la stratégie 4 semble être la plus performante**, elle produit les résultats les plus précis surtout pour la segmentation des bâtiments. **L'apprentissage avec un jeu de données hybrides** exploite au mieux les données issues du capteur PNEO. Les images des deux sources sont suffisamment proches pour permettre l'apprentissage de modèles de segmentation efficaces sur des images de plus haute résolution. La quantité de données PHR associées à des images de meilleure qualité et résolution permet d'obtenir le meilleur modèle de cette étude.

3.8. Limites et perspectives

Les résultats montrent un très bon transfert des modèles entraînés sur des données PHR lors des prédictions sur des données PNEO. Les caractéristiques des images provenant des deux sources semblent également suffisamment proches pour être utilisées lors d'un apprentissage avec des données mixtes. Cependant, la quantité de données PNEO étant moins élevée, il est très probable que le modèle ainsi conçu favorise légèrement les prédictions sur les images PHR.

Une analyse complémentaire pourrait mettre en évidence ces disparités, il s'agirait de comparer, de nouveau, les deux types d'images avec un nouveau modèle exclusivement entraîné sur des images PNEO (avec une taille du jeu de données similaire).

De plus, la résolution spatiale de PNEO, plus fine, permet d'envisager des modèles de plus en plus performants en exploitant au mieux les caractéristiques multi-échelles dans les images. Ces modèles permettront de mieux répondre aux enjeux de la production cartographique, tout particulièrement par rapport à la grande diversité de domaines et de spécifications.

Plusieurs pistes peuvent être envisagées comme l'apprentissage par transfert ou la création d'un "modèle fondation" (ex : **Oquab et al. (2024)**). Voir la définition dans le rapport "AI Foundation Models" : "Initial Report" de **CMA (2022)** dédié à la cartographie entraînée sur une grande quantité de données diverses avec des méthodes d'auto-supervision (**He et al. (2022)**, **Caron et al. (2021)**). Il pourrait ensuite être adapté à des tâches spécifiques en fonction des besoins de production. Une autre possibilité serait des modèles multi-modaux utilisant différentes sources de données ou permettant une plus grande adaptabilité à de nouveaux domaines ou nouvelles tâches (**Kirillov et al. (2023)**).

4. Conclusion

Le passage des images Pléiades à 50 cm de résolution vers des images PNEO à 30 cm de résolution dans notre processus de production présente des avantages et des inconvénients que nous avons pu aborder à travers un focus sur la photo-interprétation et le regard du photo-interprète.

L'interprétation des images est plus simple, avec une meilleure identification des objets et une réduction des incertitudes. Cependant, l'extraction des données devient plus complexe et demande plus de temps, en raison de la nécessité de respecter les détails et de réajuster les mesures.

L'enjeu est de trouver un équilibre entre ces aspects, tout en abordant l'impact de cette évolution sur les modèles d'apprentissage et les prédictions en IA qui viennent alimenter nos productions. Les études et évaluations menées nous ont permis de mieux cerner les gains de performance et l'impact de l'utilisation de résolutions plus fines sur notre framework IA.

- **Dans un premier temps**, la comparaison directe de paires d'images PHR/PNEO a été effectuée en utilisant un modèle préexistant. En analysant la précision de ce modèle au regard d'une production cartographique manuelle, un gain de performance significatif a été observé sur les images PNEO (+11% pour l'IoU moyenne et -27% d'omissions).

- **Dans un second temps**, une évaluation de nouveaux modèles entraînés à l'aide des images PNEO a été réalisée. Son objectif était de déterminer si un apprentissage conjoint avec des données historiques PHR

permettrait un gain de performance. Trois stratégies ont été comparées au modèle "baseline" historique : sous-échantillonnage, apprentissage par transfert et ré-entraînement hybride. C'est cette dernière approche qui a produit le modèle le plus précis sur des données PNEO.

En tant que producteur de données vecteur, GEOFIT a adapté ses chaînes de production pour répondre à l'opportunité d'avoir des images satellite de résolution plus fine sur ses chantiers.

Une adaptation et de nouveaux procédés de saisie ont permis aux photo-interprètes de gagner en expertise tout en étant toujours conforme à la cible du standard vecteur produit.

Il s'agit d'une évolution majeure qui pourrait encore apporter de nouvelles opportunités tant pour la photo-interprétation que pour le(s) Framework(s) IA de GEOFIT notamment (i) avec les nouveaux canaux (Deep blue et Red edge) qui ne sont pas encore exploités, mais qui pourraient avoir de sérieux avantages notamment en gain de production dans certaines zones géographiques, mais également (ii) avec l'implémentation et la collecte itérative d'images PNEO pour les bases d'apprentissage qui permettront de rendre des prédictions de plus en plus précises et exploitables dans nos productions.

Remerciements

L'équipe GEOFIT remercie Airbus Defence and Space pour la fourniture des images qui ont permis de réaliser cet article. Crédits :

- Images Pléiades (PHR) : Copyright © CNES, 2023-2024, Distribution Airbus DS.
- Images Pléiades Neo (PNEO) : Copyright © Airbus DS, 2022-2024, Distribution Airbus DS.

Références

- Cao, H., Wang, Y., Chen, J., Jiang, D., Zhang, X., Tian, Q., and Wang, M. (2023). Swin-unet : Unet-like pure transformer for medical image segmentation. In Karlinsky, L., Michaeli, T., and Nishino, K., editors, *Computer Vision – ECCV 2022 Workshops*, pages 205–218, Cham. Springer Nature Switzerland.
- Caron, M., Touvron, H., Misra, I., Jegou, H., Mairal, J., Bojanowski, P., and Joulin, A. (2021). Emerging properties in self-supervised vision transformers. In *2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pages 9630–9640.
- CMA (2022). Ai foundation models : Initial report. Competition and Markets Authority (UK). URL https://assets.publishing.service.gov.uk/media/65081d3aa41-cc300145612c0/Full_report_.pdf.
- Defence Geospatial Information Working Group (DGIWG 262) (2021). Multinational geospatial co-production program urban vector data (muvd) metadata specification. Technical report. URL <https://portal.dgiwg.org/files/72193>.
- He, K., Chen, X., Xie, S., Li, Y., Dollár, P., and Girshick, R. (2022). Masked autoencoders are scalable vision learners. In *2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 15979–15988.

- He, K., Gkioxari, G., Dollár, P., and Girshick, R. (2017). Mask r-cnn. In *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*.
- Hou, Y., Liu, Z., Zhang, T., and Li, Y. (2021). C-unet : Complement unet for remote sensing road extraction. *Sensors*, 21(6).
- Kirillov, A., Mintun, E., Ravi, N., Mao, H., Rolland, C., Gustafson, L., Xiao, T., Whitehead, S., Berg, A. C., Lo, W.-Y., Dollár, P., and Girshick, R. (2023). Segment anything. In *2023 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pages 3992–4003.
- Oquab, M., Darcet, T., Moutakanni, T., Vo, H. V., Szafraniec, M., Khalidov, V., Fernandez, P., HAZIZA, D., Massa, F., El-Nouby, A., Assran, M., Ballas, N., Galuba, W., Howes, R., Huang, P.-Y., Li, S.-W., Misra, I., Rabbat, M., Sharma, V., Synnaeve, G., Xu, H., Jegou, H., Mairal, J., Labatut, P., Joulin, A., and Bojanowski, P. (2024). DINOv2 : Learning robust visual features without supervision. *Transactions on Machine Learning Research*.
- Poilvé, H., Bonfort, T., Varoquaux, V., and Elin, C. (2022). Model-based dehazing for optimised image display and analysis ready data. In *VHR-RODA 2022, ESRIN*.
- Ronneberger, O., Fischer, P., and Brox, T. (2015). U-net : Convolutional networks for biomedical image segmentation. In Navab, N., Hornegger, J., Wells, W. M., and Frangi, A. F., editors, *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015*, pages 234–241, Cham. Springer International Publishing.
- Vuola, A. O., Akram, S. U., and Kannala, J. (2019). Mask-rcnn and u-net ensembled for nuclei segmentation. In *2019 IEEE 16th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI 2019)*, pages 208–212.
- Yosinski, J., Clune, J., Bengio, Y., and Lipson, H. (2014). How transferable are features in deep neural networks? In *Proceedings of the 28th International Conference on Neural Information Processing Systems - Volume 2*.
- Yu, Y., Zhang, K., Yang, L., and Zhang, D. (2019). Fruit detection for strawberry harvesting robot in non-structural environment based on mask-rcnn. *Computers and Electronics in Agriculture*, 163 :104846.
- Zaharia, M., Chen, A., Davidson, A., Ghodsi, A., Hong, S. A., Konwinski, A., Murching, S., Nykodym, T., Ogilvie, P., Parkhe, M., et al. (2018). Accelerating the machine learning lifecycle with mlflow. *IEEE Data Eng. Bull.*, 41(4) :39–45.

**CARTOGRAPHIE DU RECOUVREMENT CORALLIEN
PAR IMAGERIE SATELLITE À TRÈS HAUTE RÉOLUTION
APPLICATION AUX DONNÉES SENTINEL-2, SPOT6/7, PLÉIADES ET PLÉIADES NEO
SUR LES RÉCIFS DE LA RÉUNION**

Pascal Mouquet¹, Marieke Schultz^{1,2}, Christophe Revillion¹, Pascale Cuet³, Gwenaëlle Pennober¹

1 : UMR Espace-Dev / IRD / Université de La Réunion, France

2 : AgroParisTech / Université de Montpellier, France

3 : UMR Entropie / Université de La Réunion, France

Résumé

Par leur situation géographique le long des côtes, les récifs coralliens forment une barrière naturelle vivante atténuant l'énergie des vagues entrantes, protégeant les écosystèmes côtiers et les populations humaines des risques de submersion, d'inondation et d'érosion. Ces récifs font face à des pressions et perturbations croissantes, conduisant à des épisodes de mortalités des coraux qui les constituent et à une dégradation de leur état à l'échelle mondiale. Le pourcentage de couverture corallienne vivante est l'indicateur le plus communément utilisé pour évaluer l'état de santé des récifs coralliens. Les données de télédétection, notamment aériennes hyperspectrales ont depuis longtemps été mobilisées à La Réunion et ont montré leur efficacité pour ces suivis. Il s'agit de données coûteuses donc peu reproductibles et peu exploitables comme outil de gestion. Cet article montre l'apport de la donnée multispectrale satellite pour établir le suivi des récifs, notamment avec l'essor de la Très Haute Résolution Spatiale. Nous testons ici la capacité de différents indices spectraux calculés sur quatre types d'images satellites multispectrales (Sentinel-2, SPOT6/7, Pléiades et Pléiades Neo) à détecter les couvertures coralliennes vivantes des récifs coralliens. L'île de La Réunion est utilisée comme cas d'étude et grâce à des données de référence historiques et in-situ nous mettons en évidence que :

- (1) Les images satellites peuvent détecter les coraux vivants grâce à un indice de brillance combinant les bandes spectrales bleue et verte ($R^2 > 0,63$ sur les données historiques).
- (2) L'image du nouveau satellite Pléiades Neo, offrant des résolutions plus fines et comprenant une bande spectrale dans le bleu profond, permet une meilleure estimation du recouvrement corallien grâce à l'indice de brillance combinant cette bande et la bande bleue ($R^2 = 0,61$ sur les données in-situ).

La méthode développée appliquée au couple indice-image le plus performant a permis de générer une carte actualisée des couvertures coralliennes à haute résolution de l'ensemble de la plateforme récifale de l'Hermitage à La Réunion.

Mots-clés : télédétection multispectrale, cartographie récifale, couverture corallienne, indice de brillance, littoral

Abstract

By their location along the coasts, coral reefs form a living natural barrier attenuating the energy of incoming waves, protecting coastal ecosystems and human populations from the risks of submersion, flooding and erosion. These reefs are facing increasing pressures and disturbances, leading to episodes of mortality of the corals constituting them and a deterioration of their status on a global scale. To monitor this state of health, remote sensing data, particularly aerial hyperspectral data, have long been used in Reunion Island and have shown their effectiveness. This data is expensive and therefore not very usable as management tools. This article shows the contribution of multispectral satellite data to monitor reefs, particularly with the rise of Very High Spatial Resolution. Here we test the ability of different spectral indices calculated on four types of multispectral satellite images (Sentinel-2, SPOT 6/7, Pléiades and Pléiades Neo) to detect living coral covers of coral reefs. We use Reunion as a case study. Thanks to historical and in-situ reference data we highlight that:

- (1) Satellite images can detect living corals using the Brightness Index combining the Blue and Green spectral bands ($R^2 > 0.63$ on historical data).*
- (2) The image from the new Pléiades Neo satellite, offering finer resolutions and including a Deep Blue spectral band, allows better detection of corals using the Brightness Index combining this band and Blue band ($R^2 = 0.61$ on in-situ data).*

The developed method applied to the most efficient index-image pair made it possible to generate an updated map of high-resolution coral covers of the entire Hermitage reef platform in Reunion.

