

Apport des images tri-stéréoscopiques Pléiades pour la discrimination des habitats naturels côtiers

Léa Pouyez¹, Sébastien Rapinel¹, Alexandre Guyot¹, Gwenhael Perrin², Frédéric Bioret², Laurence Hubert-Moy¹

¹ Université Rennes 2, UMR LETG 6554 CNRS

Place du recteur Henri Le Moal

35000 RENNES

¹: laurence.hubert@univ-rennes2.fr

² Université de Bretagne Occidentale, Laboratoire Géoarchitecture

6, avenue Le Gorgeu

29200 BREST, France

Résumé

Cette étude présente l'évaluation des images satellitaires Pléiades pour la discrimination des habitats naturels côtiers sur un site Natura 2000 de 22 km² en Bretagne (France). Un Modèle Numérique de Surface (MNS) a été généré à 0,5 m de résolution spatiale à partir d'images tri-stéréoscopiques acquises en juillet 2021 en utilisant le service de calcul en ligne Formater DSM-OPT (*Digital Surface Models from OPTical stereoscopic very-high resolution imagery*). Ensuite, un modèle numérique de hauteur (MNH) a été calculé en soustrayant un Modèle Numérique de Terrain (MNT) au MNS selon deux approches : une approche extrinsèque, en utilisant un MNT dérivé de données LiDAR (RGE ALTI, IGN®), et une approche intrinsèque, en générant directement un MNT à partir du MNS à l'aide du logiciel Bulldozer. Pour chaque approche, la précision verticale du MNH et son apport pour la discrimination des habitats naturels ont été évalués en utilisant une centaine de relevés floristiques collectés sur le terrain, spécifiquement pour cette étude. L'effet de la pente du terrain sur la précision du MNH a aussi été évalué. Les résultats montrent que le MNH généré par l'approche extrinsèque est plus précis que celui généré par l'approche intrinsèque (MAE respectivement de 0,47 et 1,12 m), en particulier dans les zones de pente. De plus, les résultats indiquent qu'une grande part (43%) de la variance du MNH généré par l'approche extrinsèque est expliquée par les types d'habitats naturels, ce qui en fait une variable intéressante et complémentaire aux variables spectrales classiquement utilisées pour les discriminer en vue de leur cartographie et de leur suivi. Elle montre également que le service en ligne DSM-OPT permet de générer facilement et rapidement un MNS.

Mots-clés : DSM-OPT, Landes, Dunes, Littoral, Hauteur de végétation, Bulldozer

Abstract

*This study presents the evaluation of Pleiades satellite imagery for the discrimination of coastal natural habitats in a 22 km² Natura 2000 site in Brittany (France). A Digital Surface Model (DSM) with a spatial resolution of 0.5 m was generated from tri-stereoscopic imagery acquired in July 2021 using the online computation service Formater DSM-OPT (*Digital Surface Models from OPTical stereoscopic very-high resolution imagery*). A digital height model (DHM) was then calculated by subtracting a digital terrain model (DTM) from the DSM using two approaches: an extrinsic approach using a DTM derived from LiDAR data (RGE ALTI, IGN®) and an intrinsic approach by generating a DTM directly from the DSM using Bulldozer software. For each approach, the vertical accuracy of the DHM and its contribution to the discrimination of natural habitats were assessed using around one hundred floristic surveys collected in the field, specifically for this study. The effect of land slope on the accuracy of the DHM was also assessed. The results show that the DHM generated by the extrinsic approach is more accurate than that generated by the intrinsic approach (MAE of 0.47 and 1.12 m respectively), especially in sloping areas. Furthermore, the results show that a large part (43%) of the variance of the DHM generated by the extrinsic approach is explained by the types of natural habitats, making it an interesting variable to complement the spectral variables conventionally used to discriminate between them for mapping and monitoring purposes. It also shows that the DSM-OPT online service can be used to generate a DSM quickly and easily.*

Keywords: DSM-OPT, Heaths, Dunes, Coastline, Height of vegetation, Conservation

1. Introduction

Les deux satellites Pléiades 1A et 1B observent la Terre depuis 2012 avec une résolution spatiale de 0,7 m en mode panchromatique et 2,8 m en mode multispectral, et une fauchée de 20 km au nadir (Gleyzes et al., 2012). Au-delà de la très haute résolution spatiale de leurs instruments, les satellites Pléiades présentent deux atouts majeurs : d'une part leur agilité, qui permet d'observer n'importe quel point de la Terre en moins de 24h (Gleyzes et al., 2012), et d'autre part la possibilité de générer un MNS à partir d'images tri-stéréoscopiques (Delvit & L'Helguen, 2015).

Plusieurs outils libres ont été développés pour générer un MNS à partir d'images tri-stéréoscopiques Pléiades. On peut notamment citer MicMac (Rupnik et al., 2018), S2P (Franchis et al., 2014), ORFEO ToolBox (Hebrard & Bouffier, 2015) ou plus récemment CARS (Youssefi et al., 2024). Cependant, ces outils qui sont structurés avec une interface en lignes de commandes, sont adaptés aux utilisateurs possédant de solides compétences en géométrie des instruments et disposant d'importantes ressources informatiques (Tinel, 2015). Afin de faciliter la production de MNS à partir d'images Pléiades, le pôle ForM@ter de l'infrastructure de recherche DATA TERRA (Huynh et al., 2019) a développé DSM-OPT qui est un service en ligne sous interface graphique (Stumpf et al., 2017). DSM-OPT utilise l'outil MicMac et des développements *ad-hoc* produits par l'École et Observatoire des Sciences de la Terre (EOST) et l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP). DSM-OPT, gratuit pour les utilisateurs appartenant à des institutions publiques françaises, permet d'effectuer des calculs en ligne. Il présente aussi l'avantage d'être directement connecté au catalogue d'image DINAMIS (Huynh et al., 2019), qui contient un grand nombre d'images Pléiades, ce qui permet de s'affranchir de leur téléchargement. Ainsi, la génération d'un MNS à partir d'images Pléiades est désormais accessible et opérationnelle pour un plus grand nombre d'utilisateurs.

En soustrayant le sol, dérivé d'un MNT, au sursol, dérivé du MNS, il est possible de générer un MNH à très haute résolution spatiale dont la précision verticale altimétrique varie en fonction de la pente et du couvert végétal. En milieu forestier, la précision verticale du MNH varie de 0,5 m pour les feuillus à 2 m pour les conifères (Belouard et al., 2015 ; Goldbergs, 2021), voire à plus de 3 m en cas de pentes supérieures à 50° (Piermattei et al., 2019). En milieu non forestier, la précision verticale du MNH dérivé des images Pléiades est meilleure, d'un ordre sub-métrique (Dupuy et al., 2024 ; Goldbergs, 2021). En milieu côtier, une étude appliquée sur des dunes non végétalisées a souligné que la précision altimétrique dérivée d'une acquisition stéréoscopique Pléiades varie de 0,35 à plus de 0,50 m sur les pentes ombragées en raison de la faible texture des images (Almeida et al., 2019).

