

# POLARIMETRIE RADAR COMPLETE ET PARTIELLE POUR LE SUIVI DES SURFACES TERRESTRES

Pierre-Louis Frison<sup>1</sup>, Cédric Lardeux<sup>2</sup>, Bénédicte Fruneau<sup>1</sup>, Jean-Paul Rudant<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Paris-Est  
LaSTIG, UPEM / IGN  
5 boulevard Descartes  
Cité Descartes – Champs-sur-Marne  
77455 Marne-la-Vallée Cedex 2  
pierre-louis.frison@u-pem.fr

<sup>2</sup> ONF – International  
Jardin Tropical  
45 bis avenue de la Belle Gabrielle  
94736 Nogent Cedex - France  
cedric.lardeux@onfinternational.com

## Résumé

Cet article présente quelques illustrations d'applications de données radar polarimétriques (complètes ou partielles) pour le suivi des surfaces terrestres. La première partie est dédiée aux données radar pleinement polarimétriques. Elle est introduite par un rappel théorique présentant leur spécificité. Puis quelques exemples sont présentés, principalement concernant la cartographie de la végétation et également les processus spatio-temporels de sédimentation dans une zone semi-aride en Tunisie. La deuxième partie est consacrée aux données partiellement polarimétriques du type de celles acquises par les capteurs Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) à bord des satellites Sentinel-1A/1B. Celles-ci seront largement utilisés dans les années futures en raison de leur apport significatif pour les études touchant aux observations des surfaces terrestres pour les sciences de l'environnement.

**Mots-clés** : radar, polarimétrie, classification, végétation, sédimentation, Sentinel-1

## Abstract

*This article presents some illustrations of (fully or partial) polarimetric radar data applications for the monitoring of terrestrial surfaces. The first part is dedicated to fully polarimetric radar data. Firstly, a theoretical reminder presents the specificity of fully polarimetric data. Then illustrations are given for vegetation types cartography as well as spatio-temporal processes of sedimentation in a semi-arid area in Tunisia. The second part focuses on partially polarimetric data, of the type acquired by the Sentinel-1A/1B satellite SAR sensors, which will be widely used in future years due to their significant contribution to land surface observations studies for environmental sciences.*

**Keywords**: radar, polarimetry, classification, vegetation types, sedimentation, Sentinel-1

## 1. Introduction

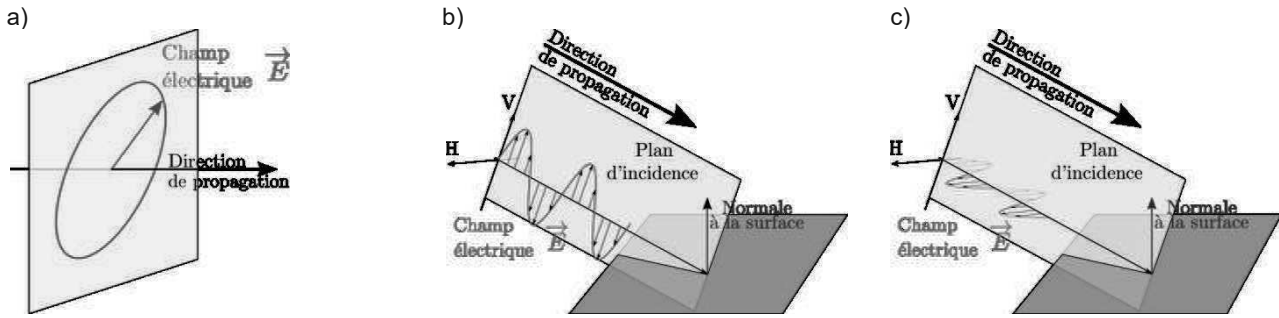
La télédétection radar, effectuée par des capteurs actifs opérant dans des longueurs d'ondes supérieures au centimètre, permet des observations de jour comme de nuit, indépendamment de la couverture nuageuse. Les données radar offrent une complémentarité avec les données optiques en terme de longueur d'onde. De plus, elles permettent des observations sous différentes polarisations, fournissant différentes réponses selon le type de surface considérée. Les capteurs radar satellitaires peuvent réaliser des acquisitions sous différentes configurations de polarisation : mono, double, partiellement ou pleinement polarimétrique. Dans cet article, nous proposons d'illustrer l'apport de ces différents types de données pour le suivi des surfaces terrestres. Une première partie est dédiée aux données radar pleinement polarimétriques, une seconde aux données partiellement polarimétriques.

## 2. Rappels théoriques sur la polarimétrie radar

La polarimétrie radar analyse la polarisation de l'onde rétrodiffusée par la surface observée en fonction de la polarisation de l'onde incidente (Lee et Pottier, 2009, Massonet et Souyris, 2008). La polarisation d'une onde électromagnétique correspond à la trajectoire décrite par l'extrémité du champ électrique au cours du temps. Celui-ci évolue dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation. Pour une onde cohérente (telle que celle émise par un radar), qui est une onde complètement polarisée, la polarisation la plus générale est elliptique : l'extrémité du champ électromagnétique décrit alors une ellipse dans le plan perpendiculaire à sa direction de propagation (figure 1). Lorsque l'ellipse est complètement aplatie, on parle de polarisation linéaire. Dans ce cas, lorsque le champ électromagnétique est inclus dans le plan défini par l'axe de visée et la normale à la surface observée (appelé plan d'incidence), l'onde est dite polarisée verticalement (notée V, fig. 1b).