Keywords: multispectral satellite remote sensing, coral reef mapping, coral cover, Brightness index, sea shore

1. Contexte et objectifs

1.1. Introduction sur les récifs coralliens

Les récifs coralliens, véritables piliers de la biodiversité marine, ont une complexité et une importance écologique remarquables. Bien qu'ils se développent dans des eaux tropicales oligotrophes, ces écosystèmes sont parmi les plus productifs et les plus diversifiés au monde (Rougerie et al., 1992 ; Birkeland, 1997). En dépit de leur environnement apparemment peu propice à la vie, les récifs coralliens abritent de nombreuses espèces et offrent de nombreux services écosystémiques avec un rôle crucial dans l'équilibre écologique, la production et la protection du littoral (Moberg & Folke, 1999). Ces édifices représentent avec les forêts tropicales les habitats les plus riches en biodiversité de la planète, abritant des milliers d'espèces animales qui y trouvent nourriture, refuge, protection et abri (Urbina-Barreto et al., 2021). Leur structure complexe, composée principalement de coraux durs (ordre des Scléractiniaires) et d'algues calcifiantes (famille des Corallinacées), contribue non seulement à la biodiversité marine mais aussi à la production de matériaux carbonatés pour les plages, à la dissipation de l'énergie des vagues, procurent des niches écologiques à de nombreuses espèces d'algues, d'herbiers, et de poissons, qui y trouvent nourriture et protection (Allemand et al., 2011 ; Eyre et al., 2014). En France, la valeur économique des services rendus par les récifs coralliens et écosystèmes associés est estimée à 1,3 milliard d'euros par an. Les principaux services identifiés sont le tourisme bleu (315 M€/an), la pêche récifale (commerciale et d'autoconsommation pour 215 M€/an), la séquestration du carbone par les mangroves et herbiers (175 M€/an) et surtout la protection côtière (près de 600 M€/an) (Pascal et al., 2016).

Proche du rivage, les récifs coralliens jouent en effet un rôle de protection et de formation du littoral. Leur structure tridimensionnelle et leur rugosité permettent de diminuer la taille et la vitesse des vagues en provenance de l'océan ouvert, ce qui réduit l'énergie à la côte jusqu'à 97 % (Rogers et al., 2013 ; Ferrario et al., 2014). En moyenne, 90 % de l'énergie incidente est atténuée entre la crête récifale et l'arrière-récif avec des fluctuations liées à la phase de marée : entre 77 et 94 % à marée basse et entre 68 et 85 % à marée haute (Bruch et al., 2022 ; Machabee, 2024).

En réfractant et diffractant la houle, la morphologie du récif contrôle le sens de circulation des courants intra-récifaux (Roberts, 2004). Bien qu'atténuées, les vagues de tempête contrôlent la production et le transport des sédiments dans l'arrière-récif. Lorsqu'elles déferlent sur le récif, elles arrachent des fragments de coraux qu'elles transportent vers et dans l'arrière récif. La barrière récifale agit aussi comme un filtre naturel, retenant les particules produites sur et à proximité du rivage (Bellwood, 1995 ; Elliff & Silva, 2017 ; Mahabot et al., 2017 ; Lange et al., 2020).

Dans un contexte de changement climatique (CC), avec une élévation des niveaux marins et une augmentation des risques d'inondation sur les littoraux, les récifs coralliens jouent un rôle bénéfique pour les biens et les populations, en réduisant les coûts liés aux inondations d'un facteur 2 à 3. Il a été estimé que l'absence de récifs coralliens conduirait à travers le monde à une augmentation de plus de 90% des coûts des dommages liés aux inondations lors des tempêtes pour atteindre 272 Md\$ au cours des 100 prochaines années (Beck et al. 2018).

Hauts lieux du tourisme et des usages balnéaires, les littoraux récifaux sont soumis à de fortes pressions anthropiques du fait des changements globaux et des aménités qu'ils offrent (Lemahieu et al., 2013). Ils font ainsi face à des pressions et perturbations croissantes, conduisant à une dégradation de leur état à l'échelle mondiale, comme par exemple les épisodes de blanchissement corallien de plus en plus fréquents et sévères (Hugues et al., 2018 ; Virgen-Urcelay & Donner, 2023). Les pressions anthropiques accroissent leur vulnérabilité face aux forçages environnementaux, eux-mêmes voués à s'intensifier avec les changements climatiques et l'intensification des épisodes cycloniques qu'ils engendrent (Good & Bahr, 2021). Parmi ces pressions, l'acidification des océans, l'élévation du niveau et de la température de la mer en lien avec le réchauffement climatique, la pollution de l'eau, la pêche et le tourisme (Andrello et al., 2022 ; Elliff & Silva, 2017), affectent la croissance des récifs, en provoquant des mortalités massives liées à des épisodes de blanchissement ou à la propagation de maladies, ou encore la diminution des taux de précipitation du carbonate de calcium par les organismes calcifiants et l'augmentation des taux de dissolution des substrats récifaux (sable, débris, etc.) (Eyre et al., 2014 ; Hoegh-Guldberg et al., 2017 ; Cornwall et al., 2021). Ainsi, le maintien des capacités des récifs coralliens à protéger le littoral dans un contexte de CC et d'intensification des aléas extrêmes, même s'il reste encore mal connu, semble actuellement mis à mal (Perry et al., 2018 ; Moberg et al., 2021 ; Price et al., 2021). Il apparaît donc comme essentiel d'identifier des méthodes fiables permettant des suivis dans le temps et l'espace de l'état de santé de ces écosystèmes, avec comme objectif de mieux prévoir l'évolution de leur fonction de protection face aux forçages environnementaux qui s'intensifient.

1.2. La télédétection récifale et contexte réunionnais

Les données de télédétection sont utilisées depuis de nombreuses années pour cartographier les écosystèmes terrestres et marins. Elles permettent, par des approches descriptives et fonctionnelles, de généraliser et de comparer les connaissances dans l'espace et dans le temps (Andréfouët et al., 2000). Les dispositifs de télédétection sont constitués par des capteurs actifs (lidar, acoustique) ou passifs (optique panchromatique, multispectral ou hyperspectral),

embarqués sur des vecteurs spatiaux, aéroportés, terrestres ou maritimes, et associés à des méthodes de traitement spécifiques (Bonn & Ronchon, 1992). Ils ont montré leur efficacité pour fournir diverses informations d'intérêt pour les scientifiques et gestionnaires sur la composition des récifs (étendue, couvertures benthiques, bathymétrie, rugosité), les paramètres environnementaux (température de surface de l'eau, exposition, lumière), ou encore la biodiversité, les pressions environnementales ou les services écosystémiques (Hedley et al., 2016 ; Purkis, 2018).

À La Réunion, la cartographie de la couverture corallienne vivante (CCV) par télédétection a été effectuée à plusieurs reprises par imagerie hyperspectrale (HS) acquise par capteurs aéroportés. Cette donnée offre une grande résolution spectrale et spatiale qui permet de distinguer les différents substrats, même ceux dont la signature spectrale est très proche (Mouquet & Quod, 2010).

Plusieurs campagnes d'acquisition réalisées en 2009-2010 (LITTO3D¹ / SPECTRHABENT-OI²) puis 2015 (HYSCORES³), ont permis la création d'un référentiel topo-bathymétrique continu et à haute résolution de la bande côtière de l'île, ainsi que le développement de méthodes de traitement pour produire des couches d'information sur les habitats récifaux (Ropert et al., 2016) d'un grand intérêt pour les scientifiques et gestionnaires, comme par exemple la mise en évidence des reliefs et habitats favorables à présence des tortues marines (Chambault et al., 2021). Aussi des analyses diachroniques ont permis de suivre la trajectoire et les tendances évolutives de la plateforme récifale et mettre en évidence des zones particulières où des phénomènes plus intenses se produisaient (formation et progression de langues de débris au détriment des coraux vivants) (Bajjouk et al., 2019).

Malgré la haute qualité de ces résultats, la dépendance à l'imagerie aérienne HS rend cette approche coûteuse et donc peu reproductible dans une perspective de gestion à des pas de temps pertinents. L'émergence de l'imagerie satellite multispectrale (MS) à très haute résolution laisse entrevoir l'opportunité de nouvelles opportunités de suivi régulier des récifs coralliens à moindre coût (Andréfouët & Payri, 2000 ; Hochberg & Atkinson, 2003). Différents travaux exploitant ces images obtiennent des résultats de précision pour la discrimination des substrats récifaux (coraux, algues et sable), avec différents types d'images MS à bandes larges, telles que Landsat, SPOT-HVR, ASTER (Mumby et al., 2004), Sentinel-2 (S2) (Hedley et al., 2018), IKONOS (Andréfouët et al., 2003), WorldView (Collin et al., 2012) ou Pléiades (PL) (Bajjouk et al., 2019).

¹ [Litto3D Océan Indien](#)

² [SPECTRHABENT - OI \(2009-2011\)](#)

³ [HYSCORES \(2015-2016\)](#)

1.3. Objectifs de l'étude

Dans le contexte, avec l'évolution des opportunités offertes par les images Pléiades Neo (PNEO), le but de cette étude est (1) d'évaluer les capacités des images satellites MS à détecter la CCV des récifs, (2) d'évaluer l'apport de la très haute résolution pour la détection de la CCV grâce aux images PNEO et (3) de déterminer les caractéristiques et conditions nécessaires permettant de réaliser les suivis réguliers des trajectoires des écosystèmes coralliens récifaux de La Réunion par imagerie satellite.

Pour ce faire, les données PNEO seront notamment utilisées et comparées aux autres données satellites classiques pour déterminer les gains apportés par les résolutions spatiales plus fines et la présence d'une bande spectrale supplémentaire dans le bleu ayant une bonne pénétration dans la colonne d'eau.

Des indices spectraux calculés sur les images satellites seront, dans un premier temps, comparés à des données de CCV issues du traitement d'images HS historiques (2015) faisant référence, pour déterminer les couples présentant les meilleures corrélations et les plus à même d'estimer les valeurs de recouvrements des coraux. Dans un second temps, l'indice retenu calculé sur des images nouvellement acquises (2022) sera mis en relation avec des mesures in-situ pour produire une cartographie des CCV à l'échelle de l'ensemble de la plateforme récifale de l'Hermitage. Le but de ces analyses est de fournir des données et informations scientifiques fiables pour les gestionnaires et décideurs de manière à soutenir les stratégies de gestion et donc la préservation des espaces sensibles des littoraux.

2. Méthodologie

2.1. Zone d'étude et données utilisées

2.1.1. Le récif de La Réunion

La Réunion appartient, avec l'île Maurice et l'île Rodrigues, à l'archipel des Mascareignes dans le sud-ouest de l'océan Indien. Issue d'un volcanisme de point chaud, c'est la plus jeune des trois îles, formée il y a environ 3 millions d'années avec l'émergence du Piton des Neiges aujourd'hui effondré. Le Piton de la Fournaise est le seul volcan encore actif aujourd'hui, situé à l'est de La Réunion (Deniel et al., 1992). Les récifs coralliens actuels datent d'environ 8000 ans. Ils forment une étroite bande discontinue de 25 km le long du littoral ouest de l'île, entre les communes de Saint-Paul et celle de Petite-Île au sud, et sont divisés en quatre zones principales formées des récifs frangeants de Saint-Gilles - l'Hermitage, Saint-Leu, l'Etang-Salé et Saint-Pierre. Les récifs frangeants sont accolés à la côte et séparés des terres par une Dépression d'Arrière-Récif (DAR) qui se présente sous la forme d'un chenal étroit peu profond (Montaggioli, 1976).

Le bilan des connaissances sur la biodiversité des récifs coralliens à La Réunion, bien que partiel, fait état

de plus de 2800 espèces répertoriées (Bourmaud et al., 2005). Il s'agit d'un haut lieu de la biodiversité sur l'île qui a justifié le classement de la majorité d'entre eux dans la Réserve Naturelle Marine de la Réunion (RNMR) en 2007, d'autant que les pressions anthropiques n'ont fait que progresser depuis les années 1980 avec une urbanisation et une mise en tourisme croissantes des littoraux coralliens (Lemahieu et al., 2013).

