

PINASTEREO – ESTIMATION DE LA HAUTEUR DOMINANTE ET DE LA BIOMASSE FORESTIERE DANS LE MASSIF DES LANDES DE GASCOGNE A PARTIR D'IMAGES STEREOSCOPIQUES PLEIADES

Thierry Bélouard^{1,2}, Nicolas Py³, Grégoire Maillet⁴, Dominique Guyon⁵,
Céline Meredieu⁶, Michel Pausader⁷, Nicolas Champion⁷

1 : Département de la santé des forêts, 33610 Cestas, Thierry.Belouard@bordeaux.inra.fr

2 : IGN, Direction interrégionale Sud-Ouest, 33160 Saint-Médard-en-Jalles

3 : IGN, Direction interrégionale Centre-Est, 69000 Lyon

4 : IGN, Direction des services et du système d'information, 94160 Saint-Mandé

5 : INRA, UMR1391 ISPA, 33140 Villenave d'Ornon

6 : INRA, UMR1202 BIOGECO, 33610 Cestas

7 : IGN Espace, 31520 Ramonville-Saint-Agne

Résumé

La futaie de pin maritime du Massif des Landes de Gascogne fait l'objet d'une sylviculture dynamique ; les dommages occasionnés par les tempêtes Martin (1999) et Klaus (2009) ont entraîné une forte diminution de la ressource en bois. La demande d'un suivi permanent et spatialisé de cette ressource s'en est trouvée renforcée. L'étude *Pinastéreo* ouvre des perspectives nouvelles en la matière grâce au modèle numérique de surface (MNS) obtenu par corrélation d'images stéréoscopiques Pléiades. Sa combinaison avec le modèle numérique de terrain BD Alti@ fournit un modèle numérique de hauteur de canopée (MNHC). La précision des MNS et MNHC, évaluée avec des mesures de référence (LiDAR aérien, placettes de levés dendrométriques), s'est avérée satisfaisante. La hauteur dominante des peuplements de pin maritime, leur volume aérien total et leur biomasse ont pu être modélisés à partir du MNHC. Une carte de la hauteur dominante, variable liée à la production des peuplements, a été produite sur un site de référence. Les faibles incertitudes observées sur les estimations de hauteur et de volume sont très prometteuses pour une généralisation de la méthode au Massif landais voire à d'autres futaies régulières résineuses.

Mots-clés : modèle numérique de surface, modèle numérique de hauteur de canopée, corrélation d'images, ressource forestière, futaie de pin maritime, modélisation, spatialisation

Abstract

The maritime pine stands of 'Landes de Gascogne' forest is the object of a dynamic silviculture; Martin (1999) and Klaus (2009) windstorms have provoked a lot of damages and a great decrease of the resource. A permanent monitoring of the resource and its mapping has been reinforced. In this context, the study Pinastéreo explore some perspectives by testing a digital photogrammetry technique. Digital surface model and canopy height model have been realized by images Pleiades matching and by using the digital terrain model BD Alti @. Thanks to reference measures (aerial LiDAR, field plot measurements), the accuracy of DSM and CHM have been estimated. The top height of the coniferous stands, their aboveground volume and biomass were calibrated from extracted variables of CHM and then top height has been mapped for a specific zone. The satisfying accuracy of the models of the top height and of the aboveground volume of the coniferous stands is promising. A generalization all over the 'Landes de Gascogne' forest and a use for others coniferous even-aged stands is now allowed.

Keywords: digital surface model, canopy height model, images matching, forest resource, maritime pine forest, model, mapping

1. Introduction

Le Massif des Landes de Gascogne, près d'un million d'hectares de futaie régulière de pin maritime, fait l'objet d'une sylviculture dynamique. A la fin des années 1990, le volume marchand de pin maritime y était estimé à 140 millions de mètres cubes (Mm³) par l'Inventaire forestier national (IFN, 2003). La tempête Martin du 27 décembre 1999 est alors à l'origine de dégâts dont le volume pour le pin maritime s'est élevé à 24 Mm³. Le 24 janvier 2009, la tempête Klaus mettait à terre cette fois-ci 37 Mm³ de pin maritime dans le Massif (IFN, 2009). Cette ressource a donc été fortement amputée en

l'espace de dix ans. Or, elle fait l'objet de prélèvements importants. En effet, en période courante, la récolte de bois s'élève à environ 8 Mm³ par an (MAAF, 2014) soit sensiblement le même niveau que la production biologique avant la tempête Martin. Cette récolte approvisionne traditionnellement les industries en bois d'œuvre et d'industrie. Aujourd'hui, l'émergence d'un débouché bois-énergie accentue la tension sur cette ressource. Il s'ensuit une demande forte des utilisateurs pour un suivi permanent et spatialisé de cette ressource.