La précision verticale du MNH dérivé d'images Pléiades dépend aussi de la saison et des paramètres d'acquisition. Plusieurs études ont souligné que la précision verticale était fortement dégradée quand l'acquisition des images était effectuée en saison de dormance de la végétation (Goldbergs, 2021 ; Piermattei et al., 2019). Parmi les paramètres d'acquisition, le rapport B/H (*base to height*) est le plus impactant : des études utilisant des images Pléiades acquises avec un faible angle d'incidence ($< 25^\circ$) soulignent qu'une faible valeur B/H (0,2 – 0,4) est préférable pour caractériser la hauteur de végétation en milieu forestier (Belouard et al., 2015 ; Goldbergs, 2021 ; Piermattei et al., 2018) alors que des valeurs plus élevées (> 0.5) sont plus adaptées en milieu non forestiers (Goldbergs, 2021 ; Perko et al., 2019).

La précision du MNH dépend aussi de celle du MNT utilisé pour soustraire les points sols. Deux approches, qui se distinguent par la source du MNT utilisé, sont généralement employées pour générer un MNH. La première approche, extrinsèque, vise à soustraire les valeurs du MNS Pléiades à celles d'un MNT externe généré à partir de données LiDAR aéroportées. Cette approche a par exemple été appliquée pour caractériser la hauteur d'occupation des sols sur l'île de Mayotte (Dupuy et al., 2024). L'atout principal de cette approche réside dans la précision altimétrique du MNT, de l'ordre de 0,2 m (Pauthonnier & Lamarre, 2012), qui repose sur la capacité du signal LiDAR à caractériser la microtopographie, y compris sous couvert végétal (Rapinel et al., 2015). Elle présente toutefois l'inconvénient de cumuler les erreurs altimétriques du MNS et du MNT. Cette question peut être résolue par la mise en œuvre de la seconde approche, intrinsèque, qui consiste à extraire directement le MNT à partir du MNS. Pour cela, une des méthodes les plus populaires repose sur le principe de simulation de « lâché de drap multi-échelle » (Zhang et al., 2016). Cette méthode a récemment été implémentée dans le logiciel libre « Bulldozer » développé par le CNES, et qui est particulièrement adapté à l'extraction de MNT à partir de MNS bruités tels que ceux générés à partir d'images Pléiades (Lallement et al., 2023). Ce logiciel qui a récemment permis de produire des MNT de grande qualité dans des milieux variés (Lallement et al., 2022), n'a pas encore été testé pour calculer la hauteur de végétation.

Le MNH, qui caractérise la structure verticale des végétations naturelles, apparaît comme une variable complémentaire aux bandes spectrales classiquement utilisées pour discriminer ces végétations (Rapinel & Hubert-Moy, 2021). Contrairement aux MNH dérivés de données aéroportées LiDAR acquises généralement à des pas de temps décennaux, les MNH dérivés des images Pléiades peuvent être générés fréquemment grâce à la fréquence de revisite élevée de Pléiades (plusieurs acquisitions sans nuages par an), qui offre l'opportunité d'un suivi interannuel de la structure verticale de la végétation en n'importe quel point de la Terre. En milieu naturel, l'apport du MNH

dérivé d'images Pléiades a surtout été montré pour caractériser les végétations arborées (Belouard et al., 2015; Goldbergs, 2021; Piermattei et al., 2018). Pourtant, si la précision verticale attendue du MNH dérivé d'images Pléiades ($\pm 0,50$ m) est trop faible pour discriminer tous les types de végétations, elle est restée a priori suffisante pour en discriminer un certain nombre, en particulier dans les milieux littoraux dominés par des habitats naturels de dunes, pelouses et landes littorales, dont la hauteur de végétation varie de 0,1 à 4,5 mètres.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'intérêt d'utiliser des images tri-stéréoscopiques Pléiades pour caractériser la structure verticale de végétations naturelles herbacées, chaméphytiques et arbustives en bordure de falaises littorales sur un site localisé en Bretagne (France). Trois questions de recherche sont posées : (i) quelle est la meilleure approche pour extraire le MNH à partir du MNS ? (ii) la pente a-t-elle un effet sur la précision du MNH ? et (iii) la précision du MNH est-elle suffisante pour discriminer les habitats naturels de dunes, landes et falaises ? Pour cela, un MNS a été généré en utilisant le service *DSM-OPT* à partir d'images tri-stéréoscopiques Pléiades acquises au cours de l'été 2021 dans le cadre du dispositif DINAMIS, et de relevés floristiques collectés simultanément.

2. Matériel et méthode

2.1 Site d'étude

Le site d'étude, d'une superficie de 22 km², correspond au Cap de la Chèvre, au sud de la presqu'île de Crozon en Bretagne, à l'ouest de la France. Le relief est caractérisé par des altitudes comprises entre 0 et 103 mètres. Il s'agit d'un site protégé, classé en zone Natura 2000 (FR5300019) en raison notamment de la présence d'habitats d'intérêt communautaire de landes, dunes et pelouses littorales (Hardegen & Bioret 2000, Hardegen et al., 2008). La cartographie des habitats naturels de ce site est un enjeu majeur pour leur gestion conservatoire voire leur restauration dans les sites sur-fréquentés (Keraudren-Aymonin & Aymonin, 1984 ; Le Roy et al., 2019).

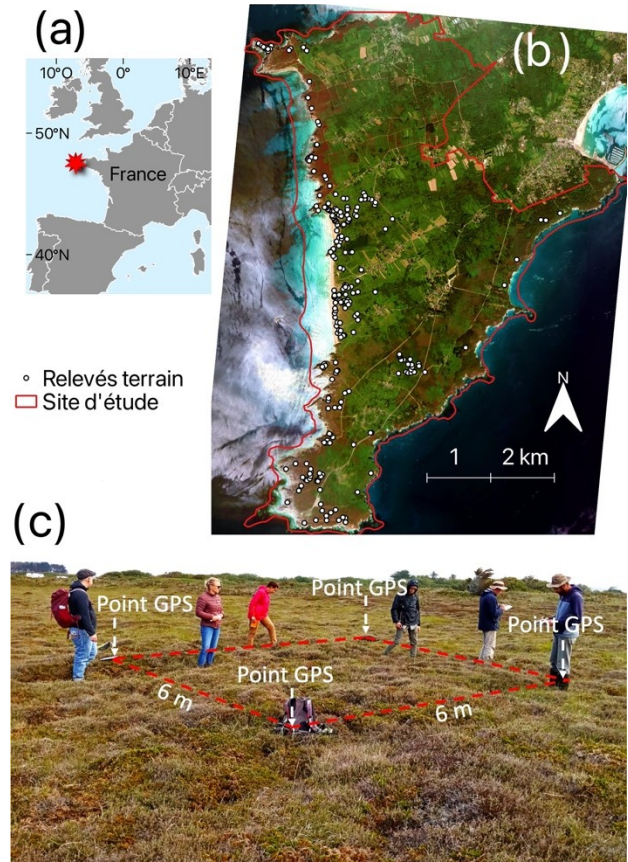


Figure 1 : Présentation du site d'étude et des données : (a) localisation globale, (b) composition colorée de l'image Pléiades (@ CNES) avec les contours du site Natura 2000 et les relevés terrain, (c) collecte d'un relevé floristique au sein d'un habitat de landes (crédit photo : les auteurs).