Quand le champ électrique est orthogonal au plan d'incidence, l'onde est dite polarisée horizontalement (notée H, fig. 1c). Les capteurs radar satellitaires utilisent jusqu'à présent des ondes de polarisations linéaires. Une acquisition radar est donc caractérisée par 2 lettres, XY, pour une émission en polarisation X (= H ou V) et une pour la réception en polarisation Y (= H ou V). Un radar pleinement polarimétrique permet de mesurer les 4 termes (chacun comportant une amplitude et une phase)

de la matrice de diffusion  $S = \begin{pmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{pmatrix}$  caractérisant la surface observée à partir des caractéristiques des champs électriques émis  $\vec{E}_i$  et rétrodiffusés  $\vec{E}_d$  selon l'équation :  $\vec{E}_d = \frac{e^{jk_r r}}{r} S \vec{E}_i$  où  $r$  est la distance surface observée – capteur, et  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  le nombre d'onde associé à la longueur d'onde  $\lambda$ .

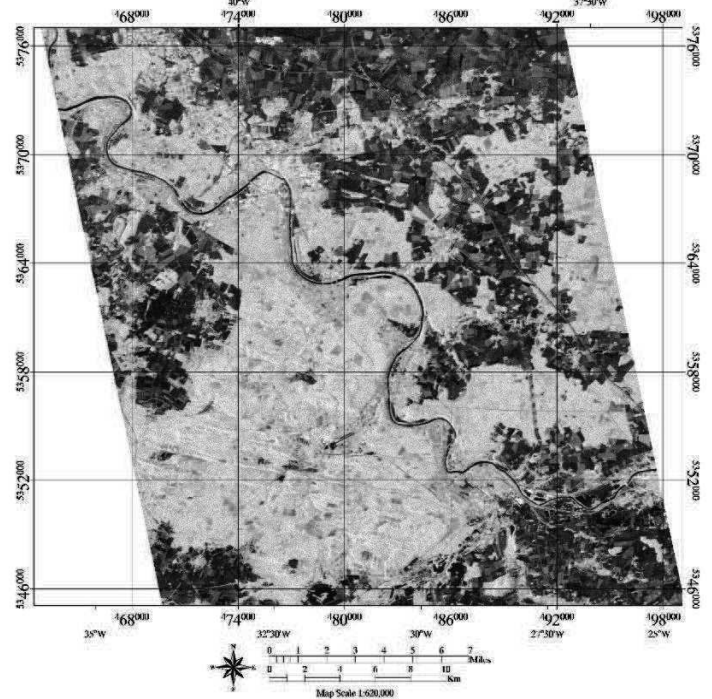


**Figure 1 :** a) Champ électromagnétique cohérent de polarisation elliptique quelconque. b) Champ de polarisation linéaire verticale, c) Champ de polarisation linéaire horizontale.

Jusqu'en 2007, les Radar à Synthèse d'Ouverture RSO satellitaires ont réalisé des acquisitions dans une ou deux configurations de polarisations linéaires (à l'exception de SIR-C, embarqué à bord de la navette spatiale Endeavour lors de 2 missions d'une dizaine de jours en 1994, et de missions aéroportées ponctuelles). Par exemple, les RSO à bord des satellites ERS-1/2 ont opéré en polarisation VV, celui à bord de Radarsat en polarisation HH. Dans ce cas, seule l'intensité de l'onde rétrodiffusée a été utilisée (hormis pour la technique d'interférométrie multi-passes exploitant la phase de l'onde radar). Le mode « Alternate Polarization » du RSO ASAR à bord du satellite ENVISAT a fourni des acquisitions selon deux configurations de polarisations HH/HV, VV/HV ou HH/VV. L'information de la différence de phase entre les deux canaux de polarisations n'existant pas, seule l'information de l'intensité radar mesurée dans chacune des deux polarisations concernées était disponible. La visualisation d'une même scène selon les intensités sous différentes polarisations permet néanmoins d'accéder à des informations complémentaires, comme illustré en figure 2. Celle-ci représente la forêt de Fontainebleau, imagée par le capteur PALSAR en bande L (de longueur d'onde  $\lambda \approx 24$  cm) à bord du satellite japonais ALOS ; les intensités des réponses radar acquises en polarisation HH, HV et VV sont visualisées respectivement en Rouge, Vert et Bleu. (En fait, ALOS-PALSAR est un capteur pleinement polarimétrique. Il acquiert donc les intensités et les phases des ondes rétrodiffusées en polarisation VV, HV, et HH. La composition colorée figure 2 est bel et bien une image de polarimétrie partielle puisqu'elle n'utilise que les intensités acquises dans ces 3 polarisations).

D'une manière générale, la polarisation HH met en évidence les zones pour lesquelles l'onde a subi une double réflexion, caractéristique de zones urbaines ou de végétation inondée (couleur rouge-rosée), HV met en

évidence les zones de diffusion de volume, se produisant pour de la végétation dense (couleur verte) où l'onde a été fortement dépolarisée en raison des diffusions multiples sur les diffuseurs élémentaires, et VV fait ressortir les surfaces de sols nus ou de végétation peu dense (couleur bleue).

