

Cartographier le relief sous les forêts, et le substrat sous les déserts de sable : les attentes de la mission radar Biomass

■ Laurent POLIDORI - Thierry KOLECK - Ludovic VILLARD - Mhamad EL HAGE - Philippe PAILLOU - Thuy LE TOAN

La mission spatiale Biomass sera lancée par l'Agence spatiale européenne en 2021 avec un radar à synthèse d'ouverture en bande P dans le but de cartographier la biomasse forestière à l'échelle planétaire, ainsi que la hauteur et les dégradations du couvert forestier.

Plusieurs produits secondaires sont aussi envisagés, notamment la cartographie 3D du relief sous les forêts et du substrat sous les déserts de sable, qui devraient bénéficier du pouvoir de pénétration des ondes radar en bande P et de l'aptitude de la tomographie à séparer les contributions des différentes couches dans un profil vertical de rétrodiffusion. Ces possibilités ayant été démontrées lors de campagnes aéroportées, la qualité des modèles 3D attendus de la mission Biomass reste à évaluer.

Le relief terrestre est connu avec une précision très hétérogène et parfois très insuffisante pour de nombreuses applications, tant opérationnelles (gestion des territoires) que scientifiques. Dans les années 2000, des missions spatiales d'observation de la terre ont été proposées avec des configurations stéréoscopiques ou interférométriques propices à la production de modèles numériques de terrain sur de grandes étendues. Des bases de données altimétriques quasi planétaires sont ainsi apparues, notamment ASTER-GDEM issue de la restitution photogrammétrique de couples d'images optiques et SRTM issue du traitement interférométrique des données d'un radar à deux antennes. Avec une maille de 30 m pour ASTER-GDEM et de 30 m dégradée à 90 m pour SRTM et des précisions altimétriques de l'ordre du décimètre, ces produits ont connu un large succès pour des applications qui ne nécessitaient pas une précision extrême. Toutefois, en raison même du comportement physique des capteurs

utilisés (imagerie optique et imagerie radar à courte longueur d'onde qui ne voient pas à travers les feuillages), ces produits ne sont pas à proprement parler des MNT (modèles numériques de terrain) mais des MNE (modèles numériques d'élévation contenant notamment les arbres et les bâtiments), ce qui affecte la géomorphométrie et par suite les produits extraits de ce que l'on croit être un MNT, comme le réseau hydrographique. Or, de nombreuses applications ont besoin de l'altitude du sol, comme la modélisation hydrologique des bassins versants de grands fleuves tropicaux, où la forêt engendre une erreur qui peut être comparable ou supérieure aux amplitudes du relief. Dans ces circonstances, le lidar aéroporté est généralement considéré comme la technique la plus efficace pour cartographier le relief à travers la forêt, technique cependant peu adaptée à de très grandes étendues. L'aptitude du radar en bande P (longueur d'onde proche du mètre) à atteindre le sol grâce à la pénétration des ondes à travers le couvert forestier, en font

MOTS-CLÉS

Biomass, produits secondaires, MNT, forêt, désert

également un instrument prometteur pour la cartographie du relief dans les zones densément boisées. Ainsi, le gouvernement brésilien a entrepris une couverture de l'Amazonie grâce à des acquisitions radar aéroportées en bandes X (pour la canopée) et P (pour le relief) (Correia, 2011).

Un autre atout des imageurs radar à grande longueur d'onde est leur sensibilité, dans des conditions favorables, au substrat rocheux lorsqu'il est recouvert de sable ou de glace (McCauley et al., 1982, Elachi et al., 1984).

Jusqu'à maintenant limitée à des acquisitions aéroportées pour des raisons d'allocation de fréquences accordées aux applications civiles, l'imagerie radar en bande P devrait prochainement et pour la première fois voir le jour en orbite dans le cadre de la mission Biomass de l'Agence spatiale européenne, dont le lancement est prévu en 2021. Proposée et conçue dans le but d'estimer la biomasse forestière et notamment celle des forêts denses (impénétrables aux fréquences plus élevées) la mission Biomass devrait également fournir des produits dits secondaires comme la cartographie du relief sous les forêts et du substrat sous les déserts de sable.

