

Résumé en français

Le travail décrit dans cette thèse porte sur *“l’interprétation et le recalage d’images SAR Polarimétriques à Haute Résolution”*.

La télédétection radar est de plus en plus utilisée dans le cadre de l’observation du sol et de la surveillance de l’environnement. Ceci est en partie dû au fait que les images radars peuvent être acquises indépendamment des conditions atmosphériques, de jour comme de nuit. En plus, les caractéristiques physiques du radar peuvent être sélectionnées en fonction du but recherché.

Cependant, l’analyse de l’information recueillie par le capteur radar s’avère délicate et complexe aussi bien pour des systèmes d’interprétation automatique que pour des photo-interprètes humains. Une des causes de cette difficulté provient du fait que le signal mesuré par le radar est directement représentatif des interactions onde-matière et donc très sensible à la distribution et à la nature des zones illuminées présentes à la surface du sol. L’interprétation des images radar nécessite donc une compréhension des phénomènes physiques qui interviennent dans cette interaction onde-matière. D’autres causes de difficultés proviennent de la géométrie particulière utilisée pour l’acquisition des images SAR et la présence de speckle. Ces aspects sont abordés dans le chapitre 2 de ce manuscrit, qui présente l’essentiel des principes des radars imageurs à synthèse d’ouverture, en insistant plus particulièrement sur les principaux phénomènes physiques déterminant l’apparence des images radar. Dans ce chapitre on introduit brièvement le speckle, les principaux mécanismes de rétrodiffusion, la géométrie de visée, les problèmes géométriques (ombres, repliements et dilatations) et on traite succinctement les problèmes d’étalonnage des images radar et des mesures de la qualité d’image.

Les premiers systèmes SAR satellitaires utilisés en télédétection (p.ex. ERS, Radarsat, JERS) étaient des systèmes mono-bandes, mono-polarisations, permettant d’acquérir des images à basse résolution spatiale (quelques dizaines de mètres). Comme les ondes radar avec différentes polarisations et fréquences interagissent différemment avec les structures présentes au sol, il est clair que la combinaison de plusieurs polarisations et/ou fréquences permet d’améliorer les résultats obtenus par l’interprétation d’images. C’est pour cette raison que les systèmes radar futurs auront la possibilité d’acquérir des images multi-canaux et principalement multi-polarisation (polarimétriques), avec une haute résolution spatiale, c.à.d. de l’ordre du mètre. Il existe déjà actuellement des systèmes aéroportés polarimétriques (et multi-fréquences) à haute-résolution.

Le but du travail présenté dans cette thèse est de chercher de nouveaux et meilleurs outils automatiques d’aide à l’interprétation d’images SAR polarimétriques à haute résolution et de développer une stratégie pour recalibrer ces images automatiquement avec d’autres

images ou avec des cartes topographiques de la même région.

Les trois premiers chapitres de cette thèse présentent, de façon très synthétique, les rappels des notions fondamentales liées à l'imagerie SAR polarimétrique et nécessaires à la compréhension des différents concepts utilisés dans la suite du document. Les chapitres suivants présentent le corps principal du travail effectué, c.à.d. le développement d'outils automatiques d'aide à l'interprétation des images SAR polarimétriques.

Puisque cette thèse étudie principalement l'interprétation d'images SAR polarimétriques, il nous a semblé utile de rappeler quelques notions de la polarimétrie. C'est le sujet du troisième chapitre qui est consacré à une présentation de la théorie de base de la polarimétrie radar et qui présente notamment les différentes représentations de l'information vectorielle liée au champ électromagnétique rétrodiffusé (vecteurs de Jones, de Stokes, vecteurs k_L et k_P , matrices de rétrodiffusion, de cohérence polarimétrique et de covariance polarimétrique). Le chapitre introduit également la notion de matrice de (rétro-)diffusion et examine l'influence de divers types de rétrodiffusion sur cette matrice de diffusion. Le chapitre se termine par une présentation des images SAR polarimétriques (bande L) qui seront utilisées tout au long du manuscrit pour valider les différentes méthodes développées. Les images utilisées dans cette thèse sont des images SAR polarimétriques en bande L, provenant du système aéroporté E-SAR du centre spatial allemand (DLR).