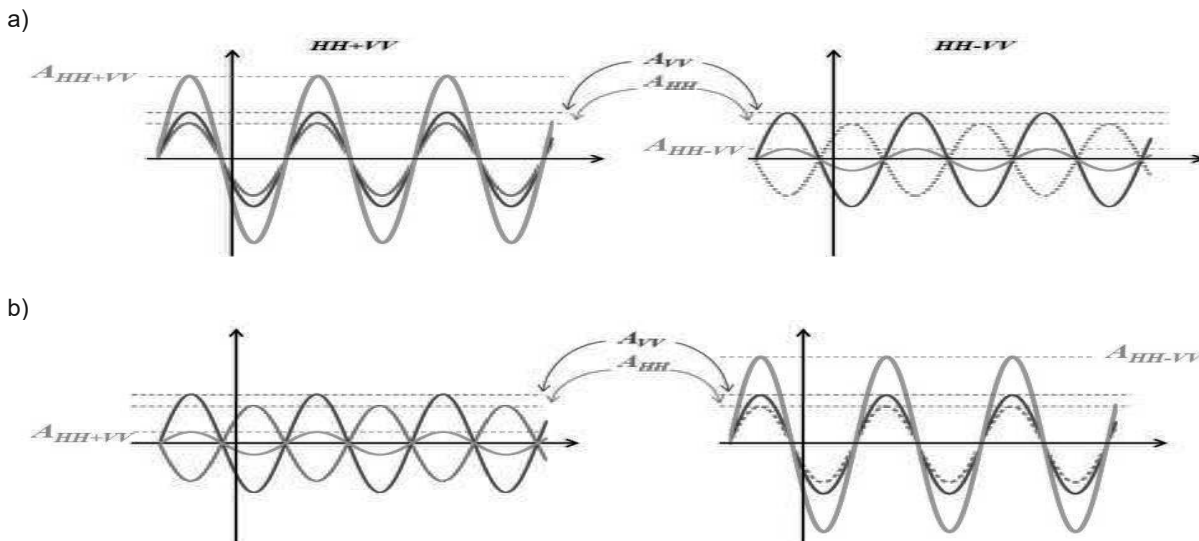


**Figure 2 :** Composition colorée représentant les intensités dans différentes polarisations  $|S_{HH}|^2$  (rouge),  $|S_{HV}|^2$  (vert), et  $|S_{VV}|^2$  (bleu) d'une acquisition PALSAR faite le 5 juin 2007 sur la forêt de Fontainebleau. Les zones urbaines apparaissent en teintes rouges, les zones de forêt en vert.

Depuis 2007, différents capteurs RSO opérant en mode pleinement ou partiellement polarimétriques ont été mis en orbite. Les observations polarimétriques acquises par ALOS-PALSAR 1 et 2 en bande L ( $\lambda \approx 23.6$  cm) sont complétées avec les RSO polarimétriques de Radarsat-2 et TerraSar-X respectivement en bande C ( $\lambda = 5.6$  cm) et X ( $\lambda = 3.1$  cm). Ces capteurs permettent de caractériser entièrement le comportement polarimétrique de la surface observée : ils permettent d'estimer la polarisation de l'onde rétrodiffusée quelle que soit la polarisation de l'onde incidente. Le comportement polarimétrique d'une surface naturelle est principalement fonction de la structure géométrique (forme, orientation, répartition) des diffuseurs élémentaires la constituant. Son estimation présente donc un fort potentiel pour discriminer notamment différents types de parcelles forestières, en fonction des espèces et de leur stade de développement.

Les capteurs radar polarimétriques permettent de mesurer non seulement l'intensité des ondes rétrodiffusées mais également les phases différentielles entre les différentes polarisations (ou phases polarimétriques).

Le comportement de la phase polarimétrique améliore significativement la discrimination des mécanismes de diffusion comme l'illustre l'exemple suivant (figure 3). Dans le cas d'une diffusion de surface sur des sols nus par exemple, les réponses radar en polarisation HH et VV sont en phase (fig. 3a). Dans ce cas l'amplitude  $A_{HH+VV}$  de la somme des polarisations est bien supérieure à celle de leur différence  $A_{HH-VV}$ . Après une réflexion double, telle que celle associée à la réponse d'un dièdre observé pour de la végétation inondée (réflexion eau – tronç) ou en zone urbaine (réflexion sol-murs), les réponses radar en HH et VV sont en opposition de phase (fig. 3b). Dans ce cas, l'amplitude  $A_{HH-VV}$  est bien supérieure à  $A_{HH+VV}$ . Ces deux cas de figure ne pourraient être dissociés à partir de la seule mesure des intensités en polarisation HH et VV. C'est la raison pour laquelle les images radar pleinement polarimétriques sont souvent représentées selon une composition colorée utilisant les modules de combinaisons de polarisation  $|S_{HH} + S_{VV}|^2$ ,  $|S_{HH} - S_{VV}|^2$ , et  $|S_{HV}|^2$ , plus communément appelée représentation de Pauli (Massonnet et Souyris, 2008).