2.2 Données

2.2.1 Images Pléiades

Une acquisition tri-stéréoscopique Pléiades a été effectuée le 19/07/2021 dans le cadre du dispositif DINAMIS (<https://dinamis.data-terra.org/produits-pleiades/>) (Figure 1). Les images panchromatiques (PAN) et multispectrales (XS) ont été acquises simultanément par le capteur PHR 1A en mode tri-stéréo. Les images ont été délivrées au format DIMAP dans le système de projection WGS 84 avec une correction des distorsions géométriques (niveau SENSOR) mais sans correction radiométrique (niveau BASIC). Les caractéristiques détaillées de ces images sont présentées dans le tableau 1. Les images ont été acquises le 19 juillet 2021. Le rapport B/H est de 0,21 entre l'image 1 et l'image 2, 0,54 entre l'image 1 et l'image 3, et 0,33 entre l'image 2 et l'image 3.

	Image 1	Image 2	Image 3
Heure d'acquisition	11h33'39	11h33'58	11h34'29
Orientation azimutale	180,01°	179,91°	179,98°
Incidence moyenne	18,32°	12,46°	20,24°
Angle de vue à travers l'orbite	10,51°	10,99°	11,69°
Angle de vue le long de l'orbite	13,12°	2,61°	-14,13°
Résolution spatiale	0,76 × 0,75 m	0,72 × 0,74 m	0,75 × 0,78 m

Tableau 1 : Caractéristiques de l'acquisition stéréoscopique Pléiades du 19 juillet 2021.

2.2.2 MNT

Un MNT provenant du RGE ALTI (IGN ®) à un pas de grille de 1 m a été utilisé. Sur le site d'étude, le RGE ALTI a été dérivé de données LiDAR provenant du capteur topographique ALTM31000AE-IGN et acquises entre le 30 juillet 2011 et le 20 février 2012 dans le cadre du projet Litto3D® (SHOM/IGN). La précision verticale (erreur moyenne absolue) du MNT a été estimée à 0,28 m sur la base de cinq bornes géodésiques de l'IGN (<https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/bornes-geodesiques-ign/>) localisées sur des zones végétalisées (pelouses, landes, ...). La pente du sol a été calculée en degrés à partir du MNT, et rééchantillonnée à 5 m afin d'assurer la cohérence avec la surface des relevés floristiques.

2.2.3. Relevés floristiques

Un total de 181 relevés floristiques a été collecté entre le 26/06/2021 et le 29/09/2021 dans le cadre de cette étude. Pour chaque relevé, la hauteur moyenne de végétation, basée sur une vingtaine de mesures à l'échelle de l'individu (plante), et la composition floristique, basée sur un indice d'abondance de chaque espèce, ont été caractérisées au sein d'un quadrat de 6 × 6 m (Figure 1). Les coins des quadrats ont été géolocalisés à l'aide d'un GPS avec une précision horizontale moyenne de 1,6 m, puis chaque relevé floristique a été représenté sur une couche SIG par un point localisé au centre de son quadrat.

2.3 Modèle numérique de surface (MNS)

2.3.1 Création du MNS avec DSM-OPT

Le MNS a été généré à 0,5 m de résolution horizontale et reprojeté dans le système de projection Lambert-93 (code EPSG 2154) à partir des trois images Pléiades en utilisant le service DSM-OPT qui est principalement basé sur le logiciel MicMac (Rupnik et al., 2018). Les valeurs des paramètres de configuration utilisés pour produire le MNS sont présentées dans le tableau 2. Plus précisément, le paramètre « Aligner le MNS » corrige les décalages relatifs ainsi que les erreurs de

géolocalisation verticales et horizontales en alignant le MNS relatif sur une grille d'altitudes absolues du MNS Copernicus EEA10 (<https://cis2.eea.europa.eu/data/491>), alors que le paramètre « Incertitude en Z » régule la plage d'altitude (Z, en mètres) où s'effectue la correspondance.

Les valeurs de 3 paramètres ont été adaptées aux caractéristiques de la végétation du site d'étude en suivant les recommandations de la documentation de DSM-OPT. Premièrement, le facteur de résolution a été abaissé à 1 (contre 2 pour la valeur fixée par défaut) pour conserver la très haute résolution horizontale des images Pléiades et ainsi mieux détecter les petits patches de végétation. En contrepartie, l'abaissement du facteur de résolution a aussi engendré un peu de bruit. Deuxièmement, la taille de la fenêtre de corrélation a été abaissée à 3×3 (contre 5×5 pour la valeur fixée par défaut), afin de conserver des variations topographiques fines qui traduisent des variations de végétation pouvant être utiles pour la discrimination des habitats naturels même si cet abaissement génère davantage de bruit (Rosu et al., 2014). Troisièmement, le facteur de régularisation a été abaissé à 0,01 (contre 0,1 pour la valeur fixée par défaut), afin de limiter le lissage et de préserver la variation altimétrique de la végétation.

Paramètre	Valeur
Fenêtre temporelle	300 secondes
Écart d'angles d'incidences le long de l'orbite	0,05 degrés
Taux de recouvrement	70 %
Type de paysage	'Paysage littoral'
Facteur de résolution du MNS	1
Créer des ortho-images individuelles	OUI
Créer une ortho-mosaïque	OUI
Générer un nuage de points	OUI
Aligner le MNS	OUI
Masquer les surfaces en eau	OUI
Taille de la fenêtre de corrélation	3 x 3 pixels
Facteur de régularisation	0,01
Incertitude en Z	0,1
Seuil de précision potentielle	0,4
Seuil de décorrélation	0,2

Tableau 2 : Valeurs des paramètres de recherche stéréoscopique (en gris foncé) et de calcul (gris clair) de l'outil DSM-OPT sélectionnées dans cette étude. Les valeurs non définies par défaut sont en gras.

2.3.2 Correction géométrique du MNS

Le MNS généré à partir du service de DSM-OPT présente des décalages géométriques horizontaux de plusieurs mètres par rapport au RGE ALTI ©, en particulier sur les secteurs de forte pente, et ce malgré l'activation de l'option « Aligner le MNS ». En effet, la précision de la géolocalisation absolue théorique de l'imagerie Pléiades est généralement estimée à 8,5 m au nadir en appliquant le modèle de coefficient polynomial rationnel (RPC) fourni par Airbus Defense (Perko et al., 2018). C'est pourquoi la précision géométrique horizontale du MNS doit être améliorée, en corrigeant notamment les effets du relief à partir de points d'amer supplémentaires (Perko et al., 2019).

La correction géométrique horizontale du MNS a été réalisée à partir du RGE ALTI © 1m, en sélectionnant 66 points d'amer sélectionnés par interprétation visuelle sur les croisements des routes et de chemins pédestres. Une transformation de type polynomiale 1 et un rééchantillonnage bi-cubique ont été appliqués, améliorant significativement la précision géométrique du MNS (RMSE 1,7 m).