Les événements paroxysmaux, comme les anomalies de hauteurs d'eau (Hoarau et al., 2023), les vagues de chaleurs (Nicet et al., 2019) ou les cyclones, affectent naturellement les récifs mais sont modulés en intensité et occurrence par le CC. Leurs impacts sont exacerbés surtout lorsque les récifs sont soumis à des pollutions diffuses et/ou chroniques entraînant maladies ou développement algal. La vulnérabilité des récifs est donc exacerbée. Les services écosystémiques rendus par cet écosystème récifal s'en trouvent altérés (David et al., 2008) qu'ils soient d'ordre de protection des côtes ou de valeur écologique ou économique totale. D'après le comité local IFRECOR (Initiative Française pour les Récifs Coralliens), les récifs de La Réunion contribuent ainsi chaque année à hauteur de 49 millions d'euros à l'économie locale dont 12 millions de protection des côtes, 9 millions de la pêche récifale, et 28 millions de tourisme et loisir⁴.

Notre site d'étude se situe au niveau de la zone récifale de Saint-Gilles - l'Hermitage qui s'étend sur neuf kilomètres, du port de Saint-Gilles au nord à la passe de Trois-Bassins au sud. Cette section du récif est la plus étendue en surface et représente à elle seule près de 50% des récifs de La Réunion. A ce niveau, la largeur de la plateforme récifale est comprise entre 200 et 600 mètres. Elle est découpée en trois sous-unités (zonation longitudinale) : la sous-unité récifale de Saint-Gilles Nord, la sous-unité récifale de l'Hermitage et la sous-unité récifale de La Saline (Cordier, 2007) (Figure 1). C'est la zone du récif à l'interface avec la bande littorale où se concentrent l'essentiel des activités touristiques et donc des pressions d'origine anthropique directe (Lemahieu et al., 2013).

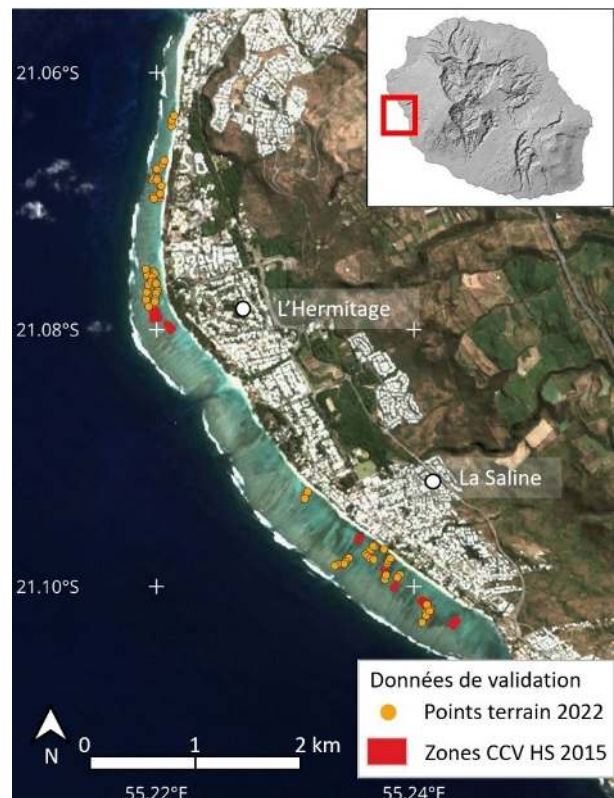


Figure 1. Localisation de la zone d'étude de l'Hermitage et des données de validation (source : SPOT7, Airbus DS, CNES, 2022).

La plateforme récifale (du trait de côte au front récifal) est une unité géomorphologique homogène où la bathymétrie est limitée, comprise entre 0 et 2 m pour les zones les plus profondes. L'étude du maintien des récifs coralliens dans cette zone est cruciale car il s'agit d'une zone particulièrement exposée aux pressions. Elle est facilement accessible aux baigneurs et pêcheurs à pied de par ses faibles profondeurs et sa proximité au rivage. La hauteur d'eau réduite expose les coraux au risque d'exondation à marée basse, en particulier lors des anomalies négatives du niveau marin liées au déplacement des gyres océaniques (Hoarau et al., 2023). Elle est aussi la première zone atteinte par les rejets de polluants d'origine anthropique issus de la côte, et subit un enrichissement chronique en nutriments provenant des bassins versants amont (Cuet, 1989 ; Cuet et al., 2011). Par ailleurs, cette emprise restreinte permet de s'affranchir dans les analyses des effets perturbateurs liés à la colonne d'eau (atténuation du signal en profondeur, effets de surface, effets de la houle), et de corrections plus complexes qu'il aurait été nécessaire d'appliquer aux imageries (Bajjouk et al., 2019).

2.1.2. Données historiques de recouvrement corallien

Le pourcentage de CCV est l'indicateur le plus communément utilisé pour évaluer l'état de santé des

⁴ [Bilan 2016-2020 du 4e programme d'actions de l'IFRECOR](#)

réécifs coralliens (Le Goff et al., 2012 ; Perry et al., 2018). L'analyse des données du suivi GCRMN (Global Coral Reef Monitoring Network) que réalise la RNMR montre une augmentation significative du recouvrement algal au détriment des coraux vivants sur la majorité des sites échantillonnés entre 1998 et 2009 (Bigot, 2008). La couverture algale a ainsi doublé, voire triplé sur certains sites ces dernières années, la majorité présentant aujourd'hui une couverture algale supérieure à 50 % (Bruno et al., 2009).

Pour tester la capacité de l'imagerie MS à détecter et estimer les recouvrements des coraux vivants, nous comparons les valeurs d'indices spectraux calculées sur ces images aux résultats des données historiques à La Réunion. Depuis plusieurs années, des projets de cartographie récifale par télédétection aéroportée HS et lidar ont généré des couches de données de référence sur le littoral réunionnais. Les résultats de ces campagnes représentent actuellement les données de télédétection les plus fines disponibles sur les récifs réunionnais. Les images aériennes ont été acquises par un capteur HS, sur plusieurs dizaines de bandes spectrales dans la gamme 400-1000 nm (visible + proche infrarouge), avec une résolution spatiale de 40 cm. L'emprise couvre les quatre unités récifales de La Réunion du trait de côte jusqu' à l'isobathe 40 m. Ces images ont notamment permis de réaliser la cartographie des principaux types de fond des plateformes récifales réunionnaises : la couverture en sable, en algue, en herbier et en corail. La validation des résultats présente un coefficient de détermination R^2 de 0,73 entre les CCV estimées sur les images aériennes et un jeu de données in-situ pour le récif de Saint-Gilles / Hermitage (Ropert et al., 2016).

Nous utilisons cette CCV historique estimée par cartographie HS en 2015 pour valider les indices calculés sur les images satellites acquises à la même période (Figure 2). Nous sous-échantillons la résolution spatiale native de 40 cm à la résolution des images MS PL, SPOT6/7 et S2 (respectivement 2, 6 et 10 mètres) pour les analyses.

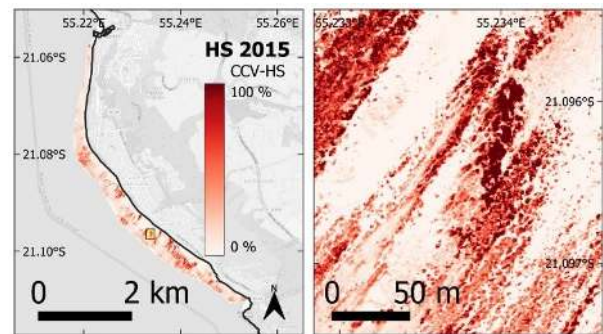


Figure 2. Carte représentant la couverture corallienne vivante sur la plateforme récifale de l'Hermitage estimée à partir d'imagerie hyperspectrale aéroportée acquise en 2015.

2.1.3. Imagerie satellite

Quatre types d'images satellites d'observation de la Terre ont été utilisées pour cette étude, acquises sur deux périodes temporelles correspondant à 2015-2016 pour la recherche de l'indice optimal sur les données historiques et à 2022 pour la validation et l'estimation de la CCV actuelle à partir de données in-situ (Tableau 1).

Les 2 images S2 utilisées ont été acquises les 29/11/2015 et 26/04/2022. S2 est une constellation de 2 satellites de l'Agence Spatiale Européenne (ESA pour European Space Agency), dont les données sont mises à disposition en libre d'accès sur le portail Copernicus. Les deux satellites d'observation de la Terre, S2A et S2B, ont été lancés en 2015 et 2017 sur des orbites polaires. Leur fauchée de 300 km leur permet de couvrir la totalité du globe avec une période de revisite de 5 jours à l'équateur. La résolution spatiale est variable selon les bandes spectrales (13 bandes couvrant du visible au proche infrarouge) : 10, 20 et 60 m. Après leur acquisition ces images sont rapidement produites et mises à disposition sur plusieurs plateformes de téléchargement en ligne comme le Copernicus Dataspace de l'ESA ou la nouvelle plateforme Geodes⁵ du Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) qui remplacera prochainement PEPS⁶.

Quatre images satellites, 2 images SPOT6/7 (28/03/2015 et 04/05/2022) et 2 images PL (04/06/2016 et 26/04/2022) issues des archives et programmées spécifiquement ont été exploitées pour le projet. Depuis 2016, le dispositif Kalideos⁷, visant à promouvoir et développer l'utilisation de l'imagerie spatiale, permet l'acquisition régulière et la mise à disposition de données satellites à haute résolution pour la communauté d'utilisateurs sur La Réunion. Ces

⁵ <https://geodes.cnes.fr/>

⁶ <https://peps.cnes.fr>

⁷ <https://www.kalideos.fr/>

données sont prétraitées grâce à une chaîne de traitement spécifique développée par le CNES, assurant une parfaite calibration des images entre elles (corrections géométriques et radiométriques) et une cohérence de toute la série temporelle.

La dernière image satellite utilisée est une image PNEO acquise le 01/07/2022 et traitée dans le cadre du projet Pléiades Neo Challenge financé par Airbus.

Satellite	Dates d'acquisition	Résolution spatiale MS
Sentinel-2	29/11/2015 26/04/2022	10 m
SPOT6/7	28/03/2015 04/05/2022	6 m
Pléiades	04/06/2016 26/04/2022	2 m
Pléiades Neo	01/07/2022	1,2 m

Tableau 1. Images satellites exploitées pour l'estimation de la couverture corallienne vivante sur les plateformes récifales de La Réunion.

Pour cette étude, les analyses sont effectuées sur les images satellites calibrées en réflectance au sol (TOC pour Top of Canopy), produites par la chaîne Kalideos du CNES pour SPOT6/7 et PL, et l'outil Sen2Cor v2.11 de l'ESA pour S2. L'image PNEO est au niveau de traitement en luminance (TOA pour Top of Atmosphere) après application des paramètres de conversion biais et gain sur les comptes numériques (CN) bruts des pixels, fournis dans le fichier de métadonnées DIMAP associé à l'image. La différence de niveau de traitement TOA ou TOC entre les images satellites exploitées n'a pas d'influence sur les corrélations linéaires obtenues entre les variables (indices spectraux par rapport aux données historiques ou in situ), ces dernières n'étant pas affectées par les transformations linéaires entre les données (Berman, 2024), classiquement appliquées pour calibrer les images et corriger les effets atmosphériques sur les images de télédétection.

2.1.4. Données de validation in-situ

Nous avons récolté des données de terrain in-situ pour développer et valider les modèles d'estimation des CCV à partir des différents indices spectraux calculés sur les images satellites. Au total 64 points de mesure ont été acquis entre le 26 avril et le 4 mai 2022 sur l'ensemble de la plateforme récifale de l'Hermitage, de manière pratiquement synchrone avec les passages des satellites SPOT6/7 et PL (Figure 1).

Les points de mesure ont été pré-identifiés afin de (1) être répartis sur l'ensemble de la plateforme récifale et (2) couvrir de manière homogène l'ensemble des valeurs de CCV afin d'avoir un nombre de points équivalent pour chaque gamme de valeur pour calibrer

au mieux le modèle de régression linéaire que ces données vont alimenter. Cette étape de pré-identification des points de mesure a été effectuée grâce à la connaissance des experts et à l'aide des images satellites récentes.

Sur chaque site de mesure in-situ, nous avons relevé la position géographique, la hauteur d'eau et les paramètres descriptifs des principaux types de fond suivants : substrat abiotique (*Dur / Débris / Meuble*), couvertures biologiques (*Algues / Coraux / Herbiers / Éponges / etc.*). Nous avons également relevé les groupes algaux et les morphotypes coralliens présents. La CCV est estimée visuellement par deux opérateurs en simultané (d'après la méthodologie proposée par Wilson et al., 2007), complété par plusieurs photographies in situ obliques et verticales rendant compte de l'environnement global et des différentes cibles d'intérêt en gros plan afin de pouvoir s'y référer par la suite en cas de besoin (Ropert et al., 2016).