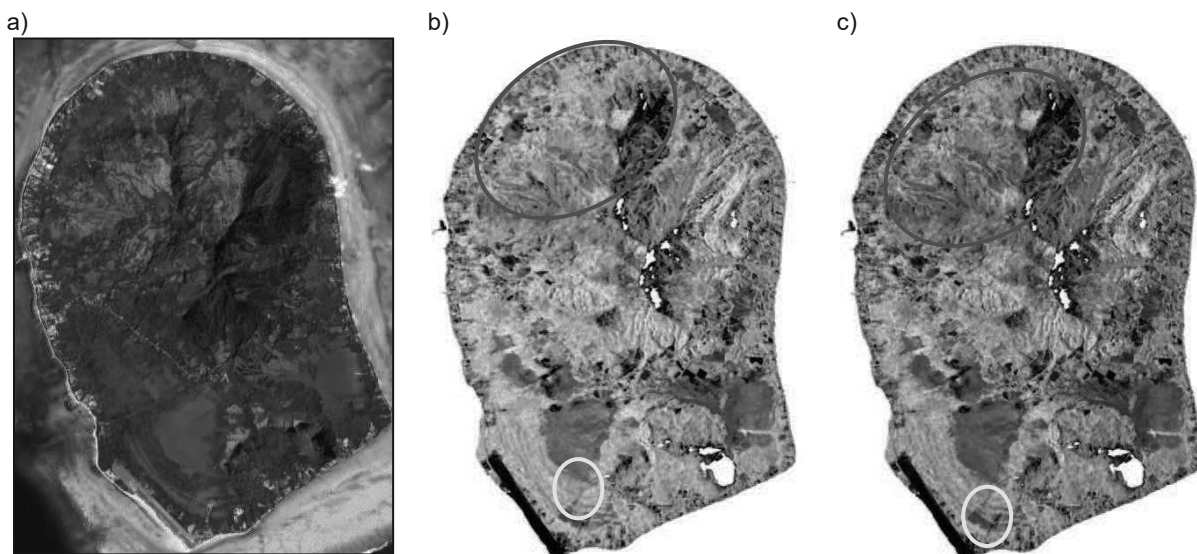


**Figure 3** : Somme et soustraction de 2 ondes a) en phase, telles que les réponses en polarisation HH et VV pour une diffusion de surface (sols nus) ; b) en opposition de phase, telles que les réponses en polarisation HH et VV observées lors d'une diffusion double (zone urbaine ou végétation inondée).

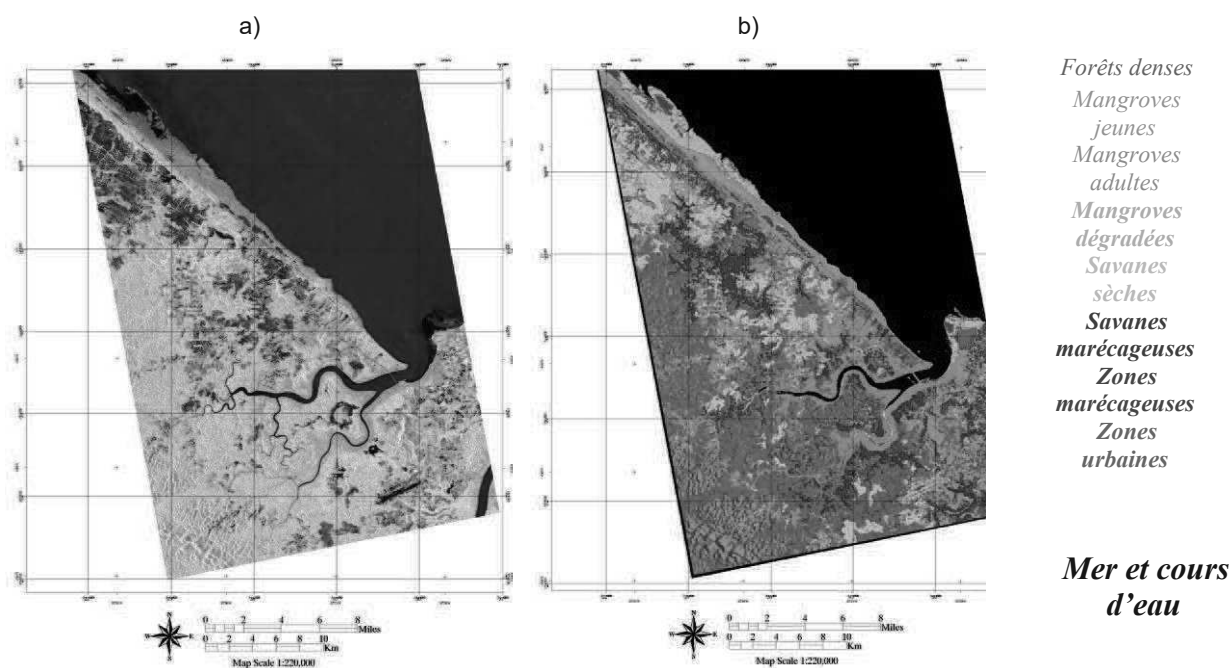
La figure 4 montre deux compositions colorées d'une acquisition polarimétrique réalisée sur l'île du Tubuai, en Polynésie française, par le capteur aéroporté américain AIRSAR en bande L ( $\lambda \approx 23.6$  cm). Cette île est majoritairement occupée par de la végétation (forêts, landes, marais, ...) avec quelques zones de bâti sur le littoral. La première composition colorée représente les intensités des polarisations HH, HV, et VV alors que la deuxième représente les intensités des canaux HH-HV, HV, HH+HV respectivement dans les canaux R, V, B. On peut voir qu'elles sont relativement similaires, avec cependant des différences apparaissant par exemple sur des zones de landes (cercles marrons) et un marais (cercles jaunes).