2.4 Modèle de hauteur de végétation (MNH)

2.4.1. Approche extrinsèque « RGE ALTI@ »

Le MNH a été généré en soustrayant les valeurs du MNT issu du RGE ALTI © 1M (préalablement

rééchantillonné à un pas de 0,5 m) à celles du MNS. La vérification des valeurs altimétriques du MNH sur les routes et les parkings ayant mis en évidence une sous-estimation altimétrique de quelques mètres, une valeur de compensation a été ajoutée à tous les pixels. Afin de déterminer la valeur altimétrique optimale de compensation, toutes les valeurs comprises entre 0 et 3 m, avec un pas de 0,1 m, ont été testées sur le MNH. La valeur de 1,9 m a finalement été retenue car c'est la valeur qui engendrait la plus faible erreur (biais de 0,02 par rapport aux hauteurs des relevés floristiques) sur le MNH. Un filtre médian avec une fenêtre glissante de taille 3x3 a ensuite été appliqué sur le MNH pour supprimer le bruit résiduel.

2.4.2. Approche intrinsèque « Bulldozer »

Un MNT a d'abord été extrait à partir du MNS à l'aide du logiciel libre Bulldozer version 1.1.0 (Lallement et al., 2023). Puis, un MNH a été généré en soustrayant les valeurs de ce MNT à celle du MNS. Le logiciel Bulldozer offre la possibilité de modifier les valeurs de plusieurs paramètres : en plus de la configuration par défaut, quatre autres configurations, basées sur plusieurs valeurs de paramètres ont été testées (Tableau 3). En particulier, la valeur de la pente maximale observée sur le terrain a été fixée à 75% (soit 37°), ce qui correspond à la valeur de pente maximale mesurée sur le terrain au niveau des relevés floristiques. Suivant les conseils indiqués sur la documentation (<https://github.com/CNES/bulldozer/blob/master/conf>), les valeurs des paramètres fondamentaux n'ont pas été modifiés. Un filtre médian avec une fenêtre de taille 3x3 a également été appliqué sur le MNH issu de chacune des cinq configurations. La configuration, qui présentait la plus faible valeur de biais (-0,01), a finalement été retenue (Configuration 5).

2.4.3. Évaluation de la précision du MNH

Pour chacune des deux approches, la précision du MNH a été évaluée en calculant l'erreur moyenne absolue (*mean absolute error*, MAE), la déviation standard (*standard deviation*, std), la significativité (test de *Pearson*), le biais, et la racine de l'erreur quadratique moyenne (*root mean square error*, RMSE) entre la hauteur de végétation mesurée sur les relevés floristiques et la valeur du MNH. Huit relevés floristiques ont été écartés : un relevé en raison d'une erreur de saisie, trois relevés de végétation arborée en raison de l'hétérogénéité altimétrique de la végétation mesurée sur le terrain (écart-type > 6 m), et quatre relevés en raison de l'absence de valeur sur le MNH en bordure de falaise. Au total, 173 relevés ont été conservés pour l'analyse.

Paramètre	Configuration				
	1	2	3	4	5
<i>Foreground max object size (in meter)</i>	16	16	16	16	16
<i>Altimetric height accuracy of the input DSM (m)</i>	1,0	1,0	0,2	0,2	1,0
<i>Maximum slope of the observed landscape terrain (%)</i>	20,0	75,0	75,0	75,0	75,0
<i>Activate the ground pre-detection</i>	<i>False</i>	<i>False</i>	<i>False</i>	True	True
<i>cloth_tension_force</i>	3	3	3	3	3
<i>prevent_unhook_iter</i>	10	10	10	10	10
<i>num_outer_iter</i>	25	25	25	25	25
<i>num_inner_iter</i>	5	5	5	5	5

Tableau 3 : Valeurs des paramètres testées pour chacune des cinq configurations de l'approche « Bulldozer » : options (gris clair), paramètres avancés (gris moyen), paramètres fondamentaux (gris foncés). Les valeurs non définies par défaut sont en gras.

2.5 Effet de la pente sur la précision du MNH

La pente calculée sur les relevés floristiques varie entre 0° et 37°, avec une valeur médiane s'élevant à 5°. Afin d'estimer l'effet de la pente sur la précision du MNH, l'erreur absolue entre la valeur du MNH et la hauteur de végétation mesurée *in situ* a été calculée pour chaque relevé. Puis, la relation entre la valeur de pente et l'erreur absolue a été analysée en calculant un test de significativité (*Pearson*).

2.6. Discrimination des habitats naturels avec le MNH

Un type d'habitat naturel a été assigné automatiquement à chaque relevé floristique au niveau 3 de la nomenclature européenne EUNIS (*European Nature Information System*) sur la base de sa composition floristique et de ses caractéristiques environnementales (Chytrý et al., 2020). Cette assignation a été validée *a posteriori* à dire d'expert par des botanistes. Les types d'habitats représentés par moins de trois relevés ainsi que les relevés sans habitat assigné ont été supprimés, ce qui a réduit le nombre de relevés à 158 répartis en 10 habitats naturels (Tableau 3).

Afin d'évaluer la discrimination des habitats naturels avec le MNH, une analyse de variance (ANOVA) permutée avec 5000 itérations a été effectuée entre la valeur du MNH, issu de chacune des deux approches, et le type d'habitat. Cette méthode tient compte des différences entre les distributions au sein des habitats naturels (Anderson, 2014). L'ANOVA permutée de type III (somme des carrés) a été choisie, en raison de la variation du nombre de relevés (Shaw et Mitchell-Olds, 1993). Le pourcentage de variance du MNH expliquée par les types d'habitats naturels a été calculé avec l'indice η^2 , qui correspond au rapport entre la somme des carrés d'un facteur et la somme totale des carrés (Cohen, 2008).

Code	Intitulé	<i>n</i>	Hauteur de végétation
N13	Dunes côtières mobiles de l'Atlantique et de la Baltique	30	0,4 m ± 0,2
N15	Pelouses des dunes côtières fixées (dunes grises) de l'Atlantique et de la Baltique	16	0,2 m ± 0,1
N19	Landes à <i>Calluna</i> et <i>Ulex</i> des dunes côtières de l'Atlantique	46	0,2 m ± 0,2
N34	Falaises littorales à substrat meuble de l'Atlantique et de la Baltique	9	0,1 m ± 0,0
R1A	Pelouses calcicoles vivaces semi-sèches	4	0,2 m ± 0,1
R22	Prairies de fauche de basse et moyenne altitudes	7	0,3 m ± 0,1
R54	Végétations à <i>Pteridium aquilinum</i>	18	0,8 m ± 0,4
S32	Fourrés à <i>Rubus</i> tempérés	9	0,7 m ± 0,2
S92	Fourrés des bas-marais à <i>Salix</i>	8	0,7 m ± 0,2
T1F	Forêts de ravin	11	4,5 m ± 3,0

Tableau 3 : Code et description des habitats naturels côtiers assignés aux relevés floristiques selon la typologie EUNIS (Chytrý et al., 2020). *n* = nombre de relevés floristiques. La hauteur de végétation est exprimée par sa moyenne et son écart type à l'échelle de l'individu (plante).