L'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) caractérise la ressource forestière

par (1) : une cartographie exhaustive des forêts et de leur composition (IFN, 2008) et (2) : un inventaire statistique basé sur un échantillon de placettes photo-interprétées et, pour un sous-échantillon, « levées » sur le terrain, c'est-à-dire faisant l'objet d'observations et de mesures dendrométriques (Robert et al., 2010). En France, l'estimation de la ressource forestière exploite peu les possibilités offertes par la télédétection contrairement à celui d'autres pays comme la Finlande par exemple (Tomppo, 1993). En effet, seule la cartographie forestière est actuellement utilisée dans le cadre des estimations statistiques.

Aussi l'objectif du projet *Pinastéreo* est d'étudier l'apport de la corrélation d'images satellitaires à très haute résolution spatiale à des fins de caractérisation de la ressource forestière. Des images stéréoscopiques Pléiades ont ainsi été acquises sur plusieurs zones du Massif landais afin de réaliser un modèle numérique de surface (MNS). Un modèle numérique de hauteur de canopée (MNHC) a en été déduit après soustraction du meilleur modèle numérique de terrain (MNT) disponible sur la zone (Bonnet, 2009) :

$$\text{MNHC} = \text{MNS} - \text{MNT} \quad (1)$$

La précision des MNS et MNHC a été évaluée à partir de différentes données de référence. Ensuite, des grandeurs dendrométriques relatives aux peuplements comme la hauteur et le volume sur pied ont été modélisées à partir de variables issues du MNHC et des levés dendrométriques. Enfin, la précision à attendre de ces modèles a été évaluée avant de passer à la production de cartes.

2. Zone d'étude et données

La zone d'étude (Figure 1) a été déterminée à partir de critères suivants : (1) : au sein du Massif des Landes de Gascogne avec une large prédominance des peuplements de pin maritime ; (2) : peuplements en situation courante ; les forêts de la zone ne devaient pas avoir été trop endommagées par la tempête Klaus et (3) : disponibilité de données de référence. La zone d'étude du projet ANR FORESEE « Caractérisation de la ressource forestière pour les bioénergies » (ANR, 2010) a également été choisie sur ces principes. Une autre zone a été adjointe à l'ouest, au sud du Bassin d'Arcachon.

Trois couples stéréoscopiques d'images Pléiades ont pu être acquis : un au sud-est du Bassin d'Arcachon le 22 août 2012 ; un deuxième cinq jours plus tard au sud-ouest du Bassin d'Arcachon ; un troisième centré sur la commune de Saint-Symphorien et incluant la zone d'étude FORESEE obtenu en hiver (16 décembre 2012) dans le cadre de la recette thématique utilisateur (RTU) du Cnes (Figure 1). Les caractéristiques des couples d'images sont les suivantes :

- Angle d'incidence : $\leq 20^\circ$;
- B/H : $\sim 0,3$ (couple RTU) ; $\sim 0,4$ (autres couples) ;
- Bande spectrale : panchromatique ;

- Résolution : 70 cm, rééchantillonnage à 50 cm.

L'évaluation de la précision des MNS et MNHC et la modélisation des grandeurs dendrométriques des peuplements forestiers se sont appuyées sur les données de référence suivantes :

- Sur l'ensemble des zones couvertes :

Un échantillon de 227 placettes a fait l'objet d'une stéréo-restitution sur photographies aériennes IGN très haute résolution de 2012 (pixel de 25 cm) : sur une placette circulaire de 15 mètres de rayon (7 ares), un opérateur a pointé la cime et le sol au plus près de la souche des six plus hauts arbres. L'échantillon de placettes a été déterminé de façon qu'il soit représentatif de la diversité des peuplements forestiers dans les Landes de Gascogne en termes de composition (résineux vs feuillus), de classe d'âge et d'intensité de dégâts suite à la tempête Klaus.

- Données du projet ANR FORESEE :

Les MNS, MNT et MNHC sont issus d'une couverture LiDAR aérienne du cœur de la zone d'étude FORESEE acquise en avril 2011. Ces données ont été acquises avec une forte densité (8 impulsions/m²) et constituent donc une excellente référence. En outre, un échantillon de 42 placettes a fait l'objet en 2011 de levés dendrométriques ainsi que d'une localisation précise (GPS différentiel).

3. Modèle numérique de hauteur de canopée

En photogrammétrie numérique, la méthode de la corrélation d'images repose sur le principe de la vision stéréoscopique permise par l'exploitation de la parallaxe dans le cas de photographies d'une même scène prise depuis différents points de vue (Pierrot-Deseilligny et al., 2006). A partir d'un couple stéréoscopique d'images orientées, la méthode consiste à : (1) : définir une image maîtresse ; (2) : pour chaque pixel de l'image maîtresse, parcourir les « profondeurs » (élevations réelles sur le terrain) dans une gamme vraisemblable ; (3) : en déduire sur l'image secondaire le segment correspondant à cette gamme de profondeurs (segment épipolaire) ; (4) : retenir comme point homologue, le pixel de ce segment épipolaire le plus semblable au pixel de l'image maîtresse. L'indice de similarité utilisé est le coefficient de corrélation calculé à partir de la radiométrie en niveau de gris sur une vignette de petite dimension (vignette carrée de quelques pixels de côté) et (5) : en déduire l'élévation finale (terrain) du couple de points homologues. Dans la recherche des points homologues, il est possible d'introduire une contrainte entre l'élévation de points voisins afin d'éviter de brusques discontinuités.