La bonne accessibilité du récif sur cette zone du littoral nous a permis d'atteindre les sites de mesure à pied ou à la nage équipés de palmes, masque, tuba (PMT), en suivant les transects préalablement enregistrés sur un dispositif GNSS (Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites) portable étanche. La localisation des mesures est choisie sur des zones homogènes d'environ 25 m² (surface au sol de 5 x 5 m dans l'environnement immédiat des plongeurs), de manière à prendre en compte les incertitudes de positionnement (GNSS, orthorectification et géoréférencement des images satellites).

2.2. Estimation de la couverture corallienne vivante

2.2.1. Indices spectraux adaptés au milieu marin

Les indicateurs pertinents et susceptibles de rendre compte de la CCV sur la zone d'étude sont des indices dérivés des données de télédétection, ayant une sensibilité élevée à la présence de corail, et dans la mesure du possible, une dépendance faible aux autres types de substrats récifaux (notamment colonisés par des organismes photosynthétiques qui ont une signature spectrale très proche comme les algues) et aux facteurs environnementaux (conditions d'éclairement, état de la mer, atmosphère, bathymétrie, etc.).

L'approche reef-up décrite par Xu & Zhao (2014), consiste à utiliser des mesures acquises in-situ pour aider au traitement des données de télédétection. Elle a été employée pour identifier les principales caractéristiques et les signatures spectrales des différentes cibles benthiques, et ainsi cibler plus précisément des bandes et indices spectraux caractérisant les cibles coralliennes recherchées. Les données disponibles sur La Réunion, notamment la librairie spectrale sous-marine acquise dans le sud-ouest de l'océan Indien entre 2009 et 2010 (Mouquet & Quod, 2010), nous ont permis de préciser les spectres de réflectance des principales cibles benthiques

récifales présentes sur les plateformes récifales de l'ouest de La Réunion (morphotypes coralliens, algues, herbiers, substrats abiotiques comme le sable et les débris).

Dans la littérature scientifique sur la cartographie des récifs coralliens par télédétection, les travaux de Collin et al. (2012) et Joyce et al. (2013) proposent des indices spectraux visant à traduire le signal mesuré sur des images MS et HS en valeur CCV. Collin et al. comparent plusieurs indices calculés par différences normalisées (NDR pour Normalized Difference Ratio) entre couples de bandes spectrales d'une image MS WorldView-2 (WV2) avec des données de CCV mesurées in situ. Parmi les 20 indices qu'ils ont testés, les 4 NDR ayant les coefficients de corrélation les plus importants ($> 0,8$), exploitent 5 bandes spectrales différentes Bleu Profond (DB pour Deep Blue), Bleu (B), Vert (G pour Green), Jaune (Y pour Yellow) et Rouge (R), formant les 4 couples G-DB, G-Y, B-DB et G-R. Parmi ces NDR, 3 sont formés à partir des bandes spectrales spécifiques DB (absente de SPOT6/7 et PL) et Y (absente des 4 satellites analysés ici). La bande DB de S2 a de plus une très faible résolution spatiale (60 m). En excluant la bande Y, ces indices sont appelés respectivement par la suite $Collin_{GDB}$, $Collin_{BDB}$ et $Collin_{GR}$. L'indice $Collin_{GB}$ est calculé comme le NDR du couple G-B, il est avec le $Collin_{GR}$ le seul à pouvoir être calculé sur toutes les images et permet la comparaison entre eux des 4 satellites exploités dans cette étude. Il est intéressant de noter que l'indice $Collin_{GB}$ est parmi les plus mauvais et placé en seulement 8^{ème} position sur 10 par l'étude de Collin et al. en terme de coefficient de corrélation avec les données in situ (0,4). Les 4 indices calculés sur nos images sont $Collin_{GDB}$, $Collin_{BDB}$, $Collin_{GR}$ et $Collin_{GB}$. Joyce et al., développent un indice pour l'imagerie HS comme le rapport entre 2 bandes spectrales dans les canaux B et G (centrées sur 439 nm et 529 nm respectivement, résolution spectrale non précisée). Nous avons appliqué ce rapport à nos images qui possèdent toutes des bandes spectrales dans ces canaux B et G, avec des recouvrements de gammes spectrales plus ou moins importants selon les satellites (459-525 nm et 542-578 nm pour S2, 450-520 nm et 530-590 nm pour SPOT6/7, 430-550 nm et 500-620 nm pour PL et 450-520 nm et 530-590 nm pour PNEO respectivement) (Tableau 2).

Les connaissances sur les plateformes récifales réunionnaises notamment grâce aux cartographies historiques disponibles (Nicet et al., 2016), complétée par l'analyse visuelle croisée des images satellites en composition colorée des canaux RGB, met en évidence que les pixels les plus sombres des images semblent très souvent associés aux plus forts recouvrements coralliens, alors que les zones sableuses ou détritiques sont majoritairement caractérisées par les pixels très clairs. Nous avons donc aussi calculé plusieurs indices de brillance (BI pour Brightness Index) (Escadafal & Bacha, 1996 ; Mathieu et al., 1998) en utilisant des combinaisons des

bandes spectrales disponibles sur les différentes images DB, B, G, R, et Proche Infrarouge (NIR pour Near Infrared). Le BI est calculé comme une distance euclidienne dans un espace à n dimensions et permet de déterminer la réflectance globale d'une cible, sa magnitude. Les 5 BI calculés ici sont BIDB, BIBG, BIGR, BIRNIR et BIBGR en fonction des bandes spectrales utilisées pour les calculer (formules présentées dans le Tableau 2).

Les 4 bandes spectrales seules DB, B, G et R ont aussi été incluses dans les analyses pour comparaison et évaluer leur intérêt par rapport aux autres indices calculés. Par commodité, ces bandes seront aussi par la suite référencées par le terme « indice ».

Les indices ont été calculés sur les quatre types d'images satellites disponibles S2, SPOT6/7, PL et PNEO, qui possèdent des bandes spectrales similaires dans la gamme spectrale visible - NIR. Les indices comportant la bande DB n'ont été calculés que sur les images S2 et PNEO, seules à comporter cette bande spectrale supplémentaire, suréchantillonnée par interpolation bilinéaire à 10 m pour l'image S2. Pour les images historiques de 2015-2016 comme pour les images récentes de 2022, 14 indices ont ainsi été produits pour S2 et PNEO, et 10 pour SPOT6/7 et PL (cf. Tableaux de résultats 3 et 4).

Indice / Référence	Formule et bandes spectrales
Collin et al. (2012)	$Collin_{BDB} = \frac{B - DB}{B + DB}$ $Collin_{GDB} = \frac{G - DB}{G + DB}$ $Collin_{GB} = \frac{G - B}{G + B}$ $Collin_{GR} = \frac{G - R}{G + R}$
Joyce et al. (2013)	$Joyce = \frac{G}{B}$
Indice de brillance Bleu Profond-Bleu	$BIDBB = \sqrt{\frac{DB + B}{2}}$
Indice de brillance Bleu-Vert	$BIBG = \sqrt{\frac{B + G}{2}}$
Indice de brillance Vert-Rouge	$BIGR = \sqrt{\frac{G + R}{2}}$
Indice de brillance Rouge-Proche Infrarouge	$BIRNIR = \sqrt{\frac{R + NIR}{2}}$
Indice de brillance Bleu-Vert-Rouge	$BIBGR = \sqrt{\frac{B + G + R}{3}}$

Tableau 2. Indices spectraux calculés sur les différentes bandes spectrales des images satellites exploitées pour l'estimation de la couverture corallienne vivante des plateformes récifales de La Réunion, Bleu Profond (DB), Bleu (B), Vert (G), Rouge (R) et Proche Infrarouge (NIR).

2.2.2. Données de référence et indice de couverture corallienne vivante par télédétection satellite

Recherche d'indice optimal sur les données historiques

La détermination du meilleur indice spectral calculé sur les images satellites s'est faite à partir des données de référence de CCV issues du traitement des images HS de 2015. Pour cela les données de CCV de résolution native à 40 cm ont été extraites et rééchantillonnées aux résolutions des différentes images satellites MS S2, SPOT6/7 et PL (10 m, 6 m et 2 m respectivement). Les données issues du traitement des images satellites sont ensuite comparées pixel à pixel aux valeurs historiques pour la même localisation.

Les calculs de corrélation ont été réalisés sur des régions d'intérêt (ROI pour Region of Interest) également distribuées tout le long du récif, prenant en compte la DAR et le platier, et comportant un échantillonnage de points représentatif des CCV présentes sur le récif (Figure 1). Ce masquage d'une partie de la zone permet d'éliminer les zones perturbées ne portant pas d'information liée au substrat (pixels de déferlement dû à la houle par exemple), ou

surreprésentées sur les images (sable de DAR ou débris coralliens morts sur les platiers). Les coefficients de corrélation R^2 moyens sont ensuite calculés pour chaque image et pour chacun des indices. L'analyse de ces résultats permet d'identifier les indices et les images ayant les meilleures corrélations avec la CCV historique de référence.

Application sur les données in-situ récentes

Afin de vérifier la pertinence du ou des couples d'indice spectral / image MS déterminés à l'étape précédente, les mêmes calculs de corrélation ont été reproduits sur les images satellites récentes acquises en 2022, pendant lesquelles une campagne de vérité-terrain (VT) in-situ quasi-synchrone a été effectuée. Comme pour les données historiques, les indices ont été calculés sur les images satellites aux dates les plus proches de la période d'acquisition de la donnée in-situ, ainsi que sur l'image PNEO spécifiquement acquise. Pour chacune des images, les valeurs d'indice des pixels situés aux localisations des points de VT ont été extraites. Les points de VT sont localisés dans des zones étendues et relativement homogènes ($> 25 \text{ m}^2$), permettant de prendre en compte les incertitudes de positionnement dues au récepteur GNSS ou de référencement des images. Les croisements entre les jeux de données sont ainsi facilités malgré l'importante hétérogénéité spatiale au sein du récif.

Nous avons ensuite calculé les corrélations linéaires entre ces données de VT et les valeurs d'indices. Les coefficients de corrélation de Pearson et les P-Values associées ont été calculés sur ces relations linéaires, permettant de valider qu'elles sont statistiquement significatives (P-value $< 0,05$). Ces traitements de données ont été réalisés grâce à des scripts Python (v3) et R (v4.1.0) spécifiquement développés pour l'étude.

Estimation de la couverture corallienne vivante et cartographie des coraux à partir de l'imagerie satellite

La couverture corallienne vivante par satellite (CCV_s) est calculée à partir d'équation de la régression linéaire établie entre les valeurs de CCV estimées in-situ et l'indice spectral calculé sur l'image satellite sélectionnée (EQ1). Le couple indice-image retenu pour ce calcul est celui dont le coefficient de corrélation R^2 est le plus élevé parmi les différentes combinaisons testées.

$$CCV_s = \alpha \times \text{Indice} + \beta \quad (\text{EQ1})$$

Avec α : coefficient directeur de la droite de la régression linéaire
 β : l'intersection avec l'axe des abscisses

En chaque pixel de l'image, et à la résolution spatiale de celle-ci, une valeur de CCV_s peut être calculée, permettant d'estimer les recouvrements coralliens et

de localiser avec précision les colonies vivantes. Une cartographie fine a été produite à l'échelle spatiale de la zone d'étude, comprise entre le trait de côte et le front récifal. Les valeurs des pixels s'échelonnent de manière continue sur la plage comprise entre 0 et 100% (tronquées en dehors).

3. Résultats et discussion

3.1. Indices spectraux et images satellites

3.1.1. Détermination des indices optimaux sur les données historiques 2015

Dans cette première phase, les corrélations ont été calculées entre les données de CCV historiques de 2015 issues de l'HS et les indices spectraux sur les images satellites acquises à la même époque (S2, SPOT6/7 et PL). Elles ont permis d'identifier les meilleurs couples indice-image à même de permettre d'estimer la CCV (Tableau 3).