3. Résultats

3.1 Précision verticale du MNH

Si, pour les deux approches, une corrélation significative est observée entre la hauteur de végétation mesurée sur le terrain et celle estimée à partir du MNH, le MNH généré par l'approche extrinsèque « RGE ALTI® » est plus précis que celui généré par l'approche intrinsèque « Bulldozer » (Figure 2). Par exemples, les valeurs de MAE sont de 0,47 et 1,12, et les valeurs de RMSE sont de 0,68 et 1,82, respectivement pour l'approche extrinsèque « RGE ALTI® » et l'approche « Bulldozer ». Par ailleurs, une

sous-estimation de la hauteur des végétation arborées (> 4m) est visible pour les deux approches.

Les cartes de MNH issues des deux approches permettent d'observer la variation de hauteur de végétation à une très haute résolution spatiale sur un secteur de falaise littorale (Figure 3). Le patron spatial du MNH généré par l'approche extrinsèque « RGE ALTI® » est cohérent avec celui de la végétation visible sur la composition colorée Pléiades (® CNES), en particulier sur les végétations chaméphytiques et arbustives.

Concernant l'effet de la pente sur la précision du MNH, il diffère selon les deux approches : non significatif (p-value 0,33) pour l'approche extrinsèque « RGE ALTI® », il est à l'inverse significatif (p-value 0,004) pour l'approche intrinsèque « Bulldozer ». L'analyse des figures 2 et 3 montre que le MNH généré à partir de l'approche intrinsèque « Bulldozer » surestime largement la hauteur de la végétation rase des falaises (pentes > 20°), contrairement au MNH généré en utilisant l'approche extrinsèque « RGE ALTI® ».

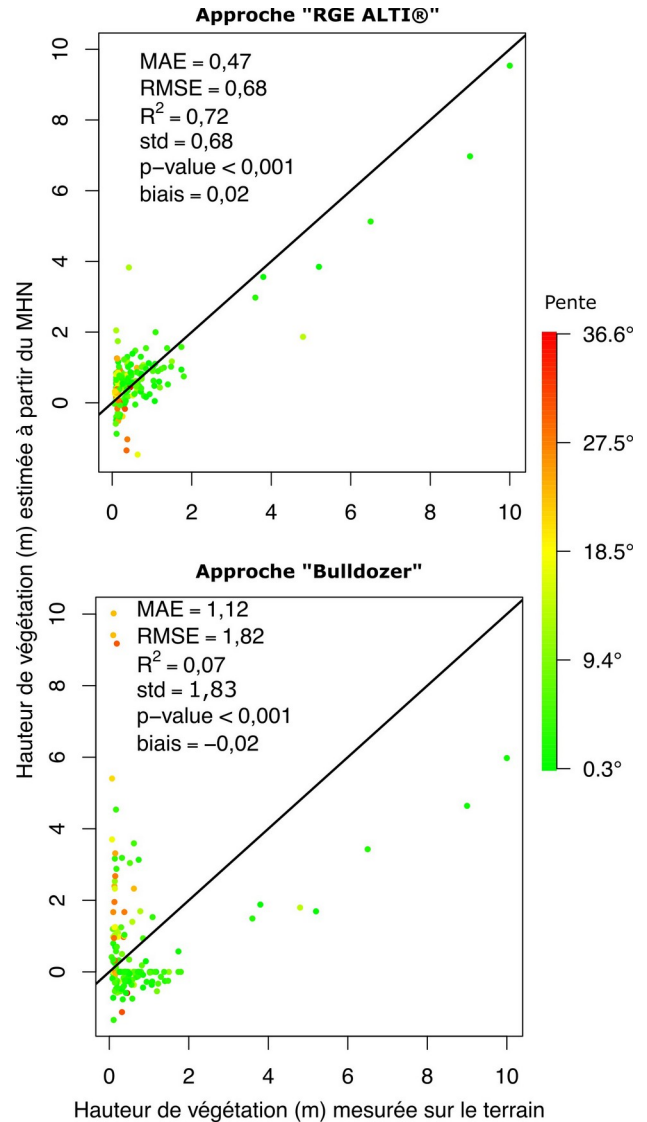


Figure 2 : Relation entre la hauteur de végétation estimée à partir des images tri-stéréoscopiques Pléiades et celle mesurée sur le terrain. MAE = *mean absolute error*, RMSE: *root mean square error*, std: *standard deviation*.

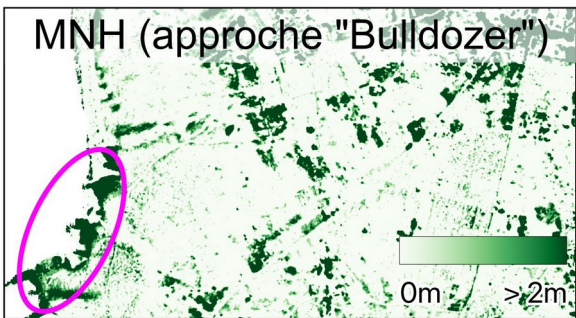
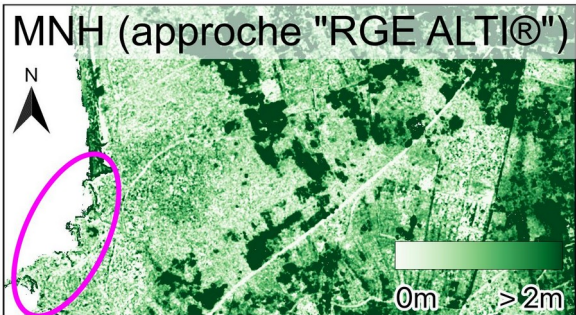
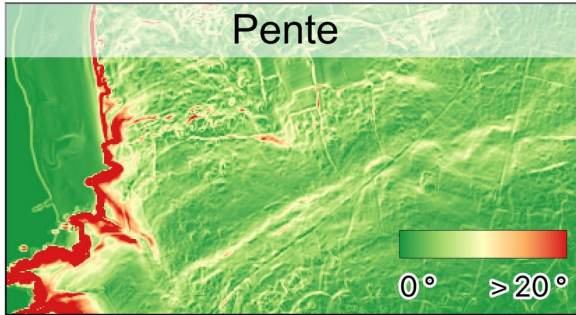


Figure 3 : Effet de la pente sur la précision altimétrique du MNH dérivé des images tristéoscopiques Pléiades (© CNES) en fonction de l'approche utilisée. L'ellipse rose indique une zone de forte pente en bordure de falaise sur laquelle la hauteur de végétation est surestimée par l'approche intrinsèque « Bulldozer ».

3.2 Discrimination des habitats naturels

Les résultats de l'ANOVA montrent une relation significative entre la hauteur de végétation issue du

MNH et les types d'habitats pour les deux approches (Tableau 4). Cependant, la part de la variance du MNH expliquée par les habitats naturels est importante (η^2 0,43) pour l'approche extrinsèque « RGE ALTI® », mais faible (η^2 0,11) pour l'approche intrinsèque « Bulldozer ».