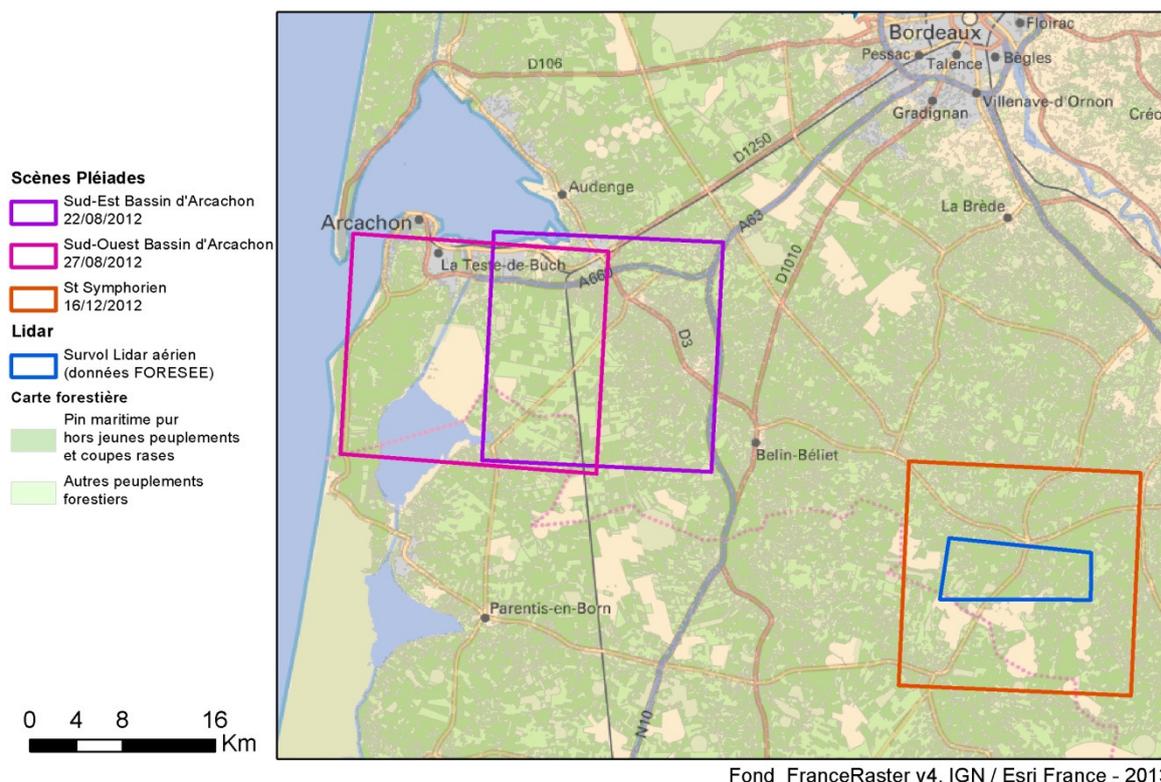
La précision en élévation $\varepsilon(z)$ d'un MNS obtenu par corrélation d'images équivaut à (Kasser et al., 2002) :

$$\varepsilon(z) = \varepsilon(x, y) / (B/H) \quad (2)$$

Comme la précision en planimétrie $\varepsilon(x, y)$ est métrique, celle en élévation devrait être a priori de

l'ordre de 2 à 3 m compte-tenu des paramètres d'acquisition des images. Les traitements ont été réalisés à l'aide du logiciel open-source MicMac développé par l'IGN. Le résultat de la corrélation d'images dépend de différents paramètres. Comme

la méthode a été peu utilisée en forêt (Baltsavias et al., 2008, White et al., 2013), une phase préliminaire d'optimisation a été entreprise sur deux paramètres considérés comme primordiaux : taille des fenêtres de corrélation et coefficient de régularisation.



Fond FranceRaster v4, IGN / Esri France - 2013

Figure 1 : Emprise des couples stéréoscopiques d'images Pléiades utilisés sur fond de cartographie forestière (BD Forêt® simplifiée)

Des MNS ont été réalisés avec différentes valeurs des paramètres sur des petites zones de un kilomètre carré ; les résultats ont été confrontés à des observations et mesures de terrain. L'analyse montre que le lissage doit être quasi-nul. Dans le cas contraire, des détails importants (arbres isolés ou très développés, trouées) disparaissent. Pour des raisons similaires, la taille des fenêtres de corrélation doit être petite ; des fenêtres de 5 pixels de côté ont donc été retenues. En effet, la taille d'une fenêtre carrée de 5 pixels de côté, soit 2,50 m au sol, est plus en rapport avec la taille des objets que l'on cherche à modéliser (houppier). Elle est plus à même d'exprimer la variabilité radiométrique entre houppiers et non houppiers, qui est certainement plus importante que celle à l'intérieur d'un houppier. Les résultats de notre phase d'optimisation sont cohérents avec ceux obtenus par d'autres auteurs (Honkavaara et al., 2011, Lisein et al., 2013, Lucie, 2013).