La mission Biomass

Dans le cadre de son programme *Earth Explorer*, l'Agence spatiale européenne (ESA) a retenu en 2009 le choix de la mission spatiale Biomass, destinée à évaluer et cartographier la biomasse forestière au moyen d'un radar à basse fréquence (bande P, fréquence centrale

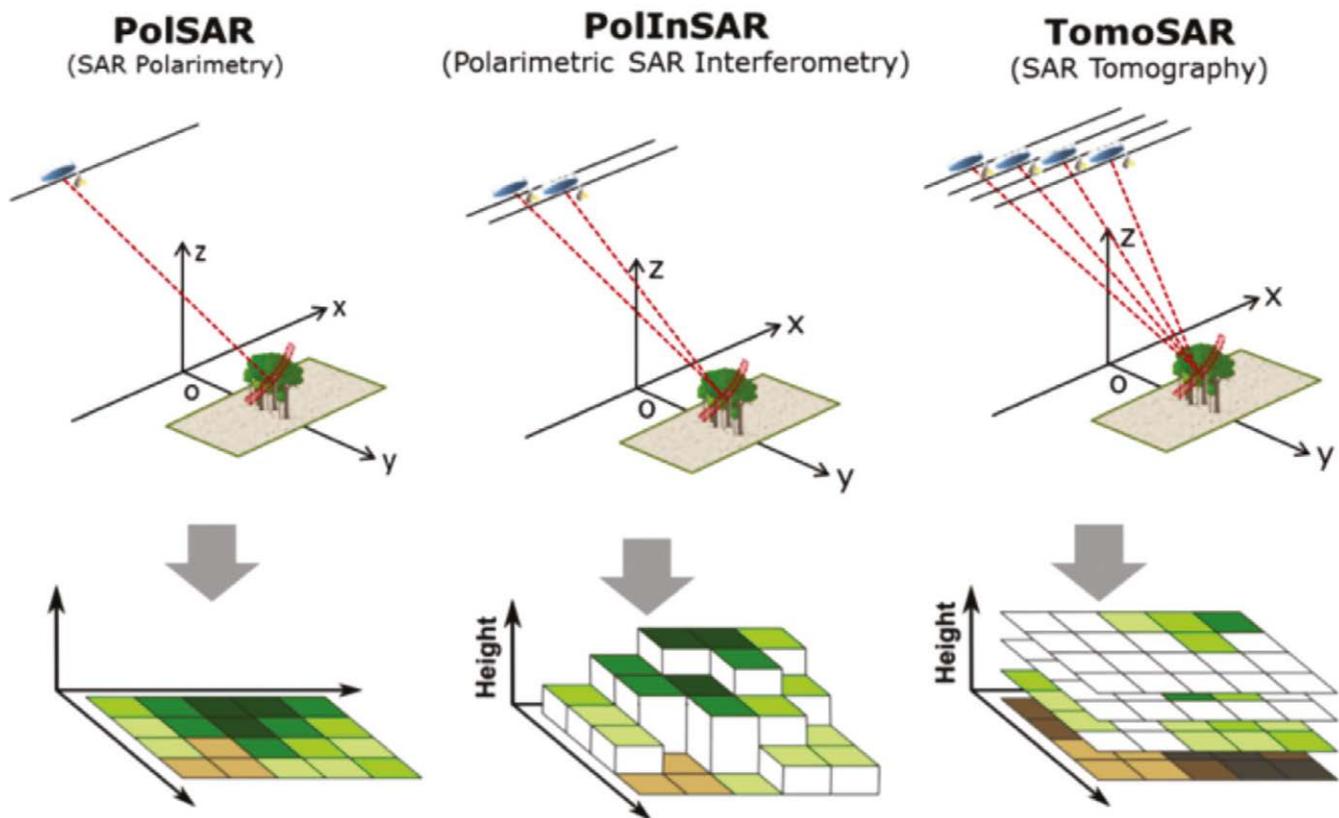


Figure 1. Les trois types d'acquisition SAR de Biomass, avec les techniques PolSAR et PolInSAR prévues pour la phase nominale et la technique TomoSAR pour la phase initiale tomographique (ESA, 2012)

de 435 MHz soit une longueur d'onde de 69 cm). Grâce à un capteur dont la mesure est sensible à la biomasse forestière, cette mission est conçue pour améliorer la connaissance du bilan du carbone terrestre, par une meilleure quantification des puits et sources de carbone des écosystèmes forestiers, afin de mieux comprendre leur rôle dans le changement climatique (Le Toan et al., 2011). L'intérêt du radar à basse fréquence (inférieure à 1 GHz) réside principalement dans la sensibilité du signal rétrodiffusé à la biomasse totale des couverts végétaux, y compris pour les forêts tropicales denses, sensibilité liée aux capacités de pénétration de l'onde radar qui permettent également d'accéder jusqu'à la contribution du sol (Villard et al., 2016).