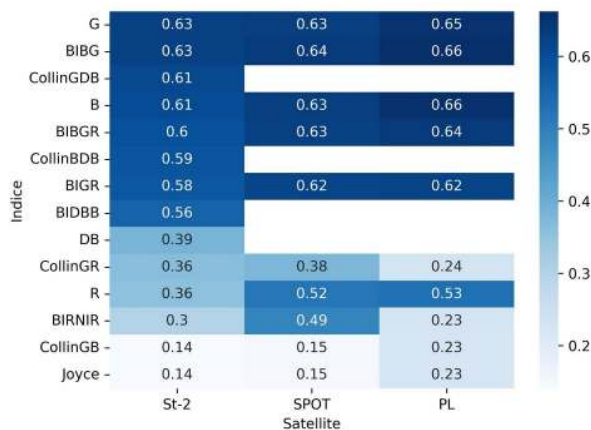


Tableau 3. Carte de chaleur des coefficients de corrélation R^2 moyens entre les données historiques et les images de 2015, en fonction du satellite et de l'indice utilisés.

Les trois types d'images satellites présentent des résultats comparables avec des plages de variation et un ordonnancement des différents indices considérés similaires. L'indice BIBG est en moyenne le mieux corrélé à la CCV (R^2 moyen sur les 3 images égal à 0,64). Les bandes spectrales seules G ($R^2 = 0,64$) et B ($R^2 = 0,63$), ainsi que les BIBGR ($R^2 = 0,62$) et BIGR ($R^2 = 0,61$) sont aussi bien corrélées avec les données historiques. Les indices issus de la littérature Joyce ($R^2 = 0,17$), Collin_{GB} ($R^2 = 0,17$) et Collin_{GR} ($R^2 = 0,32$) se placent parmi les moins bons en moyenne. Les deux indices de Collin et al. exploitant la bande DB, Collin_{GDB} et Collin_{BDB}, calculés sur l'image S2 présentent des niveaux de corrélation forts ($R^2 = 0,61$ et $R^2 = 0,59$ respectivement), malgré la faible résolution spatiale native de cette bande spectrale (60 m). Ces valeurs relativement fortes s'expliquent vraisemblablement

grâce aux bonnes corrélations des bandes G et B considérées individuellement. La bande DB seule a une corrélation beaucoup plus faible ($R^2 = 0,39$), en lien avec sa faible résolution spatiale native, qui ne semble pas adaptée aux faibles dimensions et à l'hétérogénéité spatiale de la zone d'étude.

Les valeurs de corrélation les plus fortes sont équivalentes entre les images et légèrement décroissantes de PL à SPOT6/7 à S2 (R^2 variant de 0,63 à 0,65). Il est important de noter que pour le calcul des corrélations, les données de référence de CCV historique (raster de pixels de 40 cm) ont été sous-échantillonnées à la résolution des pixels S2 (10 m) de manière à pouvoir considérer des surfaces au sol équivalentes pour chacun des deux jeux de données (pixels intégrant les mêmes types et recouvrements de substrats benthiques). Cette méthode de validation lisse et réduit l'hétérogénéité spatiale des CCV, améliorant les corrélations des comparaisons pixels à pixels, mais atténuant aussi les effets des différences de résolutions spatiales entre les images.

La bande spectrale R ($R^2 = 0,47$) et les deux indices qui l'exploitent (BIRNIR $R^2 = 0,34$ en moyenne et Collin_{GR} $R^2 = 0,33$) ont des valeurs de corrélation relativement faibles, qui sont probablement à relier à l'absence de correction de l'atténuation du signal lumineux avec la bathymétrie sur les images, et la plus grande sensibilité des grandes longueurs d'onde à ce phénomène. On note ici une différence importante par rapport à Collin et al., qui avaient appliqué une correction du signal en fonction de la bathymétrie, et notaient une forte corrélation entre l'indice Collin_{GR} et la CCV.

Comme pour les bandes seules, les BI intégrant les bandes spectrales de plus faibles longueurs d'ondes sont les mieux corrélées à la CCV (B et G par rapport à R et NIR). Encore plus que le canal R, le canal NIR est très sensible aux variations de hauteur d'eau, qui bien que faibles sur la plateforme récifale réunionnaise, sont tout de même suffisamment importantes pour déclasser le BIRNIR intégrant cette bande. Aussi l'ajout de la bande spectrale R, moins bien corrélée que les bandes B et G seules, dans le calcul du BIBGR par rapport au BIBG n'apporte pas d'informations supplémentaires et ne permet pas d'améliorer la corrélation de l'indice. Dans le cas BIBG, il est important de noter que la combinaison des bandes dans un BI permet d'améliorer la corrélation par rapport aux bandes B et G considérées séparément.

3.1.2. Validation de l'indice de brillance sur les données in-situ 2022

La campagne d'acquisition des données in-situ menée en synchronisation avec la programmation de nouvelles scènes satellites en 2022 a permis de tester les différents indices développés sur les données d'archive avec un nouveau jeu de données récent. Les coefficients de corrélation R^2 des régressions linéaires entre les indices satellites et les données in situ

permettent de classer les différents couples image-indice pour estimer la CCV (Tableau 4).

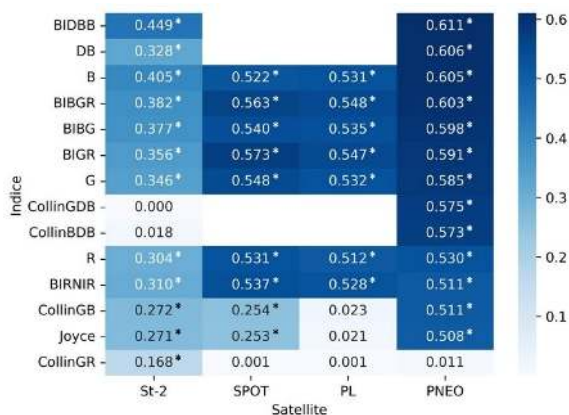


Tableau 4. Carte de chaleur des coefficients de corrélation R^2 entre les données in situ et les images de 2022, en fonction du satellite et de l'indice utilisés. Les étoiles représentent les corrélations de Pearson statistiquement significatives (P -Value < 0,05).

Sur les données de 2022, on note un comportement similaire à 2015. Les R^2 maximums obtenus sont du même ordre de grandeur que pour les données historiques, avec un gradient croissant de corrélation avec la résolution spatiale, l'indice le mieux corrélé pour S2 (BIDBB $R^2 = 0,449$) étant inférieur à ceux de SPOT6/7 (BIGR $R^2 = 0,573$) et PL (BIBGR $R^2 = 0,547$), eux-mêmes inférieurs à celui de PNEO (BIDBB $R^2 = 0,611$).

Pour les images S2, les corrélations sont supérieures pour les données historiques (R^2 moyen supérieur à 0,61 pour les 5 meilleurs indices de 2015) que pour les mesures in-situ (R^2 moyen inférieur à 0,40 pour les 5 meilleurs indices de 2022), à mettre en lien avec les différences de résolution et d'échelle spatiale considérées entre les différents jeux de données de validation. Pour les données de 2022, les valeurs ponctuelles des mesures in-situ sont simplement superposées et comparées aux valeurs des pixels des images satellites. Compte-tenu (1) de la très forte hétérogénéité spatiale du milieu produisant des variations continues et très rapides des proportions des différents types de fond ; (2) de la différence de surface échantillonnée (environ 25 m² in-situ contre 100 m² par pixel S2) ; et (3) de potentiels décalages spatiaux entre les jeux de données, il est probable que les corrélations calculées entre les images S2 et les données terrain soient négativement impactées. Pour obtenir de meilleures corrélations entre données in situ et images S2, il serait nécessaire de ne considérer pour la validation que des points de VT acquis sur des étendues homogènes de 2 x 2 voire 3 x 3 pixels S2 (équivalentes à 500 à 1000 m²), ce qui est difficilement

réalisable à La Réunion où les surfaces récifales et les couvertures coralliennes sont faibles et très mosaïquées.

A l'opposé, il est intéressant de noter que les corrélations de SPOT6/7 sont très proches de celles de PL, malgré la différence de résolution spatiale (6 m contre 2 m). Ces images, produites par le dispositif Kalideos Réunion ont bénéficié de corrections géométriques optimales, limitant notamment les effets des potentiels décalages spatiaux observés sur S2. L'image PNEO, qui possède la meilleure résolution spatiale, a obtenu les meilleurs résultats de corrélation par rapport aux 3 autres images, grâce notamment à la bande spectrale DB à haute résolution spatiale susceptible d'apporter des informations intéressantes pour la cartographie des zones immergées. Le classement des meilleurs indices sur PNEO est très semblable aux autres satellites : les bandes spectrales DB ($R^2 = 0,606$), B ($R^2 = 0,605$), et G ($R^2 = 0,585$) seules et les BI les combinant étant globalement supérieures aux indices issus de la littérature de Joyce et al. ($R^2 = 0,508$) et les NDR de Collin et al. ($R^2 \leq 0,575$). Ce phénomène est tout de même moins marqué que pour les données historiques, les valeurs des coefficients restant élevées et significatives. Pour les BI comme pour les bandes seules, on note l'avantage des bandes spectrales peu influencées par la colonne d'eau DB et B par rapport aux bandes G, R ($R^2 = 0,530$) et le NIR dans le BIRNIR ($R^2 = 0,511$). De la même manière, les BI combinés montrent des corrélations plus fortes que pour les bandes spectrales prises individuellement.

Pour S2, l'apport de la bande DB semble ici très mitigé. Même si le BIDBB est l'indice qui a la meilleure corrélation avec les données in situ ($R^2 = 0,449$), la bande DB seule ($R^2 = 0,328$), la bande DB seule ($R^2 = 0,328$) et surtout Collin_{BDB} ($R^2 = 0,018$) et Collin_{GDB} ($R^2 = 0$) sont parmi les indices les moins corrélés à la CCV. Ces deux derniers indices issus de Collin et al. étaient classés parmi les 4 meilleurs de leur étude. Ces différences de comportement sont probablement encore une fois à relier avec la faible résolution native de cette bande spectrale sur S2. Dans le cas de PNEO, la bande DB, combinée à la bande B dans le BIDBB permet d'obtenir la meilleure corrélation avec les données terrain (0,611). La bande DB PNEO semble donc ici apporter une information complémentaire pour la cartographie des coraux des zones peu profondes de la plateforme récifale de l'Hermitage, même s'il a été relevé un niveau de bruit plus important dans cette bande par rapport aux autres bandes spectrales, qui ne semble donc pas avoir d'impact dans les corrélations.

Les faibles performances de l'indice Collin_{GB} pour S2 ($R^2 = 0,272$) et dans une moindre mesure pour PNEO ($R^2 = 0,511$) confirment les résultats de Collin et al.. L'indice Collin_{GR} n'est pour S2 ($R^2 = 0,168$) comme pour SPOT6/7 ($R^2 = 0,001$), PL ($R^2 = 0,001$) et PNEO ($R^2 = 0,011$), pas du tout corrélé aux CCV. Ce résultat est en opposition avec celui de Collin et al., et

probablement à relier comme pour les données historiques à l'absence de correction de l'atténuation de la colonne l'eau sur nos images.

3.1.3. Spatialisation des indices et cartographie de la CCV

Le BIBG, est parmi les indices les mieux corrélés aux données historiques et in-situ. La distribution spatiale de cet indice, calculé sur les toutes les images de 2022, retranscrit la répartition et les variations de CCV observées sur le terrain. On identifie aisément les effets de la résolution spatiale : plus elle est fine, plus les images d'indices sont représentatives du mosaïquage et de l'hétérogénéité spatiale des objets présents sur le fond marins, et donc en accord avec les mesures de CCV ponctuelles réalisées in-situ (Figure 3).

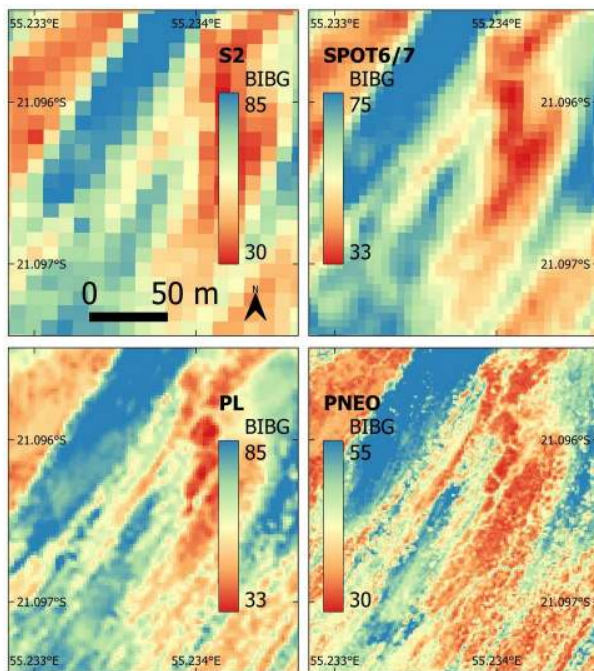


Figure 3. Indices de brillance bleu-vert BIBG calculés sur les quatre images satellites avec leur résolution spatiale : Sentinel-2 (10 m), SPOT6/7 (6 m), Pléiades (2 m) et Pléiades Neo (1,2 m).