Les MNS correspondant aux trois couples d'images ont alors été réalisés. La maille du MNT utilisé (BD Alti®) étant plus grande que celle du MNS (25 m > 0,5 m), le premier a été interpolé (interpolation bilinéaire) afin de pouvoir calculer un MNHC qui soit à la même résolution que le MNS. Cette interpolation se justifie par le fait que la topographie du Massif des Landes de Gascogne est peu accentuée (Figure 2).

Les MNS et MNHC ainsi obtenus ont tout d'abord été comparés à ceux issus des données LiDAR aériennes. La comparaison montre que (Figure 3) :

- L'altitude fournie par la BD Alti® sur la zone n'est pas très différente de celle fournie par le nuage de points LiDAR. La précision de la BD Alti® a donc été jugée satisfaisante dans le Massif landais pour l'objectif recherché ;
- Sans surprise, les MNS et MNHC LiDAR présentent un niveau de détail plus important que les MNS et MNHC obtenus à partir des images Pléiades ;
- Le MNS Pléiades se situe au-dessus du MNS LiDAR. Toutefois, le décalage temporel entre les deux sources (avril 2011 pour les données LiDAR, décembre 2012 pour les images Pléiades) représente quasiment deux années de végétation. L'écart moyen entre les deux MNS est tout à fait cohérent avec l'accroissement moyen du pin maritime dans la zone (de l'ordre de 50 cm/an) ;
- De plus, ce décalage de dates est révélateur des peuplements exploités dans ce laps de temps.

La précision des MNS et MNHC issus des images Pléiades a ensuite été estimée à partir de l'échantillon d'arbres ayant fait l'objet d'une stéréorestitution. Les cimes géo-localisées des arbres ont été replacées dans les MNS et l'élévation déduite du MNS a été confrontée à celle déterminée par

l'opérateur (Figure 4). Afin de limiter l'impact des erreurs de géolocalisation entre les sources d'information, l'analyse s'est concentrée sur les forêts fermées, soit les forêts dont le couvert absolu

des arbres est supérieur à 40% (le couvert absolu est le rapport entre la surface de la projection au sol des houppiers et la surface au sol).

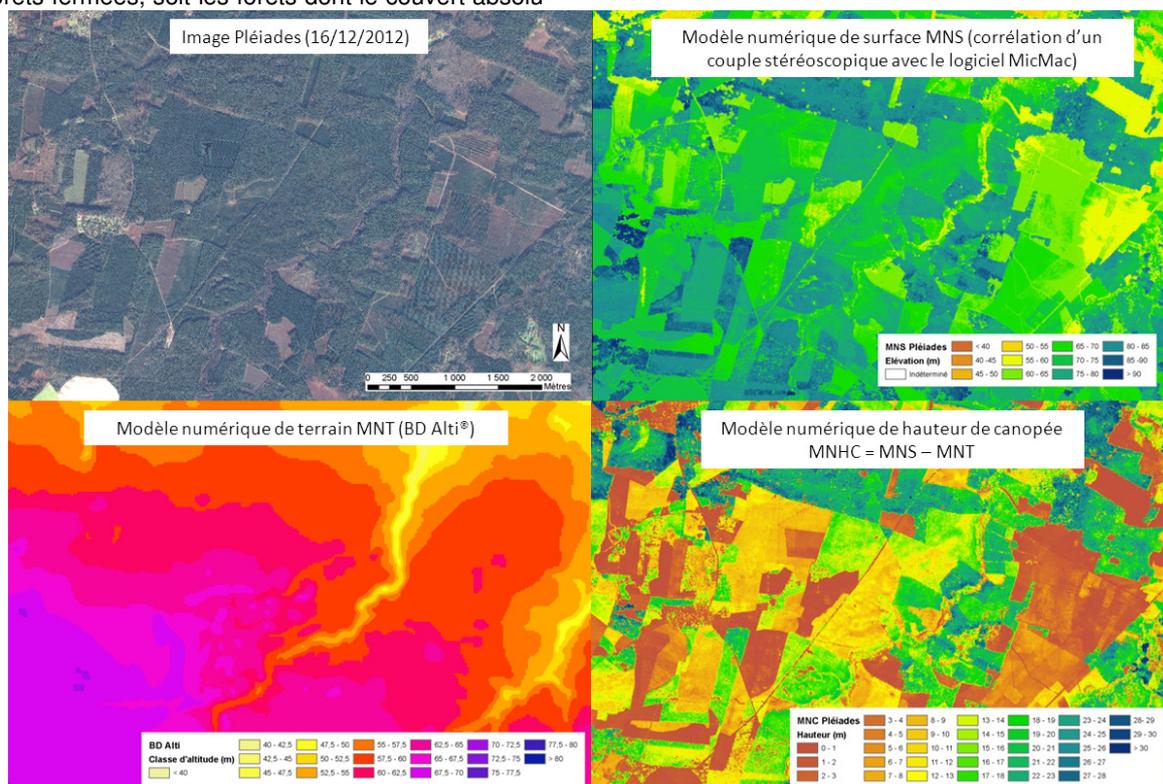


Figure 2 : Réalisation d'un modèle numérique de hauteur de canopée (MNHC) à partir d'un couple d'images Pléiades. Exemple sur un secteur de la zone de St-Symphorien