Rappelons que les capteurs radar utilisés pour l'observation de la Terre émettent dans une direction latérale des impulsions de micro-ondes, dont les échos après réflexion sur la surface terrestre font l'objet d'un traitement appelé synthèse d'ouverture (ou traitement SAR de synthetic aperture radar)

pour produire des images. Chaque pixel contient une mesure de la puissance du signal rétrodiffusé, qui est pratiquement insensible aux conditions météorologiques mais potentiellement très sensible aux caractéristiques de la surface ou du volume observés (eau, sol, végétation...). Cette sensibilité est représentée par des modèles, dont l'inversion peut conduire dans des cas favorables à l'estimation de caractéristiques bio-géophysiques, telles que la rugosité des surfaces, l'humidité des sols ou encore la biomasse de la végétation. De plus, avec les techniques avancées que sont l'interférométrie et la tomographie, l'exploitation des mesures acquises sous des angles de visée légèrement différents permet d'extraire les informations 3D du volume de forêt et de la surface sous-jacente.

La mission Biomass comprend un satellite opérant sur une orbite quasi-polaire, héliosynchrone, à une altitude de 637 à 666 km. L'orbite est définie pour permettre les acquisitions multi-passe pour l'interférométrie et pour minimiser l'impact des perturbations

ionosphériques. Les acquisitions se feront donc à 6 h 00 et 18 h 00, heure locale. La configuration du satellite est contrainte par l'installation dans le lanceur d'une antenne réflecteur de grande dimension, de l'ordre de 12 m de diamètre. Le SAR bande P de Biomass a des capacités polarimétriques et peut fonctionner en interférométrie multi-passe. La largeur de bande n'est que de 6 MHz, une limitation due à l'allocation de fréquence pour la télédétection. Le satellite a une masse d'environ 1 200 kg, et une puissance d'environ 1,5 kW en fin de vie. Le taux de transmission des données est de 110-120 Mbit/s. La mission durera 5 ans et comprend une phase tomographique (de 15 mois), suivie de la phase nominale interférométrique constituée de triplets tous les 219 jours (environ 7 mois) construits à partir d'acquisitions séparées de 3 jours.

Les caractéristiques techniques de Biomass permettent d'envisager trois types d'acquisitions SAR pendant ces différentes phases : le Pol-SAR permettant d'utiliser les intensités polarimétriques (polarisations HH,