Dans ce cas la teinte bleutée des landes et rosée du marais dans la composition de Pauli indique une composante significative de la diffusion du sol sous la végétation pour les landes et de double rebond sur le marais.

De nombreux paramètres ont été dérivés des données polarimétriques afin d'exploiter la richesse de l'information qu'elles contiennent. Ainsi les degrés de corrélation entre les réponses observées avec différentes polarisations (appelés degré de cohérence polarimétrique), les paramètres des décompositions de Freeman (Freeman et Durden, 1998),  $H/A/\alpha$ , (Lee et Pottier 2009) sont autant de paramètres utiles à la discrimination des différents types de surfaces observées.



**Figure 4 :** Île du Tubuai. a) image optique (© Googleearth). Composition colorée d'une acquisition radar polarimétrique en bande L ; b)  $|S_{HH}|^2$ ,  $|S_{HV}|^2$ ,  $|S_{VV}|^2$ ; c) représentation de Pauli :  $|S_{HH} - S_{VV}|^2$ ,  $|S_{HV}|^2$ ,  $|S_{HH} + S_{VV}|^2$  respectivement pour les canaux R, V, et B.



**Figure 5 :** a) Composition colorée (R :  $|S_{HH}|^2$ , V :  $|S_{HC}|^2$  ; B :  $|S_{VV}|^2$ ) d'une acquisition PALSAR sur les environs de Cayenne, en Guyane. Les zones urbaines apparaissent en teintes roses (par exemple, Cayenne sur la droite), les zones de forêt en vert, et les sols nus ou parcelles de végétation peu dense en bleu. b) Classification obtenue à partir de multiples indices polarimétriques.

### 3. Exemples de résultats de classifications

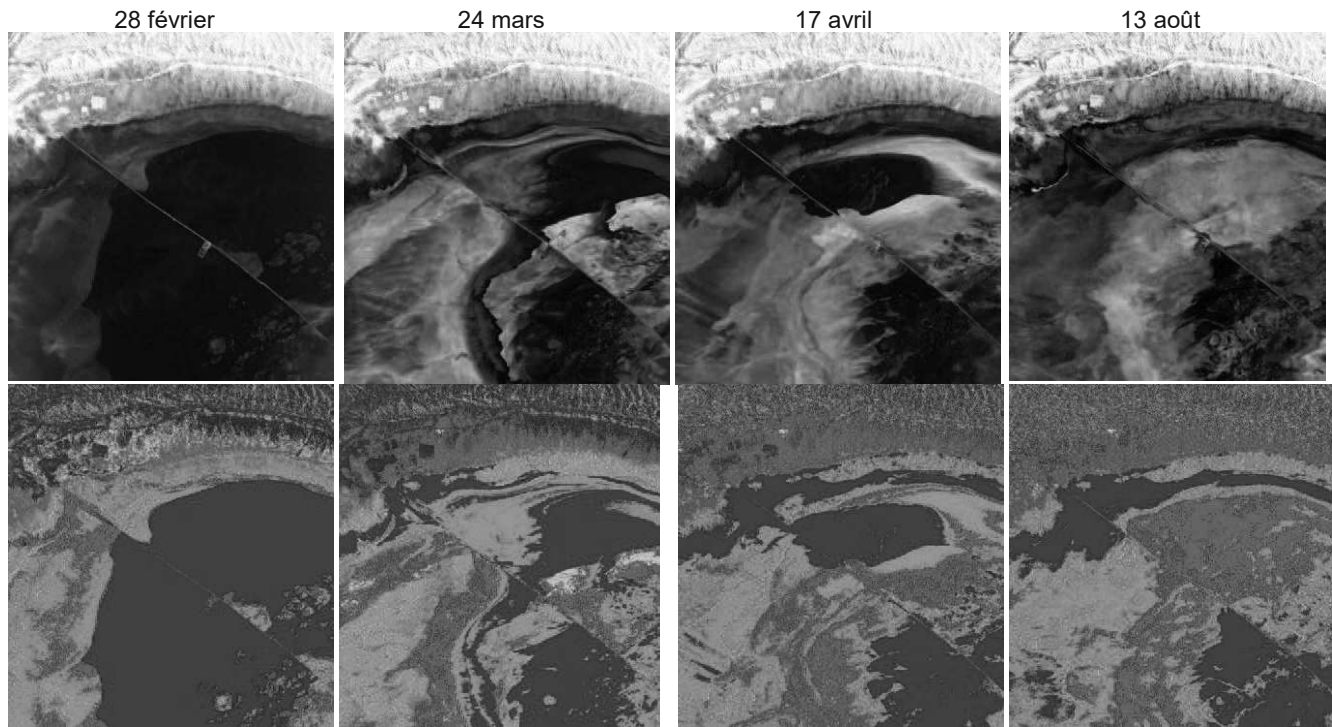
#### 3.1. Utilisation des données pleinement polarimétriques

La figure 5 montre une composition colorée utilisant les intensités du signal acquis dans les polarisations HH, HV, et VV par le RSO ALOS-PALSAR sur la région de Cayenne (fig. 5a) et la classification (fig. 5b) des différents types de