Les bonnes corrélations établies entre les indices calculés sur les images de télédétection et les données de CCV (historiques et relevés in-situ récents) permettent d'exploiter ces données satellites pour cartographier les coraux des petits fonds des plateformes récifales de La Réunion. Le BIDBB qui est calculé sur les bandes spectrales DB et B de l'image PNEO MS, ayant la plus fine résolution spatiale (1,2 m), obtient la meilleure corrélation avec les données de référence in-situ et est utilisé pour produire les cartes de CCV_s.

La conversion des BI en valeurs de CCV_s est effectuée à l'aide de l'équation de la droite de régression linéaire du BIDBB avec les valeurs in-situ de CCV (EQ2). Les valeurs de CCV_s calculées s'échelonnent sur la plage de 0 à 100% (seuillées en dehors), à la résolution de l'image MS PNEO et l'emprise spatiale comprise entre le trait de côte et le front récifal.

$$CCV_s = 52,281 \times BIDBB - 0,169 \quad (EQ2)$$

avec CCV_s : couverture corallienne vivante satellite (%)

$BIDBB$: valeur de brillance du pixel

La carte de CCV_s générée permet de localiser avec précision les zones coralliennes de sur l'ensemble de la plateforme récifale de l'Hermitage et à la résolution de l'image satellite. Elle met en évidence la forte hétérogénéité spatiale du platier récifal de l'Hermitage, différenciant les zones vivantes des zones détritiques mortes composées de débris et de sable coralliens (Figure 4).

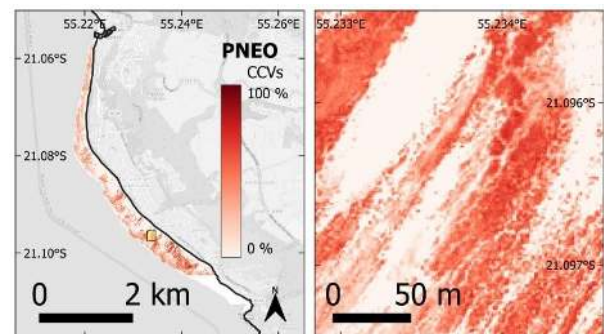


Figure 4. Couverture des coraux vivants sur la plateforme récifale de l'Hermitage estimée à partir de l'image satellite Pléiades Neo du 01/07/2022 et de l'indice de brillance sur les bandes Bleu Profond et Bleu (BIDBB).

Les CCV_s estimées par cette méthode sont directement liées aux BI calculés : plus les pixels absorbent le rayonnement lumineux incident, plus ils sont sombres et plus le taux de CCV_s calculé est fort. Indépendamment de la présence de corail, tout objet ou nature de fond susceptible d'interagir avec le rayonnement lumineux en l'éclaircissant ou l'assombrissant, aura un impact sur les valeurs estimées. Des organismes photosynthétiques autres que les coraux, comme les herbiers de phanérogames marines (*Syringodium isoetifolium* seule espèce présente à La Réunion), les algues (macroalgues dressées, corallinacées encroûtantes, turfs) ou encore les cyanobactéries, sont présents et peuvent ponctuellement occuper de grandes étendues sur les

récifs. Ces organismes, à cycle de développement souvent rapide, peuvent subir des variations de recouvrement saisonnières ou annuelles rapides et importantes, et sont ainsi susceptibles de perturber les résultats calculés sur les images. Les algues par exemple se développent rapidement à la saison estivale chaude, se densifiant et recouvrant de grandes sections des platiers et substrats meubles. En absorbant fortement le signal lumineux par leur activité photosynthétique, elles assombrissent les pixels et donc impactent les BI et potentiellement les recouvrements coralliens estimés par cette méthode. La présence d'herbiers de phanérogames sur les plateformes récifales a aussi un impact sur le signal. Comme les algues ils ont des cycles de développement saisonniers, mais moins marqués. Ces herbiers sont malheureusement en net déclin depuis plusieurs années à La Réunion, et leur présence se limite actuellement à quelques patchs résiduels présents de manière diffuse et très localisée au nord de la zone de l'Hermitage (Baudouin & Ferrando-Demange, 2023). Leur localisation étant très circonscrite, un masquage spécifique peut être opéré dans les zones de développement pour limiter les perturbations sur les mesures.

Pour limiter au maximum les effets de ces perturbations potentielles, il est nécessaire de cibler, pour l'acquisition des images satellites, les périodes où le développement de ces organismes est au minimum : durant la période froide de l'hiver austral. Par opposition, les couvertures coralliennes sont, elles, plus stables dans le temps et peu sensibles aux variations saisonnières. Les évolutions de CCV sont des tendances lourdes sur le long terme et reflètent des changements importants dans l'état du milieu.

La qualité des images satellites joue un rôle important dans les analyses. Alors que la turbidité ou la présence de vagues aura tendance à éclaircir les pixels (voire masquer l'info sous-jacente en cas de déferlement en surface), les ombres de nuages ou une hauteur d'eau importante aura tendance à les assombrir. Il est donc nécessaire de disposer de bases de données historiques fournies et de réaliser des acquisitions régulièrement pour pouvoir filtrer et sélectionner les images permettant de produire des résultats optimaux. L'image PNEO, utilisée pour cette étude, a été acquise le 1^{er} juillet 2022 en période calme et froide, sans nuage, quelques jours après un important épisode de houle australe ayant nettoyé les algues du platier, limitant ainsi les perturbations potentielles dues à ces organismes.

Cette méthode de cartographie par télédétection satellite permet de considérer de manière exhaustive l'ensemble d'une zone d'étude. La carte produite fournit un état des lieux complet et instantané représentatif de l'état des coraux à la date d'acquisition de l'image. L'analyse diachronique sur plusieurs images satellites successives permettra de comparer

et de suivre les états du milieu et de mettre en évidence les changements importants.

3.2. Avantages d'une meilleure résolution spatiale

Les plateformes récifales réunionnaises, très hétérogènes et mosaïquées, présentent une zone de DAR peu profonde dans laquelle se développent des colonies coralliennes éparses, et un platier au recouvrement corallien peu dense traversé en alternance par des sillons détritiques étroits couvrants des très petites surfaces. Ces caractéristiques ne sont à priori pas favorables à la cartographie par télédétection satellite, dont les relativement faibles résolutions spatiales rendent difficilement compte de la forte variabilité du terrain. Les résultats de cette étude mettent pourtant en évidence les capacités des images MS satellites S2, SPOT6/7, PL et PNEO à estimer avec fiabilité la CCV sur ces zones particulières. Les colonies coralliennes de petite taille (sub-métrique) aux contours rendus souvent diffus par un enalguement partiel, produisent de nombreux pixels mixtes souvent difficiles à discriminer, et d'autant plus que les résolutions spatiales des images sont faibles. Pour cette étude, l'accès à des données satellites récentes PNEO, dont les résolutions spatiales sont 40% plus fines que la génération précédente PL, nous a permis d'évaluer l'apport supplémentaire de ce satellite pour la cartographie des zones récifales à La Réunion. La comparaison des images PL et PNEO met en évidence les avantages d'une meilleure résolution spatiale dans ce contexte. Les structures présentes sur les fonds marins sont facilement identifiables sur les images PNEO et leurs contours sont plus nets. Les colonies coralliennes isolées sombres ressortent clairement sur le substrat sableux clair de la DAR, et les fins sillons sableux traversant le platier sont aussi plus clairement visibles (Figure 5).

Les structures particulières mises en évidence par Bajjouk et al. (2019), formées par des langues de débris coralliens progressant sur le platier au détriment des colonies coralliennes vivantes (acropores branchus principalement), sont clairement identifiables sur les images, avec un gain apporté par la résolution plus fine des images PNEO par rapport aux images PL, permettant une meilleure identification des objets, dont les contours nets laissent envisager la détection des plus petits changements. L'analyse par photo-interprétation des images PL et PNEO de 2022 nous a permis de mettre en évidence la progression sur plus de 6,5 mètres de l'une de ces structures détritiques durant les 2 mois séparant les deux acquisitions (Figure 5). Ce déplacement important fait suite au déferlement sur les platiers de l'ouest de l'île d'une grande houle australe de sud (hauteur significative supérieure à 5 m) quelques jours avant l'acquisition de la seconde image.

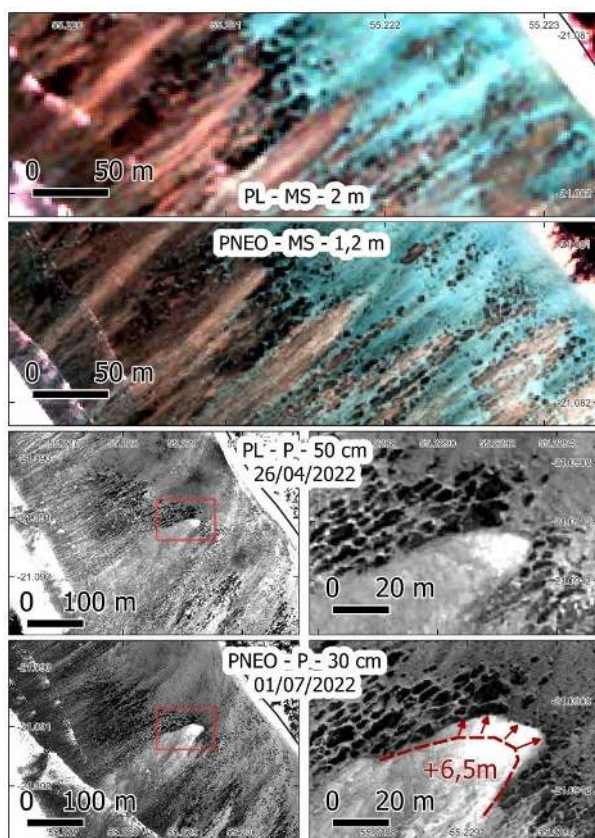


Figure 5. Différences de résolution entre les images Pléiades Neo sur la plateforme récifale de l'Hermitage. En bas, mise en évidence de la progression d'une langue de débris coralliens clairs sur le platier au détriment des coraux vivants plus sombres.

L'amélioration des vecteurs, des capteurs et des méthodes de traitement disponibles, notamment la photogrammétrie SfM (pour Structure From Motion), a conduit à une augmentation récente de l'utilisation de l'imagerie aérienne drone pour la cartographie dans le domaine marin (Casella et al., 2016 ; Kabiri et al., 2020). Ce type d'image est de plus en plus employé par les différents acteurs, spécialistes ou novices dans le domaine de la télédétection, il est peu coûteux, rapidement et facilement déployable, et nécessite peu de connaissances pour sa mise en œuvre (Joyce et al., 2018). L'accès grand-public à des logiciels de traitement simples rend possible la production et l'exploitation de données issues des photographies drones sur des zones relativement importantes (orthophotos, modèles numériques de terrain). Couplée à des méthodes de traitement performantes, comme l'intelligence artificielle (IA) en plein essor, la très bonne résolution spatiale de ces données (centimétrique) permet d'envisager des cartographies précises des littoraux (Osco et al., 2021 ; Mata et al. 2024). En raison de contraintes matérielles (autonomie, capteurs), techniques (prétraitements,

volumes et temps de production des jeux de données, mise à disposition), et réglementaires (habilitations, autorisations), les jeux de données drones restent encore aujourd'hui relativement rares et peu disponibles, et ne permettent pas de couvrir en opérationnel de manière exhaustive et régulière de grandes surfaces au-delà de quelques km². Les résultats de cette étude confirment que les images satellites à très haute résolution (THR) permettent des suivis environnementaux à large échelle comme celui de la CCV sur la plateforme récifale de l'Hermitage, ainsi que la détection des changements les plus fins ayant un impact sur la complexité des milieux et la biodiversité. Le renouvellement des constellations de satellites, dont les résolutions spatiales, spectrales et temporelles sont sans cesse améliorées, permet de combler les écarts techniques avec les données aériennes, notamment grâce à une amélioration des résolutions spatiales qui permet l'identification plus claire des cibles sur le terrain. Le nouveau capteur MS de PNEO offre actuellement un bon compromis en termes de résolutions, qualité, étendue spatiale, et disponibilité des données pour réaliser ce type de suivis sur le milieu marin. Au niveau international plusieurs constellations comme les satellites WV de Maxar, offrent depuis de nombreuses années des caractéristiques similaires à PNEO et ont montré leurs potentialités pour la cartographie récifale (Andréfouët et al., 2003 ; Collin et al., 2012). La constellation de plus de 200 satellites de l'entreprise Planet offre depuis 2021 des images à très haute résolution temporelle (jusqu'à plusieurs images par jour) avec une résolution spatiale de l'ordre de 3,5 m. Même si ces données nécessitent des prétraitements spécifiques (géométrie et radiométrie) pour être exploitées, elles ont aussi montré leur intérêt pour l'étude et le suivi récifs coralliens (Li et al., 2019 ; Lyons et al., 2024).