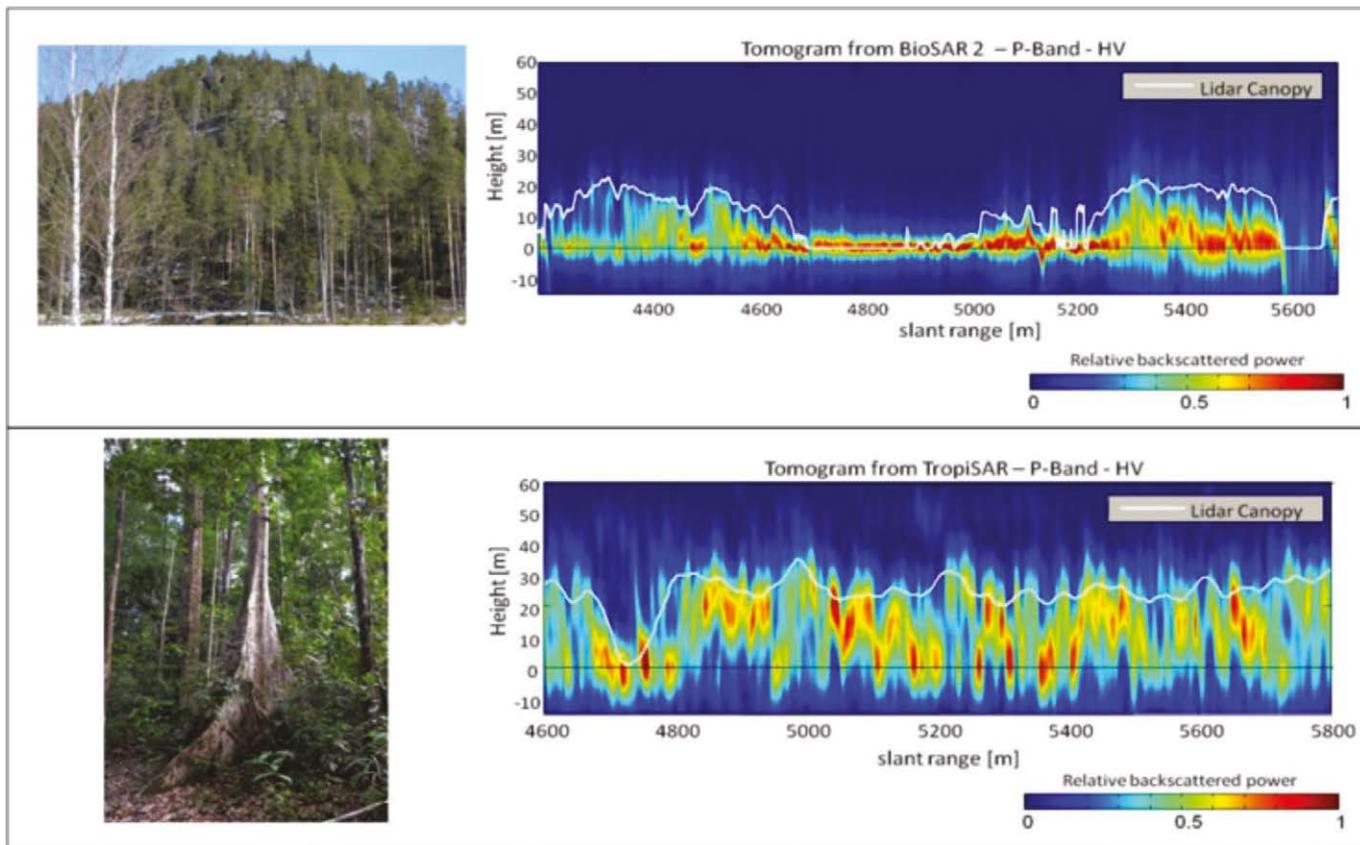


Figure 2. Tomogrammes obtenus en polarisation HV sur deux types de forêts : forêt boréale en Suède (en haut), forêt tropicale en Guyane (en bas). L'intensité dans chaque cas est normalisée de 0 (bleu foncé) à 1 (rouge). Les profils blancs représentent les hauteurs obtenues par un lidar aéroporté (ESA, 2012).



HV, VV) pour estimer la biomasse en chaque pixel, le Pol-InSAR permettant de réaliser de l'interférométrie SAR polarimétrique à partir d'au minimum deux passages sur une même scène pour obtenir également la hauteur des arbres, et la tomographie SAR (TomoSAR) permettant une imagerie verticale du volume de la forêt à partir de plusieurs passages (typiquement 7 pour Biomass). La figure 1 schématise ces trois types d'acquisition.

De nombreuses campagnes aéroportées ont été à l'origine de la conception de la mission, notamment pour démontrer le potentiel du SAR en bande P pour la fourniture des trois produits primaires que sont la biomasse des forêts, la hauteur des arbres et la détection des surfaces déboisées à l'échelle globale. Les campagnes récentes mettant en œuvre les 3 techniques de Biomass illustrées sur la figure 1 sont les campagnes BioSAR en Suède sur la forêt boréale, les campagnes TropiSAR en Guyane et AfriSAR sur le Gabon sur plusieurs sites de forêt tropicale.

Les produits secondaires

Au-delà des trois produits primaires qui visent à quantifier le stock et le flux de carbone liés aux couverts forestiers, la mission Biomass ouvre de nombreuses autres perspectives et permet d'espérer la génération de produits géophysiques inédits : le substrat rocheux à travers le sable ou la glace, le relief et la teneur en eau des sols sous la forêt, ou encore le déplacement des glaciers. On s'intéresse ici à la cartographie du relief sous les forêts et du substrat sous les déserts de sable.

■ Cartographie du relief sous la forêt

Comme nous l'avons rappelé, l'interférométrie SAR qui exploite la phase de deux échos radar est utilisée depuis plusieurs années pour produire des MNT, par exemple avec SRTM (Farr & Kobrick, 2000). Cependant, lorsque le terrain se trouve sous la couverture forestière, les mesures InSAR ne permettent pas de localiser le niveau

du sol, car la phase interférométrique est située quelque part entre le sol et le sommet de la canopée, selon la densité de la végétation, la polarisation et la fréquence de l'onde radar. Pour lever les ambiguïtés, plusieurs mesures sont nécessaires : c'est le cas des mesures tomographiques pour lesquelles un jeu de plusieurs images interférométriques de la même scène est utilisé pour former des images de réflectivité à plusieurs niveaux de hauteur dans le couvert (Figure 2).

Dans le cas de la forêt boréale, c'est le mécanisme de diffusion du sol qui est dominant, tandis qu'en forêt tropicale, la contribution du volume de la forêt est beaucoup plus importante. Pour l'extraction de la biomasse en forêt tropicale, des solutions visant à minimiser la contribution du sol améliorent fortement les résultats (Minh, 2015). Les mêmes approches, qui consistent à séparer les contributions du sol et du volume végétal, peuvent être utilisées pour produire les MNT sous des couverts forestiers denses.