L'erreur quadratique moyenne correspond pour l'essentiel à un biais. Ceci se traduit par un alignement des points parallèlement à la droite $Y = X$ (Figure 4). Toutefois, cet alignement est plus ou moins en dessous de cette droite selon les couples d'images (sous-estimation). Pour le couple de la zone de St-Symphorien, le biais est de 2 mètres voire un peu moins alors qu'il est de l'ordre de 3 mètres pour le couple d'images du 22/08/12. Le biais pour le couple d'images du 27/08/12 est un peu plus faible (2,5 mètres) alors que la zone est plus complexe (dune littorale avec une topographie moins monotone).

4. Modélisation et spatialisation de la ressource de pin maritime

Un modèle numérique de hauteur de canopée constitue une information géoréférencée d'une très grande richesse et d'un très grand intérêt pour le forestier. Cependant, il présente aussi quelques inconvénients : (1) : comme nous l'avons vu, la hauteur de la canopée est légèrement sous-estimée ; (2) : le volume de données est important du fait de la très grande résolution spatiale et (3) : elle constitue un type d'information à la fois brut et original alors que le gestionnaire forestier utilise plutôt des caractéristiques synthétiques à l'échelle du peuplement. Aussi, pour ces diverses raisons, ce MNHC Pléiades a été utilisé en combinaison avec d'autres sources d'information (cartographies

numériques, levés de référence) afin de modéliser et spatialiser des grandeurs dendrométriques plus familières au forestier. L'approche s'est concentrée sur deux grandes caractéristiques des peuplements forestiers : la hauteur dominante et la biomasse ligneuse aérienne.

Le **principe** de la méthode est le suivant. Les grandeurs d'intérêt sont mesurées précisément par des opérateurs sur le terrain ou par stéréorestitution sur un échantillon de placettes géoréférencées. Pour chaque placette, la distribution de hauteurs extraites du MNHC est caractérisée par de nombreuses statistiques : paramètres de position (moyenne, médiane), quantiles, paramètres de dispersion (écart-type, coefficient de variation), proportion de pixels au-dessus d'un seuil déterminé (2 m, 5 m), etc. Ces statistiques constituent autant de prédicteurs potentiels des grandeurs dendrométriques d'intérêt. La carte forestière permet par ailleurs de stratifier la modélisation en procédant par type de peuplement. Le modèle est calibré sur un échantillon de placettes ; il doit ensuite être validé à partir d'un autre échantillon indépendant du premier. Enfin la grandeur peut être spatialisée par application du modèle à l'ensemble de son domaine de validité au sein de la zone couverte par le MNHC.

La **hauteur dominante** caractérise le peuplement dominant défini biologiquement comme étant le sous-peuplement ayant accès à la lumière ;

pratiquement, on considère qu'il correspond aux cent plus gros arbres à l'hectare (Pardé et Bouchon, 1988).

On a vu précédemment que le MNS obtenu sur la zone de Saint-Symphorien est plus précis que ceux de la zone au sud du Bassin d'Arcachon. De même, après analyse des données issues de stéréorestitution, il s'est avéré que le MNT BD Alti® est plus précis sur cette zone. Aussi, la modélisation des grandeurs dendrométriques s'est limitée à celle-ci. Comme les images ont été acquises en hiver, seules les forêts fermées de résineux ont fait l'objet de cette phase de modélisation. Du fait de la restriction du domaine d'étude pour cette phase, nous avons utilisé l'échantillon issu de la stéréorestitution pour modéliser la hauteur dominante des forêts fermées de pin maritime (77 placettes). La hauteur dominante (HDom) a été estimée dans ce cas par la moyenne des 6 plus hauts arbres mesurés par l'opérateur sur la placette circulaire de 7 ares (Duplat et Perrotte, 1981). Le meilleur modèle linéaire (Figure 5a, ligne rouge) est le suivant (unité : le mètre) :

$$\begin{aligned} \text{HDom} &= 0,98 \times \text{H80} + 1,23 \\ R^2 &= 94\%, \text{ RMSE} = 1,75 \text{ m} \end{aligned} \quad (3)$$

où H80 est le 80^e percentile de la distribution des hauteurs du MNHC sur la placette (exprimé en mètres). Il est intéressant de noter que : (1) : le meilleur prédicteur correspond à une statistique qui décrit la partie supérieure de la distribution des hauteurs et (2) : l'ordonnée à l'origine (1,23 m) est positive et proche du biais estimé sur le MNS dans cette zone (1,6 m). Ensuite, ce modèle a été appliqué à l'échantillon de placettes du projet ANR FORESEE (41 placettes) et les résultats ont été