4. Conclusion et perspectives

Cette étude s'inscrit dans le continuum de recherche visant à inscrire la télédétection dans la boîte à outil de suivi des trajectoires récifales et de celles de La Réunion en particulier. Dans d'autres études, il avait été montré le potentiel de l'imagerie satellite pour cartographier les épisodes de blanchissement (Nicet et al., 2019) ou aérienne HS pour cartographier les recouvrements de coraux vivants (Bajjouk et al., 2019).

Nos résultats confirment que la CCV des plateformes récifales de La Réunion peut être estimée précisément à partir d'un BI calculé sur les images satellites d'observation de la Terre S2, SPOT6/7, PL et PNEO, ayant des caractéristiques spectrales communes. En l'absence de pré-traitement visant à corriger les effets de la colonne d'eau, les bandes spectrales DB, B et G sont à privilégier par rapport aux bandes R et NIR plus sensibles aux variations de la bathymétrie. La carte des CCV produite met en évidence la forte hétérogénéité spatiale des plateformes à l'échelle de l'ensemble du récif de l'Hermitage. Elle permet de dissocier et localiser avec précision les zones de corail vivant et les

zones détritiques composées de débris coralliens morts.

L'ensemble des résolutions spatiales des images analysées (comprises entre 1,2 m et 10 m) sont exploitables pour estimer la CCV. Cependant, en raison des caractéristiques particulières de la plateforme récifale réunionnaise, peu étendue, très mosaïquée avec de faibles recouvrements coralliens dispersés au milieu du substrat environnant et difficilement détectables, la résolution des images S2 semble insuffisante pour obtenir de bonnes corrélations avec les données in-situ à La Réunion. Le satellite PNEO grâce à des spécifications améliorées par rapport aux autres satellites testés S2, SPOT6/7 et PL a confirmé ses bonnes potentialités pour la cartographie récifale. Sa meilleure résolution spatiale semble notamment plus adaptée aux spécificités des plateformes récifales réunionnaises. La nouvelle bande spectrale DB, permet aussi d'améliorer la qualité des estimations sur les aux mesures in-situ.

Les acteurs scientifiques et institutionnels français (et étrangers sous conditions), grâce au Dispositif Institutionnel National d'Accès Mutualisé en Imagerie Satellitaire (DINAMIS)⁸ de l'Infrastructure de Recherche Data Terra, disposent d'un accès facilité à la donnée spatiale, dont les satellites SPOT6/7, PL et PNEO, ce qui permet d'envisager des suivis réguliers sur ces milieux à partir de séries temporelles d'images plus complètes. Le traitement de données nombreuses et fréquentes, pourra nécessiter le développement de chaînes de traitement adaptées pour automatiser leur exploitation et réaliser des analyses diachroniques, permettant ainsi d'identifier les changements et de suivre les dynamiques sur le long terme.

Références

Allemand, D., Tambutté, E., Zoccola, D., & Tambutté, S. (2011). Coral Calcification, Cells to Reefs. In *Coral Reefs: An Ecosystem in Transition* (pp. 119–150). Springer, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-0114-4>

Andréfouët, S., Maritorena, S., & Loubersac, L. (2000). Un bilan de la télédétection appliquée aux milieux coralliens. *Océanis*, 26(3).

Andréfouët, S., & Payri, C. (2000). Scaling-up carbon and carbonate metabolism of coral reefs using in-situ data and remote sensing. *Coral Reefs*, 19(3), 259–269. <https://doi.org/10.1007/s003380000117>

Andréfouët, S., Kramer, P., Torres-Pulliza, D., Joyce, K. E., Hochberg, E. J., Garza-Pérez, R., Mumby, P. J., Riegl, B., Yamano, H., White, W. H., Zubia, M., Brock, J. C., Phinn, S. R., Naseer, A., Hatcher, B. G., & Muller-Karger, F. E. (2003). Multi-site evaluation of IKONOS data for classification of tropical coral reef environments. *Remote Sensing of Environment*, 88(1–2), 128–143. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.04.005>

⁸ <https://dinamis.data-terra.org/>

Andrello, M., Darling, E. S., Wenger, A., Suárez-Castro, A. F., Gelfand, S., & Ahmadi, G. N. (2022). A global map of human pressures on tropical coral reefs. *Conservation Letters*, 15(1), 1–12. <https://doi.org/10.1111/conl.12858>

Bajjouk, T., Mouquet, P., Ropert, M., Quod, J. P., Hoarau, L., Bigot, L., Le Dantec, N., Delacourt, C., & Populus, J. (2019). Detection of changes in shallow coral reefs status: Towards a spatial approach using hyperspectral and multispectral data. *Ecological Indicators*, 96(August 2018), 174–191. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.08.052>

Baudouin, A., Ferrando-Demange, J. (2023). Complémentarité entre méthodes d'analyse in situ (SEARAM) et techniques de télédétection pour l'évaluation de l'état écologique des herbiers marins de La Réunion. Rapport de stage de M' de l'Université de La Réunion. 58pp.

Beck, M.W., Losada, I.J., Menéndez, P. et al. (2018). The global flood protection savings provided by coral reefs. *Nat Commun* 9, 2186. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04568-z>

Bellwood, D. R. (1995). Carbonate transport and within-patterns of bioerosion and sediment release by parrotfishes (family Scaridae) on the Great Barrier Ecology, Marine Series, Progress February, Published. *Marine Ecology Progress Series*, 117(2), 127–136.

Berman, “.B., "Transformations in Regression", [online] Available at: <https://stattrek.com/regression/linear-transformation> URL [Accessed Date: 10/8/2024].

Bigot, L. (2008). Evolution spatio-temporelle de la biodiversité et de la structure des communautés benthiques entre 1998 et 2008 sur les stations sentinelles GCRMN de la Réunion. Rapport ECOMAR pour le compte de APMR 32 p. + annexes.

Birkeland, C. (1997). Implications for resource management. In Birkland C. (ed.) *Life and death of coral reefs*. Chapman & Hall Publ., New-York: 411-435.

Bonn, F., & Rochon, G. (1992). Précis de télédétection: Principe et méthode. Presse Univ. du Québec, AUPELF-UREF, 485p.

Bourmaud, C.A.F., Abouidane A., Boissier P., Leclere L., Mirault E., Pennober G. (2005). Coastal and marine biodiversity of La Reunion. *Indian Journal of Marine Sciences*, 34 (1), p. 98-103. ISSN 0379-5136.

Bruch, W., Cordier, E., Floc'h, F. et Pearson, S. G. (2022). Water Level Modulation of Wave Transformation, Setup and Runup Over La Saline Fringing Reef. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127(7), e2022JC018570. <https://doi.org/10.1029/2022JC018570>

Bruno, J.F., Sweatman, H., Precht, W.F., Selig, E.R., Schutte, V.G.W. (2009). Assessing evidence of phase

shifts from coral to macroalgal dominance on coral reefs. *Ecology* 90:1478-1484.

Casella, E., Collin, A., Harris, D., Ferse, S., Bejarano, S., Parravicini, V., ... & Rovere, A. (2017). Mapping coral reefs using consumer-grade drones and structure from motion photogrammetry techniques. *Coral Reefs*, 36, 269-275. <https://doi.org/10.1007/s00338-016-1522-0>

Chambault, P., Hattab, T., Mouquet, P., Bajjouk, T., Jean, C., Ballorain, K., Ciccione, S., Dalleau, M., Bourjea, J. (2021). A methodological framework to predict the individual and population-level distributions from tracking data. *Ecography*, 44(5), 766-777. <https://doi.org/10.1111/ecog.05436>

Collin, A., Hench, J. L., & Planes, S. (2012). A novel spaceborne proxy for mapping coral cover. *Proceedings of the 12th International Coral Reef Symposium*, July, 9–13.

Cordier, E. (2007). Dynamique hydrosédimentaire du récif frangeant de l'Hermitage / La Saline (La Réunion) : Processus physiques et flux sédimentaires. 208. <https://theses.hal.science/tel-00321180>

Cornwall, C. E., Comeau, S., Kornder, N. A., Perry, C. T., van Hooidonk, R., DeCarlo, T. M., Pratchett, M. S., Anderson, K. D., Browne, N., Carpenter, R., Diaz-Pulido, G., D'Olivo, J. P., Doo, S. S., Figueiredo, J., Fortunato, S. A. V., Kennedy, E., Lantz, C. A., McCulloch, M. T., González-Rivero, M., ... Lowe, R. J. (2021). Global declines in coral reef calcium carbonate production under ocean acidification and warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(21). <https://doi.org/10.1073/pnas.2015265118>

Cuet, P. (1989). Influence des résurgences d'eau douce sur les caractéristiques physicochimiques et métabolique' de l'écosystème récifal à la Réunion. Doctorat en Chimie' de l'Environnement, Université d'Aix- Marseille III, Marseille. 295 pp.

Cuet, P., Atkinson, M., Blanchot, J., Casareto, B., Cordier, E., Falter, J., Frouin, P., Fujimura, H., Pierret, C., Susuki, Y., and Tourrand, C. (2011). CNP budgets of a coral-dominated fringing reef in La Reunion, France : coupling of oceanic phosphate and groundwater nitrate. *Coral Reefs*. <https://doi.org/10.1007/s00338-011-0744-4>

David G., Mirault E., Pennober G., Révillion R. (2008). Unités Paysagères et services écosystémiques, l'exemple des récifs coralliens. *Vertigo : La Revue Électronique en Science de l'Environnement*, 2012, Hors-série 14. <https://doi.org/10.4000/vertigo.12570>

Deniel, C., Kieffer, G., Lecointre, J. (1992). ^New 230Th-238U and 14C age determinations from Piton des Neiges volcano, Reunion—A revised chronology for the Differentiated Series. *Journal of volcanology and geothermal research*, 51(3), 253-267. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(92\)90126-X](https://doi.org/10.1016/0377-0273(92)90126-X)

Elliff, C. I., & Silva, I. R. (2017). Coral reefs as the first line of defense: Shoreline protection in face of climate change. *Marine Environmental Research*, 127, 148–154. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2017.03.007>

Escadafal, R., & Bacha, S. (1996) Strategy for the dynamic study of desertification. In: *Proceedings of the ISSS International Symposium Ouagadougou, Burkino Faso*, p. 19-34.