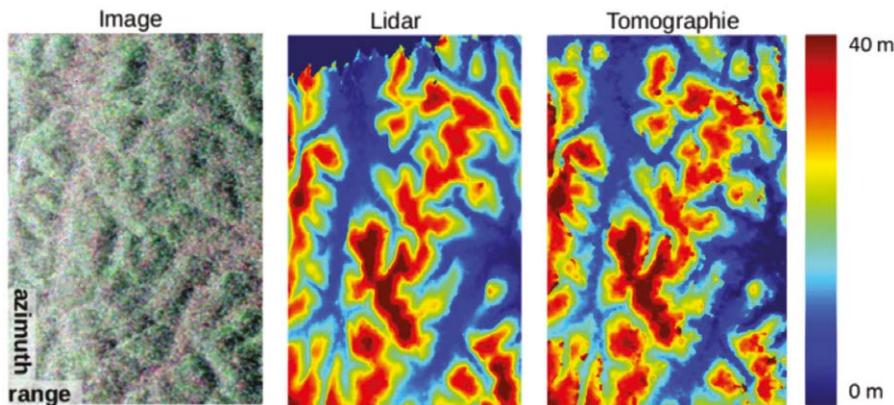


Figure 3. Comparaison d'un MNT obtenu par tomographie radar en bande P avec un MNT lidar sur le site de Paracou (Guyane) dans le cadre de la campagne TropiSAR (Huang et al., 2013). Source : Laurent Ferro-Famil.

Les données consistent en un jeu de N images en bande P, multi-orbites, multi-polarimétriques. Un couvert forestier est composé d'une canopée, qui peut être associée à un milieu volumique diffusant et caractérisée par une densité de réflectivité, et d'un sol sous-jacent dont la réponse est principalement due aux effets de couplage entre sol et végétation (notamment avec le phénomène de double rebond). Différents traitements de tomographie SAR ont été proposés dans la littérature, suivant des objectifs visant principalement à conserver la radiométrie dans la restitution des profils de réflectivité verticale, ou encore à optimiser leur résolution suivant cette dimension. Dans le but de produire un MNT, une approche consiste tout d'abord à dissocier les mécanismes de diffusion de volume et de couplage au travers de techniques de décomposition [par exemple de type SKP pour la matrice de covariance généralisée (Tebaldini, 2009)], puis à utiliser la focalisation tomographique pour localiser en 3D la contribution de ce couplage localisé au sol en configuration monostatique.

Dans le cadre des études préparatoires de la mission Biomass, ces méthodes tomographiques ont été appliquées sur plusieurs sites de forêts boréales et tropicales lors de campagnes aéroportées en Suède (BioSAR), en Guyane (TropiSAR) et au Gabon (AfriSAR). Si la précision des résultats obtenus pour la reconstitution du MNT s'avère du même ordre de grandeur qu'avec le lidar aéroporté, les performances en configuration spatiale restent à évaluer, notamment en raison de la bande de fréquence réduite à 6 MHz impliquant une résolution spatiale dégradée et une moindre robustesse au phénomène de décalage spectral, mais aussi en raison des perturbations liées à la ionosphère ou à la décorrélation temporelle (Hamadi, 2017) due à la configuration multi-passe. Toutefois, on sait d'ores et déjà que le MNT issu de la mission Biomass sera le premier MNT quasi global à être très peu affecté par la hauteur du couvert végétal. Cette potentialité, déjà mise en évidence dans le cadre de campagnes expérimentales aéroportées (figure 3), est d'une importance majeure pour les études basées

sur la géomorphométrie des zones fortement boisées.

■ Cartographie du substrat en zone aride

Le SAR orbital permet également, pour les zones désertiques arides, d'imager des structures du sous-sol situées à quelques mètres de profondeur. Cette capacité a été mise en évidence pour la première fois par le capteur de la mission radar SIR-A dans le désert égyptien (McCauley et al., 1982). En revanche, aucun modèle d'élévation n'a encore été créé pour le sous-sol dans les zones désertiques, à l'exception du MNT SRTM généré en utilisant des images SAR bande C ayant une pénétration d'environ 0,5 m (Ghoneim et al., 2007)

La figure 4 illustre le principe de la détection du substrat : une couche de sédiments secs (sable) recouvre un ancien réseau hydrographique incisant la roche de sub-surface. Alors qu'une image optique ne visualise que les sédiments de surface (SPOT à gauche), l'onde radar pénètre la couche superficielle et est rétrodiffusée par la roche (PALSAR au centre). Les anciens chenaux étant trop profonds, ils ne produisent pas de rétrodiffusion et apparaissent sombres par contraste avec la surface rocheuse environnante (schéma à droite).