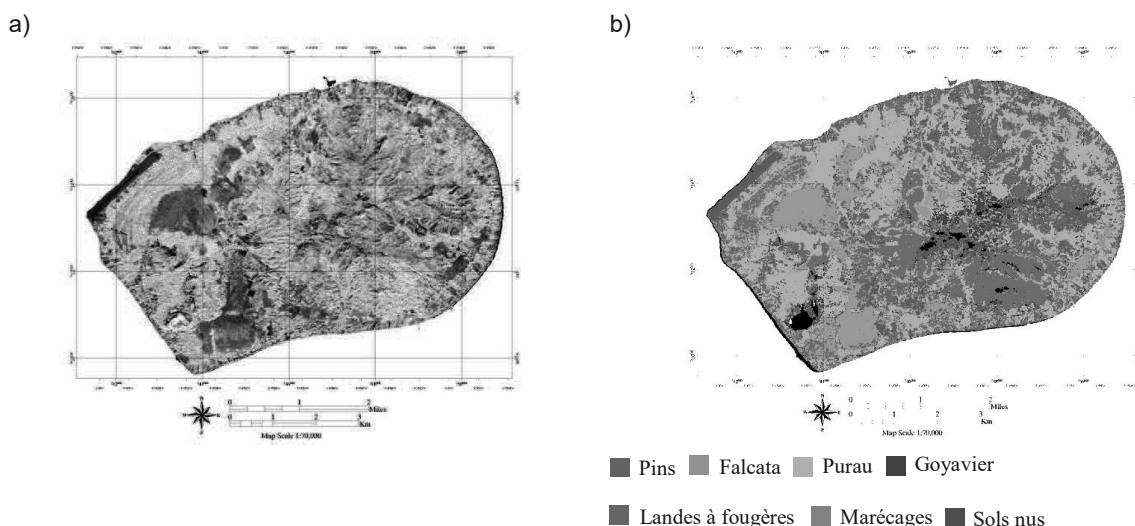
végétation qu'il a été possible de réaliser à partir de multiples indices polarimétriques (tels que les différents paramètres de décomposition de Pauli, de Freeman, rapports de polarisation, degrés de cohérence,...). Elle permet de discriminer : une classe de forêt dense, trois classes de mangroves selon leur stade de maturité, et deux classes de savanes (sèche/marécageuse). La figure 6 est une illustration spectaculaire de l'apport de l'information polarimétrique pour le suivi des surfaces

terrestres. Elle montre une série temporelle d'images polarimétriques (représentées suivant la décomposition de Pauli) acquises en 2009 par le RSO à bord du satellite RADARSAT-2 sur le Chot El Djerid en Tunisie (Frison *et al.*, 2013). Les classifications automatiques basées sur la décomposition  $H/A/\alpha$  et la distribution de Wishart (Lee et Pottier, 2009) supposée être vérifiée *a priori* par les

données pleinement polarimétriques sont affichées en dessous. Elles mettent clairement en évidence les structures spatiales des séries évaporitiques liées au processus de sédimentation dans cet environnement aride régulièrement inondé (comme ici en février).



**Figure 6 :** haut : séquence temporelle d'images pleinement polarimétriques acquises par le RSO à bord du satellite RADARSAT-2 représentées selon la décomposition de Pauli ( $R : |S_{HH} - S_{VV}|^2$ ;  $V : |S_{HV}|^2$ ;  $B : |S_{HH} + S_{VV}|^2$ ); bas : classification automatique basée sur la distance de Wishart et la décomposition  $H/A/\alpha$  (Frison *et al.*, 2013).



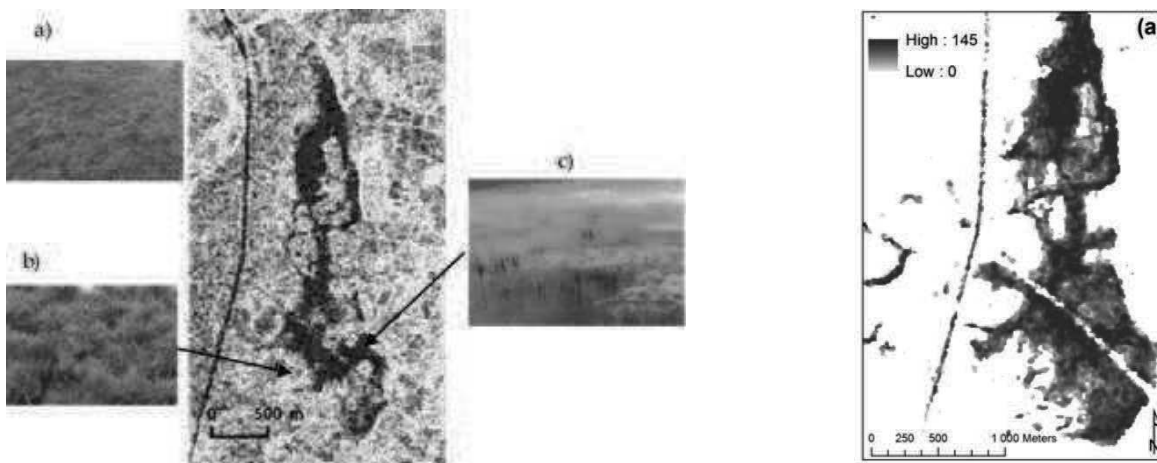
**Figure 7 :** Composition colorée représentant l'île de Tubuai (Polynésie Française) à partir d'images acquises par le capteur aéroporté AIRSAR. Rouge : bande L polarisation HH ( $|S_{HH}|^2$ ), Vert : bande P polarisation HV ( $|S_{HV}|^2$ ), Bleu : bande C polarisation VV ( $|S_{VV}|^2$ ). b) Classification de l'île de Tubuai obtenue en combinant les 3 bandes de fréquence (Lardeux *et al.*, 2009).