	Approche « RGE ALTI® »		Approche « Bulldozer »	
	Habitats naturels	Résidus	Habitats naturels	Résidus
Somme des carrés	97,2	127,5	51,8	428,6
Degré de liberté	9	148	9	148
Carré moyen	10,8	0,9	5,7	2,9
Valeur F	12,5		2,0	
p-value	< 0,001		0,04	

Tableau 4 : Résultats de l'ANOVA permutée entre la hauteur de végétation estimée à partir des images Pléiades et les types d'habitats naturels.

La figure 4, qui montre la variation des hauteurs de végétation du MNH, généré par l'approche extrinsèque « RGE ALTI® », en fonction des habitats naturels, met en évidence un gradient cohérent avec la hauteur de végétation moyenne mesurée sur le terrain, à l'exception des habitats N13 et R1A (Tableau 3) : les hauteurs de végétation les plus faibles sont observées pour l'habitat N34 (hauteur médiane 0,3 m) et les plus élevées le sont pour l'habitat T1F (hauteur médiane 3,0 m). Toutefois, les variations de hauteur sont importantes pour certains habitats. Par exemple, l'habitat N19 présente des valeurs comprises entre 0,1 m (Q1) et 0,9 m (Q3) et l'habitat R1A présente des valeurs comprises entre 0,2 (Q1) et 0,7 (Q3). De plus, des valeurs du MNH sont négatives pour les habitats assez ras tels que N19, R1A et N13 car leur hauteur de végétation (0,2 – 0,4 m) est inférieure à la précision verticale du MNH (0,47 m).

4. Discussion

4.1 Précision altimétrique du MNH

La précision altimétrique du MNH élaboré dans cette étude sur un site côtier couvert par des végétations non-forestières, qui est de l'ordre de 0,5 m, est similaire à ce qui a été rapporté en milieu boréal non-forestier (Goldbergs, 2021). De même, la corrélation entre les mesures terrain et le MNH est similaire à celle observée dans des paysages agricoles tropicaux (Rançon et al., 2015). Une telle précision a pu être

atteinte grâce à des paramètres d'acquisition Pléiades optimaux, en particulier la saison de végétation (optimum phénologique), un faible angle d'acquisition ($\leq 20^\circ$), et le rapport B/H élevé (0,54) qui est particulièrement bien adapté aux milieux non-forestiers (Goldbergs, 2021; Perko et al., 2019).

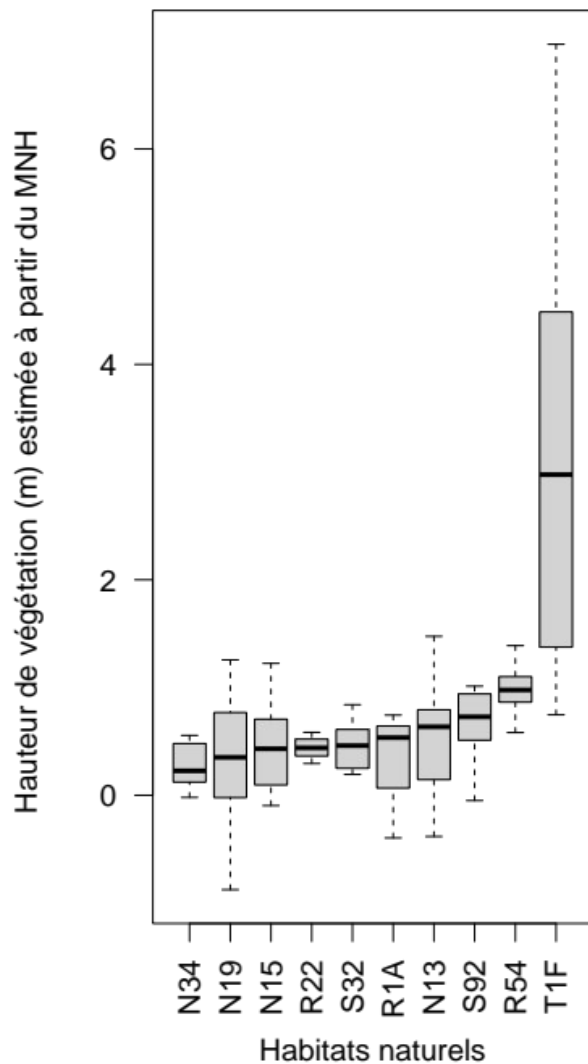


Figure 4 : Variation de la hauteur de végétation estimée depuis les images tri-stéréoscopiques Pléiades en fonction du type d'habitat naturel. La description de chaque habitat est détaillée dans le tableau 3.

La précision altimétrique du MNH est aussi dépendante de sa précision horizontale (Perko et al., 2018). La précision de géolocalisation horizontale initiale du MNS dérivé d'images Pléiades étant théoriquement de 9 m, une étape de correction des effets du relief doit être

appliquée afin d'atteindre une précision moyenne d'un ordre métrique (Rançon, 2015, Piermattei et al., 2018). Dans le cadre de cette étude, cette étape longue et fastidieuse a nécessité la collecte de 66 points d'amer pour atteindre une précision horizontale acceptable (1,7 m) au regard du pas de grille original du RGE ALTI® (1,0 m) et de la superficie des relevés floristiques (6×6 m).

Par ailleurs, nous avons cherché à comprendre si l'erreur systématique d'environ - 2 m observée sur le MNH généré à partir de l'approche extrinsèque pouvait être expliquée par un problème de référentiel entre le MNS Pléiades, qui est aligné sur le MNS Copernicus EEA10 (<https://cis2.eea.europa.eu/data/491>) dont le système de projection verticale est l'EGM2008 (code EPSG 3855), et le RGE ALTI, dont le système de projection verticale est le NGF-IGN69 (code EPSG 5720). La comparaison des grilles de conversion altimétriques du modèle géoïde de ces deux systèmes de projection a montré une différence moyenne de + 0,94 m et un faible écart type (0,02), ce qui infirme cette hypothèse. La faible valeur de l'écart type montre que le biais généré par une correction constante sur l'ensemble du site d'étude est négligeable. Nous pensons que cette erreur systématique pourrait provenir du niveau de précision horizontale (<6m) et verticale (<4m) du MNS Copernicus EEA10 qui a été utilisé pour aligner le MNS Pléiades.

La précision altimétrique du MNH dépend non seulement de celle du MNS mais aussi de celle du MNT. Cette étude montre que l'approche extrinsèque basée sur l'utilisation du RGE ALTI® surpasse l'approche intrinsèque basée sur l'utilisation du logiciel Bulldozer. Ces résultats peuvent s'expliquer par la faible performance du logiciel Bulldozer sur les zones de forte pente ($>20^\circ$), qui entraîne une surestimation des valeurs de MNH. Les cinq tests de paramétrisation réalisés dans cette étude ont montré que le changement de la valeur du paramètre « *Maximum slope of the observed landscape terrain (%)* » n'a pas d'impact sur les valeurs du MNH. Ces résultats peuvent aussi s'expliquer par le type de données utilisées pour détecter le sol. Les échos des données LiDAR utilisées dans l'approche extrinsèque pénètrent en partie le couvert végétal, alors que les images optiques Pléiades, utilisées dans l'approche intrinsèque, ne permettent d'observer que la surface de la canopée en contexte de couvert végétal dense.