A partir d'une couverture globale du Sahara en bande L, réalisée grâce au satellite japonais ALOS-PALSAR en 2007, il a ainsi été possible de cartographier des anciens réseaux hydrographiques, notamment un ancien fleuve, caché sous quelques mètres de dépôts éoliens, qui entaillait les grès de l'est de la Libye sur plus d'un millier de kilomètres (Paillou et al., 2009). Cet ancien

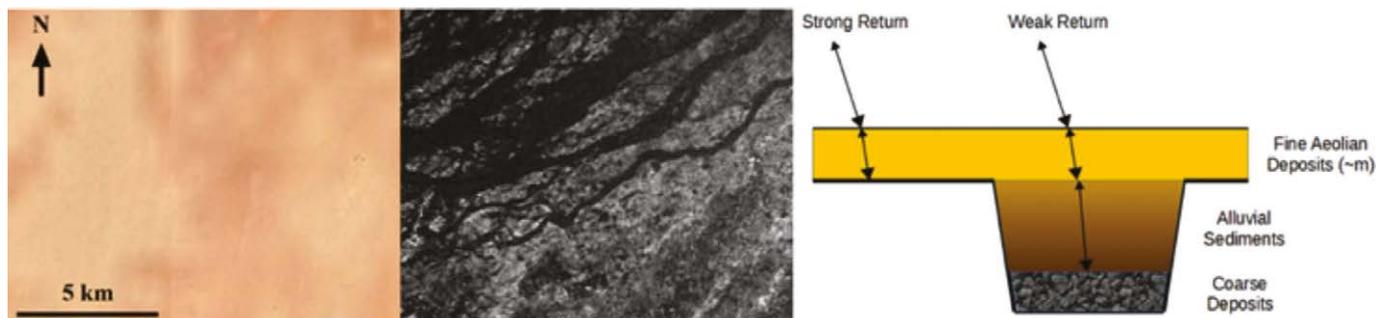


Figure 4. Images SPOT et radar bande L ainsi qu'une illustration du principe de détection du substrat dans l'image radar

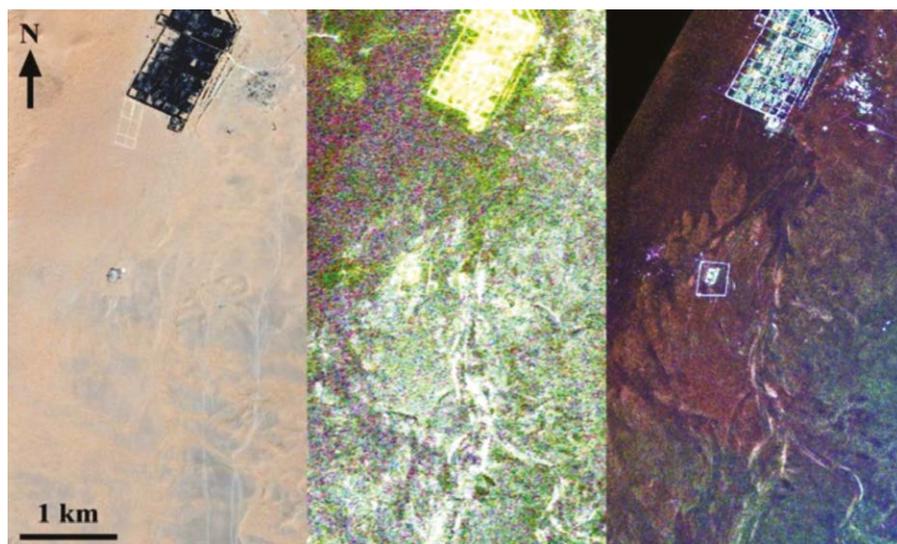


Figure 5. Images SPOT (à gauche), ALOS-2 (radar en bande L, au centre) et SETHI (radar en bande P, à droite) de la région de l'oasis de Ksar Ghilane (Tunisie)

► système était constitué par la réunification de trois affluents : un issu du flanc est du massif du Tibesti, l'autre venant du massif de l'Uweinat, et le dernier provenant du massif du Gilf Kebir. Les trois affluents traversaient le bassin de l'oasis de Kufrah dans le sud-est de la Libye, pour se rejoindre à hauteur de l'oasis en un lit unique, se dirigeant ensuite vers la côte méditerranéenne. Avant d'atteindre la mer Méditerranée, l'ancien fleuve s'élargit en un vaste delta qui se situe au beau milieu des grandes dunes de sable du désert libyque : c'est là certainement la source de cette énorme quantité de sable qui couvre de vastes étendues en Libye et en Egypte. Cet ancien fleuve est également la source d'importantes réserves d'eaux fossiles, qui sont exploitées par la Libye. Des quantités d'eau importantes sont pompées dans la région de l'oasis de Kufrah, pour ensuite être amenées sur la côte via un pipeline géant.