Enfin, l'observation conjointe d'une même scène en conditions polarimétriques acquises dans différentes longueurs d'onde améliore encore la capacité de discrimination des différents types de surface. La figure 7a en est une illustration, pour la cartographie de la végétation. Elle représente une composition colorée de l'île de Tubuai, acquise en bande P (polarisation HV), L (polarisation HH) et C (polarisation VV) par le capteur aéroporté AIRSAR. Des acquisitions de l'île en bande L et P en mode pleinement polarimétrique, ainsi que l'intensité en polarisation VV en bande C ont ainsi pu être réalisées. L'île est globalement caractérisée par 4 types de parcelles forestières différentes (Pin, Falcata, Purau, Guava), de la végétation rase (landes à fougères, marais), et du sol nu. La classification obtenue à partir des différents indices polarimétriques en bande L et P ainsi qu'avec le canal d'intensité en bande C (polarisation VV) est présentée fig. 7b. La classification obtenue à partir de la combinaison de ces 3 bandes de fréquences améliore de plus de 10% les performances en comparaison à celles obtenues à partir des acquisitions polarimétriques en bande L ou en bande P uniquement. De manière surprenante, l'apport de la bande C est significatif, indiquant que la structure géométrique de la couche supérieure de la canopée joue un rôle important pour la discrimination des différents types de végétation (Lardeux et al., 2011). De plus, l'utilisation de la bande X, caractérisée par des longueurs d'ondes plus petites, et une résolution spatiale plus fine, présente un grand intérêt pour

la cartographie, notamment, par l'analyse des textures qui sont très riches pour la discrimination de la végétation.

### 3.2. Utilisation des données partiellement polarimétriques : cas de Sentinel-1

La mise en orbite des satellites Sentinel-1A et 1B respectivement en avril 2014 et 2016, avec à leur bord un RSO opérant en bande C constitue une révolution dans le panorama de la télédétection satellitaire. Ces capteurs permettent des acquisitions systématiques tous les 6 jours sur beaucoup de régions du globe, indépendamment de la couverture nuageuse. Parmi les différents modes d'acquisitions programmables de ces RSO, c'est le mode IW (Interferometric Wide Swath) en polarisation VV/HV qui est privilégié sur les surfaces terrestres. Ces acquisitions sont caractérisées par une résolution spatiale d'environ 20 m (avec une taille de pixel de 10 m) pour une largeur de fauchée de 250 km et sont partiellement polarimétriques : seule la différence de phase entre VV et VH est mesurée, l'onde est émise en polarisation V et le signal rétro-diffusé est mesuré dans les polarisations H et V. Il est à noter qu'un mode d'acquisition pleinement polarimétrique, imposant l'émission alternée d'impulsions en polarisation H et V, nécessiterait de réduire de moitié la largeur de la fauchée pour une résolution spatiale en azimuth identique. Ainsi le temps de revisite serait double et passerait à 12 jours.

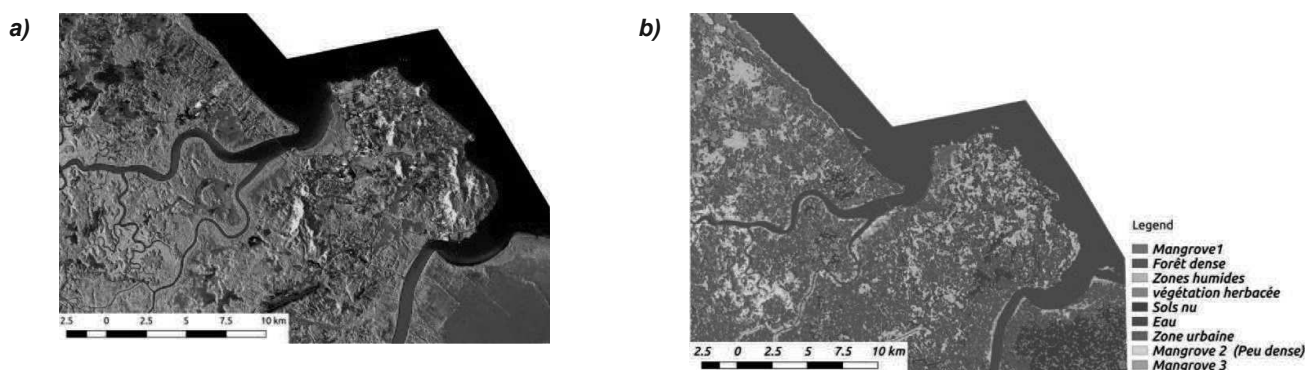


**Figure 8 :** à gauche extrait d'une composition colorée ( $R : |S_{VV}|^2$ ;  $V : |S_{VH}|^2$ ;  $B : |S_{VH}|^2 / |S_{VV}|^2$ ) d'une acquisition Sentinel-1 réalisée le 12 mars 2015 sur le marais poitevin. Les zones d'eau libres, la végétation inondée, et les prairies non inondées apparaissent respectivement en bleu foncé, cyan et orange ; à droite durée (en jours) des inondations estimée à partir d'une série temporelle de 14 acquisitions Sentinel-1 réalisées entre décembre 2014 et juin 2015.