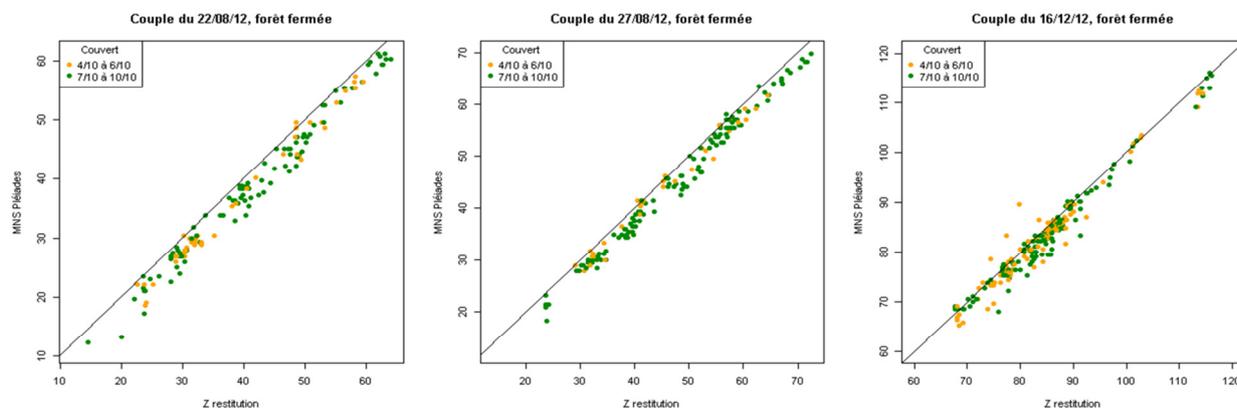


Figure 4 : Comparaison entre l'élévation des arbres issue du MNS Pléiades (ordonnées) et celle issue de la stéréorestitution sur photographies aériennes (abscisses) pour les forêts fermées selon le taux de couvert pour trois couples d'images

La **biomasse ligneuse aérienne** (racines exclues) d'un peuplement est la somme de celle des arbres qui le constituent qui, elle-même, est fréquemment estimée à partir du modèle suivant :

$$\text{AB} = \text{D.Vol}_0 \quad (4)$$

où D est l'infradensité du bois et Vol₀ est le volume aérien total. L'infradensité dépend, en première approche, de l'espèce de l'arbre (Loustau et al. 2010). Le volume aérien total d'un arbre est

confrontés aux mesures de manière concluante (Figure 5b) : aucun biais, RMSE = 1,19 m.

La hauteur dominante des forêts fermées de résineux a alors pu être spatialisée à partir du MNHC et de la carte forestière (Figure 6). La maille retenue est un carré de 25 mètres de côté soit une surface comparable à celle des placettes (6,25 vs 7 ares).

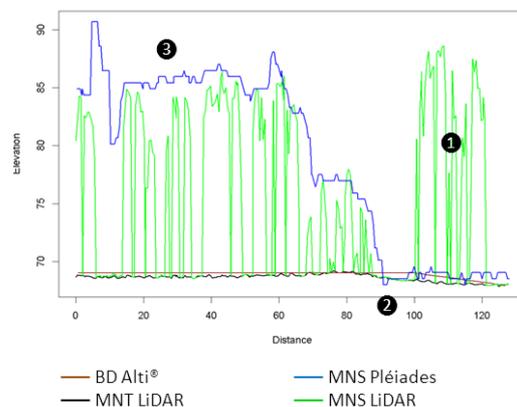


Figure 3 : Qualification des MNS et MNHC Pléiades (décembre 2012) avec des données LiDAR aériennes (avril 2011)

① : peuplement chablis exploité entre le printemps 2011 et l'hiver 2012 ; ② : la précision de la BD Alti® est satisfaisante dans le Massif landais ; ③ : MNS Pléiades ≈ MNS LiDAR + 2 années de croissance (~ 50 cm/an)

généralement estimé à l'aide de modèles allométriques utilisant une ou plusieurs variables dendrométriques simples. Nous avons ici utilisé les modèles établis dans le cadre du projet ANR Emerge « Elaboration de modèles pour une estimation robuste et générique du bois énergie » (Deleuze, 2013).