La modification des paramètres configurés par défaut dans DSM-OPT peut également avoir une influence sur la taille de maille d'échantillonnage du MNH, étant donné que ces paramètres contrôlent le lissage et permettent de reconstituer plus ou moins finement les variations altimétriques selon le paramétrage choisi. La petite taille de fenêtre de corrélation (3x3) et le faible facteur de régularisation (0,01) utilisés dans cette étude pour la production du MNS ont permis de conserver des discontinuités topographiques fines,

mais ont généré du bruits (valeurs aberrantes) qui a été éliminé *a posteriori* à l'aide d'un filtre médian. De ce fait, le choix du paramétrage doit être adapté au site d'étude. Par exemple, la taille des fenêtres de corrélation doit être en rapport avec la surface des patchs d'habitats naturels. Sur notre site d'étude, qui comporte de fortes variations de hauteur de végétation, une fenêtre de corrélation de petite taille (3x3) a permis de conserver la variabilité altimétrique des habitats naturels sur le MNS.

4.2 Intérêt des images tri-stéréoscopiques Pléiades pour l'étude des habitats naturels côtiers

Le MNH généré à partir des images tri-stéréoscopiques Pléiades selon l'approche extrinsèque a permis de caractériser la structure verticale de la végétation à une résolution spatiale de 0,50 m et une précision altimétrique de 0,47 m, et ceci sans qu'il soit impacté par la pente, ce qui appuie les conclusions de Piermattei et al. (2019). Cette absence de dépendance met en exergue l'intérêt d'utiliser des images tri-stéréoscopiques Pléiades pour identifier et suivre les habitats côtiers, notamment ceux qui sont localisés sur de fortes pentes ($> 20^\circ$) en bordure de falaises. Il convient de noter que la plupart des relevés de végétation sont localisés sur des pentes orientées ouest ou sud et sont donc ensoleillées au moment de l'acquisition des images (11h33 en été), ce qui a facilité l'identification de points de correspondance dans le triplet Pléiades. La précision du MNH est probablement plus faible sur les pentes ombragées (Almeida et al., 2019, Piermattei et al., 2019).

Cette étude a souligné qu'une grande part de la variance du MNH (43%) était expliquée par types d'habitats côtiers, ce qui confirme l'intérêt du MNH pour discriminer les habitats naturels en vue de leur cartographie. Cette étude a ainsi montré qu'une précision altimétrique de l'ordre de 0,5 m était suffisante pour discriminer correctement certains habitats prairiaux (Figure 4) telles que les prairies de fauche de basse et moyenne altitudes (R22) et les végétations à *Pteridium aquilinum* (R54). Si le MNH ne permet pas à lui seul de discriminer tous les habitats, il peut être utilisé comme une variable prédictive complémentaire aux variables spectrales pour classer les habitats naturels à une échelle spatiale suffisamment détaillée pour détecter les petits patchs de végétation (Figure 6). Toutefois, l'analyse détaillée du MNH a fait apparaître des valeurs altimétriques biaisées (négativement ou positivement), ce qui confirme que ces valeurs doivent être considérées comme des hauteurs de végétation relatives et non réelles (Dupuy et al., 2024). Par ailleurs, comme le MNH fait ressortir la structure verticale à une échelle fine, il pourrait être utilisé comme un indicateur de l'état de conservation des habitats côtiers (Delbosc et al., 2021) et pour le suivi à moyen et long terme de leur dynamique dans le contexte des changements globaux.

4.3 L'usage du service DSM-OPT

Le service DSM-OPT présente l'avantage de générer des MNS en ligne gratuitement, de manière rapide et sans avoir besoin de télécharger les images Pléiades mises à disposition par DINAMIS. Dans cette étude le MNS a été généré à 0,5 m de résolution spatiale sur une zone de 22 km² en seulement 180 minutes. Le service donne accès à une interface graphique claire et intuitive qui a permis de produire aisément le MNS. Cependant, l'aide mise à disposition est peu explicite sur le paramétrage du mode expert, comprenant notamment la taille de la fenêtre de corrélation et le facteur de régularisation. Pour ces paramètres, DSM-OPT renvoie à la publication scientifique faisant référence au logiciel MicMac® (Rupnik et al., 2018), mais celle-ci est difficilement accessible aux non-spécialistes en photogrammétrie. De ce fait, le paramétrage optimal du mode expert de DSM-OPT, qui influe sur la précision du MNS, est assez difficile à déterminer. Dans cette étude, le choix des paramètres a été effectué selon une procédure *trial-and-test* sur un extrait du site d'étude. Par ailleurs, le code de l'outil DSM-OPT n'est à notre connaissance pas accessible, ce qui ne permet pas de connaître précisément la méthode utilisée par exemples pour combiner le triplet Pléiades ou aligner le MNS.

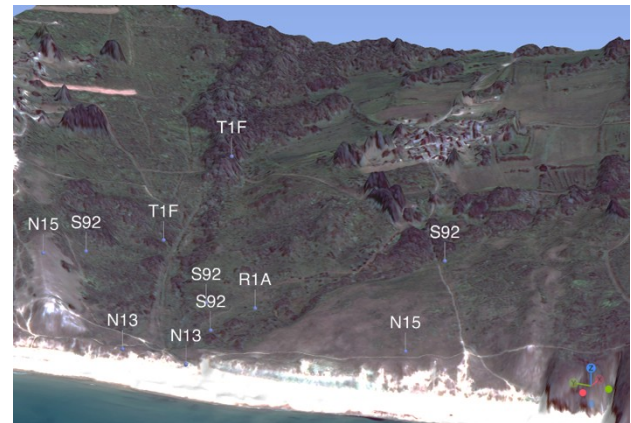


Figure 6 : Superposition de l'image Pléiades (CNES®) et des relevés floristiques sur le modèle numérique de surface (MNS) dérivé des images tri-stéréoscopiques à l'aide du service en ligne DSM-OPT (exagération verticale $\times 3$).

5. Conclusion

Cette étude a souligné l'apport des images tri-stéréoscopiques Pléiades pour caractériser la hauteur des végétations côtières, y compris sur de petits patchs de végétation situés en bordure de falaise. Le MNH obtenu par une approche extrinsèque (soustraction du RGE ALTI © au MNS Pléiades) est plus précis que celui obtenu par une approche intrinsèque (logiciel Bulldozer), en particulier dans les zones de forte pente. Si le MNH ne permet pas à lui seul de discriminer tous les habitats naturels, il constitue une variable complémentaire aux variables spectrales classiquement utilisées pour les cartographier. Cette

étude a aussi montré l'intérêt et l'accessibilité du service en ligne DSM-OPT pour générer rapidement un MNS à partir d'images Pléiades. Les futures recherches porteront sur (i) une analyse de sensibilité des paramètres de l'outil DSM-OPT sur la précision du DSM, (ii) une analyse de l'effet de l'angle d'incidence sur la précision du DSM, et (iii) l'évaluation de l'apport des images tri-stéréoscopiques acquises par les nouveaux satellites Pléiades Neo, qui offrent une résolution spatiale encore plus élevée, pour caractériser encore plus précisément la structure verticale des végétations naturelles des habitats côtiers.