La combinaison de la haute résolution spatiale et de la haute fréquence temporelle ouvre la voie à pléthore d'applications environnementales inaccessibles jusqu'alors. La figure 7 présente un extrait de la carte de la durée des inondations qu'il a été possible d'estimer sur le marais poitevin à partir d'une série temporelle de 14 acquisitions Sentinel-1A réalisées entre décembre 2014 et juin 2015 (Cazals et al., 2016).

De plus, l'utilisation de séries temporelles acquises par ces capteurs améliore aussi fortement le pouvoir de discrimination des différents types de végétation, en raison

des différences observées dans leurs variations saisonnières. La figure 9a montre une composition colorée obtenue en effectuant la moyenne temporelle de 24 images acquises par Sentinel-1 en 2017 sur la région de Cayenne en Guyane française. Le résultat de la classification obtenue à partir de cette série temporelle constituée de 20 acquisitions, pour 3 polarisations chacune (VV, VH, et VH/VV) est montrée sur la figure 9b. L'algorithme utilisé est celui des « forêts aléatoires ». Il permet de discriminer 4 types de végétation arborée différentes (forêts, mangroves, des prairies, des zones humides et des sols nus).



**Figure 9 :** a) Composition colorée ( $R : |S_{VV}|^2$ ;  $V : |S_{VH}|^2$ ;  $B : |S_{VH}|^2 / |S_{VV}|^2$ ) de la moyenne temporelle de 20 acquisitions Sentinel-1 réalisées en 2017 sur la région de Cayenne, en Guyane française. b) Classification basée sur l'algorithme des « forêts aléatoires » réalisée à partir de la série temporelle.

#### 4. Conclusion

Depuis 2007, plusieurs capteurs RSO fournissent une des acquisitions continues en polarisation partielle (ALOS-PALSAR, Radarsat-2, Sentinel-1). Ce mode d'acquisition, émettant une onde dans une polarisation donnée, et captant l'onde rétrodiffusée dans deux polarisations différentes, permet de conserver la même taille de la fauchée que pour un mode d'acquisition en polarisation simple.

Les données radar pleinement polarimétriques fournissent des informations très utiles pour la discrimination des différents types de surfaces terrestres, et notamment les différents types de végétation, en raison de leur sensibilité à la structure géométrique des couverts végétaux. Depuis 2007, plusieurs capteurs pleinement polarimétriques ont été placés en orbite (PALSAR, Radarsat-2, TerraSAR-X,...). S'ils permettent d'acquérir occasionnellement des données pleinement polarimétriques, c'est cependant un mode de polarisation partielle (émission d'une onde en polarisation fixe, V ou H, réception sur 2 polarisations simultanées, V et H) qui est privilégié par les agences spatiales pour l'observation des surfaces terrestres en continu. En effet, ce mode d'acquisition permet une fauchée de taille identique à celui en polarisation simple, contrairement aux acquisitions pleinement polarimétriques, nécessitant une alternance de la polarisation émise (V et H) induisant une réduction de moitié de la fauchée. C'est l'une des raisons pour lesquelles c'est ce mode de polarisation duale partielle (VV/VH) qui a été choisi pour les satellites Sentinel-1A et 1B pour l'observation des surfaces terrestres. Cette mission apparaît révolutionnaire dans le paysage de la télédétection radar (fauchée de 250 km, résolution spatiale 20 m, période d'acquisition de 6 jours) et rencontre d'ores et déjà un fort succès en termes d'applications environnementales. Elle s'inscrit de plein pied dans l'ère du *big data*, et laisse envisager dans un avenir proche la faisabilité d'une mission spatiale pleinement polarimétrique.

Celle-ci permettrait des observations globales et continues qui conserveraient la richesse de l'information pleinement polarimétrique pour la caractérisation des surfaces terrestres.

#### Références

- Cazals C., Rapinel S., Frison P.-L., Bonis A., Mercier G., Mallet C., Corgne S., Rudant J.-P., 2016. *Mapping and characterization of hydrological dynamics in a coastal marsh using high temporal resolution Sentinel-1A Images*. Remote Sensing, vol. 8, 570. <http://www.mdpi.com/2072-4292/8/7/570/pdf>
- Frison P.-L., Paillou P., Sayah N., Pottier E., Rudant J.-P., 2013. *Spatio-temporal monitoring of evaporitic processes using multiresolution C-band radar remote sensing data: Example of the Chott el Djerid, Tunisia*. Can. J. Rem. Sens., vol. 39, n°2, pp. 127-137.
- Lardeux C., Frison P.-L., Tison C., Souyris J.-C., Stoll B., Fruneau B., Rudant J.-P., 2009. *Support Vector Machine for multi-frequency SAR polarimetric data classification*. IEEE Trans. Geosc. Remote Sensing, vol. 47, n°12, pp. 4143-4152.
- Lardeux C., Frison P.-L., Souyris J.-C., Tison C., Stoll B., Fruneau B., Rudant J.-P., 2011. *Classification of tropical vegetation using multifrequency partial SAR polarimetry*. IEEE Geosci. Rem. Sens. Letters, vol. 8 - 1, pp. 133-137.
- Lee J. S., Pottier E., 2009. *Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications*, CRC Press, 392.
- Massonnet D., Souyris J.-C., 2008. *Imaging with synthetic aperture radar*. EFPL Press, 250.

#### Remerciements

Nous tenons à remercier le CNES, l'ONFI et le MTES pour leur soutien dans le cadre de nos travaux touchant à la télédétection radar.