La calibration du modèle de volume aérien total s'est appuyée sur l'échantillon ANR FORESEE car (1) : les variables nécessaires à l'estimation du

volume aérien total – espèce, circonférence à 1,30 m et hauteur totale – ont été observées ou mesurées sur ces placettes et (2) : c'est l'échantillon à la fois le plus contemporain des images Pléiades et le plus important pour la zone (41 placettes). Le meilleur modèle statistique est un modèle non linéaire avec deux prédicteurs (unité : m³/ha) :

$$\text{Vol}_0 = 2,209 \text{ mean}(H)^{1,697} (\sigma(H))^{-0,368}$$

$$R^2 = 84,7\%, \text{ RMSE} = 52,9 \text{ m}^3/\text{ha} \quad (5)$$

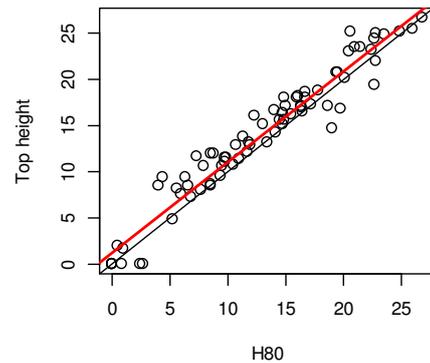
où mean(H) et $\sigma(H)$ sont respectivement la moyenne et l'écart-type des hauteurs du MNHC sur la placette (exprimés en mètres). La sélection de ces deux prédicteurs est conforme aux résultats d'autres auteurs (Magnussen et al., 2012, Bouvier, comm. pers.). L'échantillon de calibration a ensuite été comparé à l'échantillon de levés IGN, représentatif des peuplements de la zone. Cette confrontation montre que l'échantillon de calibration FORESEE ne comporte pas de placettes avec simultanément une faible densité et un faible volume sur pied ; il n'est donc pas représentatif des peuplements de la zone. En conséquence, la spatialisation du volume et de la biomasse à partir de ce modèle ne s'avérait pas pertinente sur l'ensemble de la zone et n'a donc pas été réalisée.

5. Conclusion

Le projet *Pinastério* a démontré l'important potentiel des applications de la photogrammétrie numérique satellitaire à très haute résolution spatiale pour le suivi de la ressource forestière. En particulier, la corrélation de couples d'images stéréoscopiques Pléiades permet de modéliser la hauteur de la canopée des forêts même s'il existe un biais par sous-estimation. La technique est parfaitement adaptée aux forêts simples comme les futaies régulières résineuses. Les résultats produits pour les peuplements feuillus, sous réserve qu'ils soient feuillés au moment de la prise de vue, sont également intéressants. Pour les forêts plus complexes comme les forêts à plusieurs strates, une méthode explorant toute l'épaisseur du couvert (cas du LiDAR aérien) est a priori préférable car la corrélation d'images ne permet pas d'explorer les

strates les plus basses (taillis des taillis sous futaie, sous-bois). Dans la production d'un MNHC, la précision du MNT est au moins aussi importante que celle du MNS. Afin de pouvoir modéliser et spatialiser la ressource forestière, des données de terrain (levés dendrométriques) sont indispensables afin de corriger tout biais éventuel (hauteur) et d'enrichir les résultats en accédant au calcul de caractéristiques plus complexes (volume ligneux, biomasse).

a) Calibration (échantillon stéréo-restitution : 77 placettes). Le modèle linéaire est en rouge



b) Validation avec l'échantillon FORESEE (41 placettes)

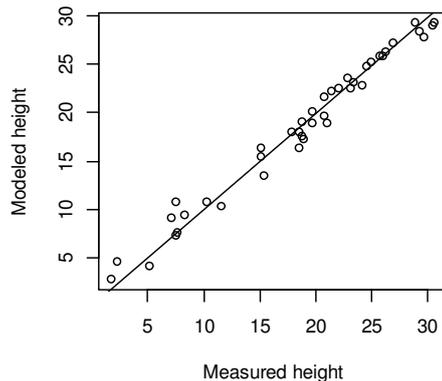


Figure 5 : Modélisation de la hauteur dominante (Top height) des forêts fermées de résineux

a) Composition des forêts (violet : pin maritime)



b) hauteur dominante moyenne

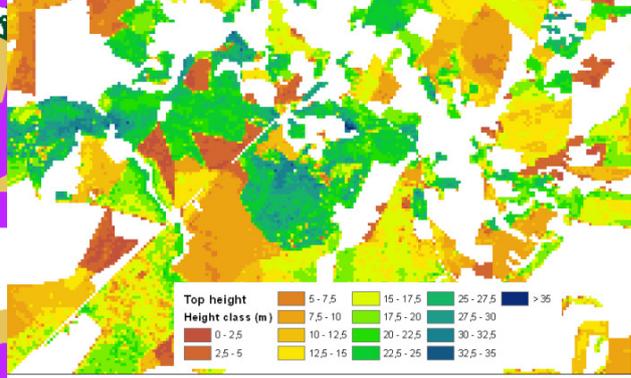


Figure 6 : Spatialisation de la hauteur dominante des forêts fermées de résineux (exemple sur le secteur de la commune de St-Symphorien)

Remerciements

Arnaud Desqueyroux (IGN, DIR SO, 33166, Saint-Médard-en-Jalles) a assuré la stéréo-restitution des placettes en forêt. Le Cnes a fourni gracieusement le couple d'images stéréoscopiques Pléiades sur le secteur de St-Symphorien (département de la Gironde) dans le cadre de son programme Recette Thématique Utilisateurs des images Pléiades (© CNES 2012, distribution Airbus DS / Spot Image). L'étude *Pinastéréo* a été réalisée avec le soutien financier du Conseil Régional d'Aquitaine et du programme SUDOE financé par le Fonds Européen de Développement Régional dans le cadre du projet APSAT du pôle de compétitivité Aerospace Valley.