Eyre, B. D., Andersson, A. J., & Cyronak, T. (2014). Benthic coral reef calcium carbonate dissolution in an acidifying ocean. *Nature Climate Change*, 4(11), 969–976. <https://doi.org/10.1038/nclimate2380>

Ferrario, F., Beck, M. W., Storlazzi, C. D., Micheli, F., Shepard, C. C., & Airolidi, L. (2014). The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nature Communications*, 5(May), 1–9. <https://doi.org/10.1038/ncomms4794>

Good, A. M., & Bahr, K. D. (2021). The coral conservation crisis: interacting local and global stressors reduce reef resiliency and create challenges for conservation solutions. *SN Applied Sciences*, 3(3), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04319-8>

Hedley, J. D., Roelfsema, C. M., Chollett, I., Harborne, A. R., Heron, S. F., J. Weeks, S., ... & Mumby, P. J. (2016). Remote sensing of coral reefs for monitoring and management: a review. *Remote Sensing*, 8(2), 118. <https://doi.org/10.3390/rs8020118>

Hedley, J. D., Roelfsema, C., Brando, V., Giardino, C., Kutser, T., Phinn, S., Mumby, P. J., Barrilero, O., Laporte, J., & Koetz, B. (2018). Coral reef applications of Sentinel-2: Coverage, characteristics, bathymetry and benthic mapping with comparison to Landsat 8. *Remote Sensing of Environment*, 216(July), 598–614. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.014>

Hoarau, L., Mouquet, P., Ropert, M., Cuvillier, A., Massé, L., Bonhommeau, S., Bigot, L., Cauvin, B., Pothin, K., Bajjouk, T. (2023). Negative sea level anomalies with extreme low tides in the South-West Indian Ocean shape Reunion Island's fringing coral reef flats. *Ecological Indicators*, 154, 110508. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110508>

Hochberg, E. J., & Atkinson, M. J. (2003). Capabilities of remote sensors to classify coral, algae, and sand as pure and mixed spectra. *Remote Sensing of Environment*, 85(2), 174–189. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00202-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00202-X)

Hoegh-Guldberg, O., Poloczanska, E. S., Skirving, W., & Dove, S. (2017). Coral reef ecosystems under climate change and ocean acidification. *Frontiers in Marine Science*, 4(MAY). <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00158>

Hughes, T. P., Anderson, K. D., Connolly, S. R., Heron, S. F., Kerry, J. T., Lough, J. M., ... & Wilson, S. K. (2018). Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene. *Science*,

- 359(6371), 80-83.
<https://doi.org/10.1126/science.aan8048>
- Joyce, K. E., Phinn, S. R., & Roelfsema, C. M. (2013). Live coral cover index testing and application with hyperspectral airborne image data. *Remote Sensing*, 5(11), 6116–6137. <https://doi.org/10.3390/rs5116116>
- Joyce, K. E., Duce, S., Leahy, S. M., Leon, J., & Maier, S. W. (2018). Principles and practice of acquiring drone-based image data in marine environments. *Marine and Freshwater Research*, 70(7), 952-963. <https://doi.org/10.1071/MF17380>
- Kabiri, K., Rezai, H., & Moradi, M. (2020). A drone-based method for mapping the coral reefs in the shallow coastal waters—case study: Kish Island, Persian Gulf. *Earth Science Informatics*, 13(4), 1265-1274.
- Lange, I. D., Perry, C. T., & Alvarez-Filip, L. (2020). Carbonate budgets as indicators of functional reef “health”: A critical review of data underpinning census-based methods and current knowledge gaps. *Ecological Indicators*, 110(October 2019), 105857. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105857>
- Le Goff R., Ropert M., Bajjouk, T., Bein, A., Cambert, H., Cebeillac, A., Cuët, P., Delacourt, C., Duval, M., Maurel, L., Mouquet, P., Nicet, J.B., Populus, J., Quod, J.P., Talec, P., Turquet, J., Vermenot, C., Zubia, M. (2012). *Projet Bio-Indication à la Réunion : définition d'indicateurs adaptés aux récifs coralliens de la Réunion. Rapport Final 2012. Conventions Onema/Ifremer de 2009 à 2012. RST-DOI 2012-16. 123p.* <https://archimer.ifremer.fr/doc/00209/32022/>
- Lemahieu, A., Pennober, G., David, G., Lavigne, F., Pothin, K., & Gérard, L. (2013). Élaboration d'un protocole de suivi de la fréquentation au sein de la Réserve naturelle marine de la Réunion. *Vertigo-la revue électronique en sciences de l'environnement*, 13(1).
- Li, J., Schill, S. R., Knapp, D. E., & Asner, G. P. (2019). Object-based mapping of coral reef habitats using planet dove satellites. *Remote Sensing*, 11(12), 1445. <https://doi.org/10.3390/rs11121445>
- Lyons, M. B., Murray, N. J., Kennedy, E. V., Kovacs, E. M., Castro-Sanguino, C., Phinn, S. R., ... & Roelfsema, C. M. (2024). New global area estimates for coral reefs from high-resolution mapping. *Cell Reports Sustainability*, 1(2). <https://doi.org/10.1016/j.crsus.2024.100015>
- Machabee, J. (2024). *Caractérisation de l'hydromorphodynamique de la zone intertidale du récif frangeant de l'Hermitage par caméra vidéo (La Réunion), thèse de doctorat de l'Université de la Réunion*, 327 p.
- Mahabot, M.M., Pennober, G., Suanes, S., Troadec R., Delacourt C. (2017) *Effect of Tropical Cyclones on Short-Term Evolution of Carbonate Sandy Beaches on Reunion Island, Indian Ocean.* *Journal of Coastal Research* 1 July 2017; 33 (4): 839–853. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-16-00031.1>
- Mata, A., Moffat, D., Almeida, S., Radeta, M., Jay, W., Mortimer, N., ... & Groom, S. (2024). Drone imagery and deep learning for mapping the density of wild Pacific oysters to manage their expansion into protected areas. *Ecological Informatics*, 82, 102708. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102708>
- Mathieu, R., Pouget, M., Cerveille, B., & Escadafal, R. (1998). Relationships between satellite-based radiometric indices simulated using laboratory reflectance data and typical soil color of an arid environment. *Remote Sensing of Environment*, 66(1), 17-28. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00030-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00030-3)
- Moberg, E., Allison, E. H., Harl, H. K., Arbow, T., Almaraz, M., Dixon, J., Scarborough, C., Skinner, T., Rasmussen, L. V., Salter, A., Lei, X. G., & Halpern, B. S. (2021). Combined innovations in public policy, the private sector and culture can drive sustainability transitions in food systems. *Nature Food*, 2(4), 282–290. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00261-5>
- Moberg, F., & Folke, C. (1999). Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological economics*, 29(2), 215-233. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00009-9)
- Montaggioni, L. (1976). *Histoire géologique des récifs coralliens de l'archipel des Mascariques*. In : Guézé P. (dir.). *Biologie marine et exploitation des ressources de l'Océan Indien occidental*. Paris : ORSTOM, p. 113-128. (Travaux et Documents de l'ORSTOM ; 47). *Biologie Marine et Exploitation des Ressources de l'Océan Indien Occidental : Colloque Commerson, Saint-Denis (RE), 1973/10/16-24.* ISBN 2-7099-0387-3. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:29303>
- Mouquet, P., & Quod, J. (2010). *Spectrohabent-OI. Acquisition et analyse de la librairie spectrale sous-marine & Document Annexe - Fiches par type.* <https://archimer.ifremer.fr/doc/00005/11647/>
- Mumby, P. J., Skirving, W., Strong, A. E., Hardy, J. T., LeDrew, E. F., Hochberg, E. J., Stumpf, R. P., & David, L. T. (2004). Remote sensing of coral reefs and their physical environment. *Marine Pollution Bulletin*, 48(3–4), 219–228. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2003.10.031>
- Nicot, J.B., Mouquet, P., Tollis, S., & Bigot, L. (2016). *Cartographie des habitats des récifs coralliens de La Réunion. Elaboration des fiches d'habitats marins et cartographie associée. Préfiguration de la Trame Bleue Marine.* <https://sextant.ifremer.fr/geonetwork/srv/api/records/15d65c1a-86c4-4814-baa0-e34f59bf5c31>
- Nicot, J.B., Dufay, V., Mouquet, P., Obura, D., Pennober, G., Pinault, M., Wickel, J., Bigot, L., Chabanet, P. (2019). *Intensité et impact environnemental du blanchissement corallien massif*

de 2019 sur les récifs coralliens de La Réunion. Projet BECOMING 2019. Rapport MAREX, ESPACEDEV, ENTROPIE, UR, IRD, SEAS-OI, CORDIO pour la DEAL Réunion, à RNMR et l'IFRECOR, 70 pages + annexes.

Oscó, L. P., Junior, J. M., Ramos, A. P. M., de Castro Jorge, L. A., Fatholahi, S. N., de Andrade Silva, J., ... & Li, J. (2021). A review on deep learning in UAV remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 102, 102456. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102456>

Pascal, N., Leport, G., Allenbach, M., Marchand, C. (2016). "Valeur économique des services rendus par les récifs coralliens et écosystèmes associés des Outre-mer français" Rapport technique IFRECOR, 56 pages.

Perry, C. T., Alvarez-Filip, L., Graham, N. A., Mumby, P. J., Wilson, S. K., Kench, P. S., ... & Macdonald, C. (2018). Loss of coral reef growth capacity to track future increases in sea level. *Nature*, 558(7710), 396-400.

Price, B. A., Harvey, E. S., Mangubhai, S., Saunders, B. J., Puotinen, M., & Goetze, J. S. (2021). Responses of benthic habitat and fish to severe tropical cyclone Winston in Fiji. *Coral Reefs*, 40(3), 807–819. <https://doi.org/10.1007/s00338-021-02086-x>

Purkis, S. J. (2018). Remote sensing tropical coral reefs: The view from above. *Annual review of marine science*, 10(1), 149-168. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-121916-063249>

Roberts, H. H. (2004). Physical processes as agents of sediment transport in carbonate systems: examples from St. Croix, USVI. *Terrestrial and Marine Geology of St. Croix*, 8, 95-104.

Rogers, J. S., Monismith, S. G., Feddersen, F., & Storlazzi, C. D. (2013). Hydrodynamics of spur and groove formations on a coral reef. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(6), 3059–3073. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20225>

Ropert, M., Mouquet, P., Bajjouk, T., Delacourt, C. (2016). HYSORES : Cartographies hyperspectrales appliquées aux écosystèmes coralliens et à leur état de santé. Ref. RST-DOI/ 2016-04. Ifremer. <https://doi.org/10.13155/46122>

Rougerie, F., Fagerstrom, J. A., & Andrie, C. (1992). Geothermal endo-upwelling: a solution to the reef nutrient paradox?. *Continental Shelf Research*, 12(7-8), 785-798. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(92\)90044-K](https://doi.org/10.1016/0278-4343(92)90044-K)

Urbina-Barreto, I., Chiroleu, F., Pinel, R., Fréchon, L., Mahamadaly, V., Elise, S., ... & Adjeroud, M. (2021). Quantifying the shelter capacity of coral reefs using photogrammetric 3D modeling: From colonies to reefscape. *Ecological Indicators*, 121, 107151.

Virgen-Urcelay A., & Donner S.D. (2023) Increase in the extent of mass coral bleaching over the past half-century, based on an updated global database. *PLoS ONE* 18(2): e0281719. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281719>

Wilson, S. K., Graham, N. A. J., & Polunin, N. V. C. (2007). Appraisal of visual assessments of habitat complexity and benthic composition on coral reefs. *Marine Biology*, 151(3), 1069–1076. <https://doi.org/10.1007/s00227-006-0538-3>

Xu, J., & Zhao, D. 2014. Review of coral reef ecosystem remote sensing. *Acta Ecologica Sinica*, 34(1), 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2013.11.003>

Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection

Association formée sous le régime de la loi de 1901
Siège social : 73, avenue de Paris, 94165 Saint-Mandé Cedex
e-mail : sfpt-bureau@sfpt.fr – web : sfpt.fr

Pour adhérer à la SFPT et recevoir la Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, il vous suffit de renseigner la fiche d'information que vous trouverez sur le site de la SFPT <https://www.sfpt.fr/sfpt/adhesion/> et l'adresser à sfpt-bureau@sfpt.fr

La SFPT est une Société Savante, fondée en 1959 sous le régime de la loi de juillet 1901. Elle fédère la communauté de photogrammétrie et télédétection en France et dans les pays francophones en réunissant les spécialistes de l'imagerie spatiale, aérienne et terrestre, et de leurs applications. La SFPT représente la France auprès de l'ISPRS (Société internationale de Photogrammétrie et télédétection) et fait rayonner la profession à travers l'organisation de colloques scientifiques, de la présente revue, de son site web et de sa newsletter.

Adhérer à la SFPT vous permet de rejoindre la communauté scientifique et industrielle nationale en photogrammétrie et télédétection, bénéficier de tarifs préférentiels dans les colloques que nous organisons, recevoir la revue trimestrielle, communiquer des informations via la Newsletter et le site web.

Membres donateurs



Membres bienfaiteurs



Membres de soutien



Sommaire

Editorial	1
De Pléiades à Pléiades Neo : Une analyse de l'amélioration de la restitution 3D <i>Youssefi, D., Lallement, D., Hümmmer, C., Sarrazin, E., Dubois, E. & Delvit, J.M.</i>	1
Modélisation de la bathymétrie par Pléiades Neo en baie de Saint-Malo : transfert radiatif et réseaux de neurones <i>Collin, A., James, D., Monpert, C., Loyer, S., Palola, P., Wedding, L. & Feunteu, E.</i>	9
Apport des données Pléiades Neo pour la détection des dommages au bâti <i>Mauger-Vauglin, M., Battiston, S., Studer, M. & Bronner, E.</i>	23
De Pléiades à Pléiades Neo : Enjeux et opportunités. L'expérience d'un producteur de données <i>Gonga, N., Delpierre, S., Chauvin, M., Lhenry, C., Desmarais, Y., Leroux, J., Roger, J., Benard, B., Albert, P. & Pristchepa, I.</i> ..	31
Cartographie des coraux par imagerie satellite à très haute résolution Application aux données SENTINEL-2, SPOT6/7, PLÉIADES et PLÉIADES NEO sur les récifs de la Réunion <i>Mouquet, P., Schultz, M., Revillion, C., Cuet, P. & Pennober, G.</i>	45