Remerciements

Cette étude a été financée par le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires dans le cadre des programmes « Évaluation de l'état de conservation des habitats côtiers et landicoles ». Les auteurs remercient Corentin Chevrollier, Ilse Lagrange, Erwan Glemarec et Linda Le Sollic (UBO) pour avoir effectué la collecte des relevés floristiques. Les auteurs remercient aussi le dispositif DINAMIS pour l'acquisition des images Pléiades.

Références

Almeida L. P., Almar R., Bergsma E. W., Berthier E., Baptista P., Gareil E., ... & Alves B., 2019. *Deriving high spatial-resolution coastal topography from sub-meter satellite stereo imagery*. Remote Sensing, vol. 11, n° 5, p. 590.

Belouard T., Py N., Maillot G., Guyon D., Mérédiu C., Pausader M., & Champion N., 2015. *Pinastéréo Estimation de la hauteur dominante et de la biomasse forestière dans le massif des Landes de Gascogne à partir d'images stéréoscopiques Pléiades*. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, n°209, pp. 133–139.

Chytrý M., Tichý L., Hennekens S. M., Knollová I., Janssen J. A., Rodwell J. S., Peterka T., Marcenò C., Landucci F., & Danihelka J., 2020. *EUNIS Habitat Classification: Expert system, characteristic species combinations and distribution maps of European habitats*. Applied Vegetation Science, vol. 23, n°4, pp. 648–675.

Delbosc P., Lagrange I., Rozo C., Bensettiti F., Bouzillé J.-B., Evans D., Lalanne A., Rapinel S., & Bioret F., 2021. *Assessing the conservation status of coastal habitats under Article 17 of the EU Habitats Directive*. Biological Conservation, vol. 254, p. 108935.

Delvit J.-M., & L'Helguen C., 2015. *Observer la Terre en 3D avec Pléiades-HR*. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, n°209, pp. 11–16.

Dupuy S., Lelong C., Gaetano R., & Villers A., 2024. *BIOTAMAYA. Rapport méthodologique pour la production des cartes d'occupation du sol – Mayotte en 2023, Montpellier France*, Rapport méthodologique, 78 p.

Gleyzes M. A., Perret L., et Kubik P., 2012. *Pleiades system architecture and main performances*. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XXXIX-B1, 537–542, <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B1-537-2012>.

Goldbergs G., 2021. *Impact of Base-to-Height Ratio on Canopy Height Estimation Accuracy of Hemiboreal Forest Tree Species by Using Satellite and Airborne Stereo Imagery*. Remote Sensing, vol. 13, n° 15, p. 2941.

Hardegen M. & Bioret F., 2000. *Contribution à l'étude phytosociologique des landes littorales du Finistère (Bretagne, France): le Cap de la Chèvre (presqu'île de Crozon) et l'île d'Ouessant*. Colloques Phytosociologiques XXVII « Les Données de la Phytosociologie Sigmatiste. Structure, Gestion, Utilisation », Bailleul 1997, pp. 155–167.

Hardegen M., Bougault C., & Quéré E., 2008. *La cartographie des habitats dans les sites Natura 2000 de Bretagne. Application aux landes littorales de l'île de Groix et de la presqu'île de Crozon*. Acta Botanica Gallica, vol.155, n°1, pp.153–159.

Keraudren-Aymonin M. & Aymonin G., 1984. *Un élément de l'érosion côtière : la dégradation accélérée des landes et pelouses climaciques de quelques sites de la presqu'île de Crozon, Finistère*. Études géographiques sur la Bretagne, Congrès des sociétés savantes (1982), n°107, pp. 79–86.

Lallement D., Lassalle P., Ott Y., Demortier R., & Delvit J., 2022. *Bulldozer: An automatic self-driven large scale dtm extraction method from digital surface model* The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 43, 409-415.

Lallement D., Lassalle P., et Ott Y., 2023. *Bulldozer, a free open source scalable software for dtm extraction*, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLVIII-4/W7-2023, pp. 89–94, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W7-2023-89-2023>.

Le Roy M., Sawtschuk J., Bioret F., Gallet S., 2019. *Toward a social-ecological approach to ecological restoration: A look back at three decades of maritime cliff-top restoration*. Restoration Ecology, vol.27, n°1, pp. 28–38.

Pauthonnier A., & Lamarre V., 2012. *Litto3D@ – v 1.0 Spécifications techniques*. Rapport technique, SHOM et IGN, 16 p.
https://services.data.shom.fr/static/specifications/Specifications-techniques-Litto3D_v1_0-Doc_v1_5.pdf

Perko R., Raggam H., & Roth P. M., 2019. *Mapping with Pléiades—End-to-End Workflow*. Remote Sensing, vol.11, n°17, p. 2052.

Perko R., Raggam H., Schardt M., & Roth P. M., 2018. *Very high resolution mapping with the Pleiades satellite constellation*. Am. J. Remote Sens, vol.6, n°2, pp.89–99.

Piermattei L., Marty M., Ginzler C., Pöchtrager M., Karel W., Ressler C., Pfeifer N., & Hollaus M., 2019. *Pléiades satellite images for deriving forest metrics in the Alpine region*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 80, pp.240–256.

Piermattei L., Marty M., Karel W., Ressler C., Hollaus M., Ginzler C., & Pfeifer N., 2018. *Impact of the Acquisition Geometry of Very High-Resolution Pléiades Imagery on the Accuracy of Canopy Height Models over Forested Alpine Regions*. Remote Sensing, vol.10, n°10, p. 1542.

Rançon F., 2015. *Production de modèles numériques de terrain et de hauteur à partir d'images satellites tristéoscopiques pour la cartographie et l'analyse des couverts végétaux arborés*. Mémoire de fin d'étude, Montpellier SupAgro, 92 p.

Rapinel S., Bonis A., Oszwald J., Taureau F., Mansons J., & Bouzillé J. B., 2015. *Cartographie des végétations herbacées des marais littoraux à partir de données topographiques lidar*. Revue française de Photogrammétrie et de Télédétection, n°210, pp.17-21.

Rosu, A-M., Pierrot-Deseilligny M., Delorme A., Binet R., et Klinger Y., 2015. *Measurement of Ground Displacement from Optical Satellite Image Correlation Using the Free Open-Source Software MicMac*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 100, pp. 48–59.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.03.002>.

Rupnik E., Pierrot-Deseilligny M., & Delorme A., 2018. *3D reconstruction from multi-view VHR-satellite images in MicMac*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 139, pp. 201–211.

Youssefi D., Lallement D., Hümmer C., Sarrazin E., Dubois E., & Delvit J.-M., 2024. *De Pléiades à Pléiades Neo : Une analyse de l'amélioration de la restitution 3D*. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, vol. 226, n°1, pp. 1–9.

Zhang W., Qi J., Wan P., Wang H., Xie D., Wang X., & Yan G., 2016. *An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation*. Remote sensing, vol. 8, n° 6, p. 501.