6. Références

- ANR, 2010. Programme BIOENERGIES, Projet ANR-10-BIOE-008 FORESEE « Caractérisation de la ressource forestière pour les bioénergies », document scientifique.
- Baltsavias E., Gruen A., Eisenbeiss H., Zhang L., Waser L.T., 2008. High-quality image matching and automated generation of three-dimensional tree models. *Int. J. Remote Sens.*, 2008, 29, 1243–1259.
- Bonnet S., 2009. Un Modèle Numérique de Canopée pour l'estimation de la hauteur dominante des peuplements résineux en Région wallonne. *Forêt Wallonne* 98, pp. 53 – 59. Accès mars 2012 : <http://www.foretwallonne.be/component/content/article/40-foret-wallonne-old/632-un-modele-numerique-de-canopee-pour-lestimation-de-la-hauteur-dominante-des-peuplements-resineux-en-region-wallonne.html>
- Deleuze C., 2013. Dossier Emerge Dendrométrie. Rendez-vous techniques n°39-40, 31-78. ONF.
- DSF, 2010. L'Information Santé des Forêts n°10-01.
- Duplat P., Perrotte G., 1981. Inventaire et estimation de l'accroissement des peuplements forestiers, Paris, ONF, 1981, 432 p.
- Honkavaara E., Markelin L., Rosnell T., Nurminen K., 2011. Influence of solar elevation in radiometric and geometric performance of multispectral photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 67, 2012, 13–26.
- IFN, 2003. 4^e inventaire forestier du Massif des Landes de Gascogne. Accès mai 2014 http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/IMG/pdf/IFN_MASSIF_LANDAIS-2.pdf
- IFN, 2008. Nouvelle cartographie forestière - De la production à l'utilisation. Accès mai 2014 http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/IMG/pdf/IF20_carto.pdf
- IFN, 2009. Tempête Klaus du 24 janvier 2009 : 234 000 hectares de forêts affectés à plus de 40% - 42 millions de mètres cubes de dégât. Accès mai 2014 http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/IMG/pdf/IF21_internet.pdf
- Kasser M., Egels Y., 2002. Digital Photogrammetry. London, Taylor & Francis, 351 p.
- Lisein J., Pierrot-Deseilligny M., Bonnet S., Lejeune P., 2013. A Photogrammetric Workflow for the Creation of a Forest Canopy Height Model from Small Unmanned Aerial System Imagery. *Forests* 2013, 4, 922–944.
- Loustau D., 2010. Forests, carbon cycle and climate change. Ouvrage collectif issu du projet CARBOFOR, Editions QUAE, Versailles, collection Update Sciences and Technologies, 348 p.
- Lucie X., 2013. Optimisation du paramétrage et évaluation de la qualité de MNS photogrammétriques pour une utilisation dans le domaine forestier – Impact de la résolution et de la qualité des données. Mémoire de soutenance de Diplôme d'Ingénieur, Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg.
- MAAF, 2014. Mémento de la statistique agricole – La filière forêt-bois, Agreste Aquitaine. Accès mai 2014 : <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/R7214C01.pdf>
- Magnussen S., Næsset E., Gobakken T., Frazer G., 2012. A fine-scale model for area-based predictions of tree-size-related attributes derived from LiDAR canopy heights. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2012, 27, 312–322.
- Pardé J., Bouchon J., 1988. Dendrométrie. *ENGREF*, 328 p.
- Pierrot-Deseilligny M., Pappas N., 2006. A multiresolution and optimization-based image matching approach: An application to surface reconstruction from SPOT5-HRS stereo imagery. In *IAPRS vol XXXVI-1/W41 in ISPRS Workshop On Topographic Mapping From Space (With Special Emphasis on Small Satellites)*, Ankara, Turquie.
- Robert N., Vidal C., Colin A., Hervé J.-C., Hamza N., Cluzeau C., 2010. Development of France's National Forest Inventory *in* National Forest Inventories, Pathways for Common Reporting, Editions Springer, 612 p.
- Tomppo E., 1993. Multi-source National Forest Inventory of Finland. *Proceedings of Ilvessalo Symposium on National Forest Inventory, Finland*, 17-21 August, 52 – 59.
- White J., Wulder M., Vastaranta M., Coops N., Pitt D. and Woods M., 2013. The Utility of Image-Based Point Clouds for Forest Inventory: A Comparison with Airborne Laser Scanning. *Forests* 2013, 4, pp. 518-536.