Alors que la bande L permet une profondeur d'auscultation de 1 à 2 mètres, on peut prédire que l'utilisation de la bande P de la mission Biomass devrait permettre d'atteindre des structures situées entre 5 et 10 mètres sous la surface. Des expérimentations aéroportées, réalisées en Tunisie en 2010 à l'aide du radar SETHI de l'ONERA, ont permis de montrer qualitativement qu'une fréquence plus basse est mieux adaptée à l'imagerie de la géologie du substrat (Paillou et al., 2011). La figure 5 montre une comparaison entre une

image SPOT (à gauche), ALOS-2 en bande L (au centre) et SETHI en bande P (à droite) de la région de l'oasis de Ksar Ghilane en Tunisie : la bande P met très nettement en évidence des structures hydrographiques cachées sous le sable, alors que la bande L est perturbée par la rétrodiffusion dans la couche de surface. L'utilisation des données polarimétriques, interférométriques et tomographiques de Biomass, combinée à une pénétration importante de la bande P dans le sol des zones désertiques, devrait permettre non seulement d'imager des structures du sous-sol, mais également de séparer les rétrodiffusions de la surface de sable et du substrat, pour générer un modèle tridimensionnel des couches géologiques des 10 premiers mètres du sous-sol.

Toutes les applications qui exploitent des MNT sur des terrains plus favorables devraient ainsi trouver sous les déserts une information précieuse notamment la géologie, l'hydrologie, l'hydrogéologie et en particulier la prospection des eaux souterraines et l'archéologie. Certaines de ces applications peuvent trouver dans des modèles 3D du substrat des descripteurs de terrain comme la pente, le réseau de drainage ou les fractures (Robinson et al., 2007). Ainsi les zones à infiltration élevée, où les eaux souterraines sont les plus susceptibles d'être situées, sont des zones à faible pente et ayant une densité de drainage et de

fracture élevée. Ces caractéristiques peuvent être recherchées dans un MNT en complément des approches bidimensionnelles, soit par une extraction automatique, soit par un ombrage du modèle 3D du substrat, sous réserve que la qualité de ce modèle (qui dépendra de l'épaisseur de la couche de sable) soit compatible avec une telle exploitation.

Perspectives

Comme nous l'avons exposé, les produits secondaires de la mission Biomass s'annoncent particulièrement prometteurs pour la cartographie du relief sous les forêts et du substrat sous les déserts de sable. Les possibilités offertes par les données Biomass sont donc particulièrement intéressantes pour de tels produits et pour les applications scientifiques ou opérationnelles associées. En attendant le lancement du satellite prévu en 2021, des travaux de recherche sont en cours pour le développement et la validation des méthodes de cartographie. Les enjeux sont multiples. Il s'agit d'une part d'ajuster les conditions d'acquisition et de traitement pour optimiser la détection du sol et donc minimiser l'incertitude sur l'altitude mesurée, et d'autre part, d'évaluer le réalisme du produit obtenu en termes de respect des formes. Ces deux aspects, de natures physique et géomorphologique respectivement, sont essentiels dans l'évaluation de la qualité que l'on peut attendre des produits topographiques issus de la mission Biomass.

Dans les deux cas, le fait que l'on s'intéresse à des surfaces cachées rend plus difficile l'évaluation. Ces deux problèmes correspondent à deux types de validation des MNT, que l'on peut appeler validation externe et validation interne (Polidori, 1995). La validation externe, ainsi appelée parce qu'elle utilise des données de référence, peut utiliser par exemple des positions GPS relevées dans des clairières pour évaluer le MNT sous forêt, ou les mesures d'un géoradar pour évaluer le modèle 3D du substrat sous une couche de sable. Compte tenu de la difficulté de collecte des données topographiques de contrôle dans les



zones couvertes par la végétation et le sable, la validation interne prend toute son importance. Il s'agit d'une méthode de contrôle de qualité sans données de référence, qui consiste à vérifier la vraisemblance du MNT selon des critères géomorphologiques (Polidori et al., 2014). Ainsi, la surface topographique sous forêt (contrairement à la canopée) et la surface du substrat en zone aride (contrairement à la surface de sable) sont souvent façonnées par l'eau, ce qui affecte par exemple la distribution des pentes et les propriétés fractales (Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997). Le calcul de la dimension fractale doit permettre en région désertique de différencier le sol du substrat et de vérifier si le modèle 3D obtenu à travers le sable à partir des données Biomass représente bien le substrat.

Ainsi, les données de la mission Biomass présentent un réel potentiel pour la cartographie du relief sous les forêts, et du substrat sous les déserts de sable, mais la qualité des MNT obtenus reste à évaluer, et du fait qu'il s'agisse de surfaces cachées, cette évaluation constitue un véritable défi. ●

Contacts

Laurent POLIDORI

laurent.polidori@cesbio.cnes.fr

Thierry KOLECK - Ludovic VILLARD

Thuy LE TOAN

CESBIO, Université de Toulouse, CNES/
CNRS/IRD/UPS, Toulouse, France

Mhamad EL HAGE

Laboratoire d'Etudes Géospatiales (LEG),
Faculté de Génie, Université Libanaise,
Tripoli, Liban

Philippe PAILLOU

Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux,
Université de Bordeaux, Pessac, France

Références

Correia A. H. (2011) *Metodologias e resultados preliminares do projeto radiografia da Amazônia*. Anais XV° Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, Brasil, INPE, p. 8083

Elachi C., Roth L.E. & Schaber G.G. (1984) *Spaceborne radar subsurface imaging in hyperarid regions*. IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing, GE-22:383-388.

ESA (2012) *Report for Mission Selection: Biomass, ESA SP-1324/1 (3 volume series)*, European Space Agency, Noordwijk, The Netherlands.

Farr T.G. & Kobrick M. (2000) *Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data*, Eos, Transactions American Geophysical Union 81(48):583-5.

Ghoneim E., Robinson C. & El-Baz F. (2007) *Radar topography data reveal drainage relics in the eastern Sahara*. International Journal of Remote Sensing, 28(8), pp.1759-1772.

Hamadi A., Villard L., Borderies P., Albinet C., Koleck Th. & Le Toan T. (2017) *Comparative Analysis of Temporal Decorrelation at P-Band and Low L-Band Frequencies Using a Tower-Based Scatterometer Over a Tropical Forest*, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 14, no. 11, pp. 1918-1922.

Huang Y., Ferro-Famil L. & Lardeux C. (2013) *Polarimetric SAR tomography of tropical forests at P-band*, IGARSS 2013.

Le Toan T., Quegan S., Davidson M.W.J., Balzter H., Paillou P., Plummer S., Papathanassiou K., Rocca F., Saatchi S., Shugart H. & Ulander L. (2011) *The BIOMASS mission: mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle*. Remote Sensing of Environment, 115 (11), pp. 2850-2860.

McCauley J.F., Schaber G.G., Breed C.S., Grolier M.J., Haynes C.V., Issawi B., Elachi C. & Blom R. (1982) *Subsurface valleys and geoarcheology of the eastern sahara revealed by shuttle radar*, Science, 218(4576):1004-20.

Minh D.H.T., Tebaldini S., Rocca F., Le Toan T., Villard L. & Dubois-Fernandez P. (2015) *Capabilities of BIOMASS Tomography for Investigating Tropical Forests*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.53, no.2, pp.965-975.

Paillou Ph., Schuster M., Tooth S., Farr T., Rosenqvist A., Lopez S. & Malézieux J.M. (2009) *Mapping of a major paleodrainage system in Eastern Libya using orbital imaging Radar: The Kufrah River*, Earth and Planetary Science Letters, vol. 277, pp. 327-333, doi: 10.1016/j.epsl.2008.10.029, 2009.

Paillou Ph., Ruault du Plessis O., Coulombeix C., Dubois-Fernandez P., Bacha S., Sayah N. & Ezzine A. (2011) *The TUNISAR experiment: Flying an airborne P-Band SAR over southern Tunisia to map subsurface geology and soil salinity*, PIERS

2011, Marrakesh, Marocco.

Polidori L. (1995) *Réflexions sur la qualité des modèles numériques de terrain*. Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection, vol. 139, pp. 10-19.

Polidori L., El Hage M. & Valeriano, M. D. M. (2014) *Digital elevation model validation with no ground control: application to the topodata DEM in Brazil*. Boletim de Ciências Geodésicas, 20(2), 467-479.

Robinson C.A., Werwer A., El-Baz F., El-Shazly M., Fritch T. & Kusky T. (2007). *The Nubian aquifer in southwest Egypt*. Hydrogeology Journal, 15(1), pp.33-45.

Rodriguez-Iturbe I. & Rinaldo A. (1997) *Fractal river basins: chance and self-organization*. Cambridge University Press, 564 p.

Tebaldini S. (2009) *Algebraic Synthesis of Forest Scenarios From Multibaseline PolInSAR Data*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(12) : 4132-4142.

Villard L., Le Toan T., Minh D.H.T., Mermoz S. & Bouvet A. (2016) *Chapter 9 - Forest Biomass From Radar Remote Sensing*, In Land Surface Remote Sensing in Agriculture and Forest, Ed. Nicolas Baghdadi and Mehrez Zribi, Elsevier, pp. 363-425.

ABSTRACT

The Biomass satellite mission will be launched by the European Space Agency in 2021 with a P-band synthetic aperture radar in order to map worldwide forest biomass, as well as the height and the disturbances of the forest cover. Several secondary products are also foreseen, such as 3D models of the topographic surface under the forests and that of the substratum under sand layers in deserts, taking benefit from the penetration capability of P-band radar waves and the ability of tomography to separate the contributions of different layers in a vertical backscattering profile. After demonstrating these possibilities during airborne campaigns, the quality of the 3D models expected from the Biomass mission remains to be assessed.