Le quatrième chapitre est consacré à l'analyse des différentes statistiques présentes au sein d'une image SAR. La présence physique du speckle se traduit par une description statistique de l'information de réflectivité dans des régions uniformes de l'image radar. Les lois statistiques de distribution du speckle dans des régions uniformes sont analysées dans les différents types d'images SAR mono-vue. On investigate notamment la distribution du speckle dans des régions uniformes de l'image complexe ainsi que des images amplitude, intensité et logarithme de l'intensité qui en sont déduites. Les statistiques du speckle sont utilisées dans la mise au point des différents détecteurs bas-niveau développés dans cette thèse. Le chapitre quatre s'intéresse également aux statistiques du second ordre qui permettent de décrire la dépendance des pixels dans un voisinage. A cette fin, on utilise la notion de "longueur de corrélation". On examine la corrélation spatiale entre les pixels voisins au sein d'une image (mono-canal). On vérifie que la principale contribution à cette corrélation spatiale est due à la réponse impulsionnelle (PSF) du système radar. Cependant on montre également que, dans les régions texturées, la corrélation spatiale devient de loin supérieure à celle prédite par la PSF. On examine également les corrélations inter-canaux polarimétriques ainsi que la combinaison de la corrélation spatiale et inter-canaux. La corrélation inter-canaux est estimée dans des exemples de différents types de couverture de sol et le résultat sera utilisé dans le chapitre sept pour définir une des caractéristiques qui permettent de détecter les agglomérations dans une image SAR polarimétrique.

Le cinquième chapitre constitue la partie principale et la plus innovatrice de la recherche effectuée et concerne la mise en oeuvre de procédures de détection de contours dans le cas d'images SAR polarimétriques à haute résolution. Le principe des détecteurs de contours proposés est classique et consiste à analyser l'information contenue dans deux zones d'analyse définies au sein d'une fenêtre glissante. Nous présentons deux démarches qui

peuvent être utilisées afin de détecter des contours dans des images polarimétriques, ou, plus généralement dans des images multi-canaux.

La première est basée sur la fusion de résultats obtenus après application de détecteurs de contours sur chaque canal séparément. Dans la deuxième approche un détecteur de contour unique, prenant en compte toute l'information polarimétrique, est développé. Pour ce faire, des méthodes, empruntées à la statistique multi-variée, sont utilisées dans le développement de nouveaux détecteurs de contours. Deux nouveaux détecteurs de contours sont proposés. Le premier est basé sur un test multi-varié d'hypothèse sur une différence de variance et est appliqué à l'image mono-vue complexe. Le second est basé sur un test d'hypothèse sur une différence de moyennes et appliqué à l'image en logarithme de l'intensité.

La première démarche, c.à.d. la fusion des résultats de détecteurs de contour sur chaque polarisation séparément, peut utiliser des détecteurs classiques (p.ex. le détecteur de Touzi). Nous proposons aussi deux détecteurs mono-canal basés sur des tests d'hypothèses, cette fois uni-varié. Un test sur la différence de moyennes et un sur la différence de médianes sont utilisés. Ils sont appliqués sur l'image logarithme de l'intensité.

Les performances des différentes approches considérées sont évaluées à l'aide des courbes ROC obtenues sur des images simulées ainsi que sur des parties d'images réelles où la vérité terrain est supposée connue. On montre que l'approche utilisant des méthodes multi-variées, et en particulier le détecteur basé sur un test multi-varié de différence de variance, présente les meilleurs résultats de détection. Ceci peut probablement être expliqué par le fait que les méthodes multi-variées utilisent la matrice de covariance entre canaux, ce qui revient, pour le test de différence de variances, à utiliser toute l'information polarimétrique.

Dans ce chapitre cinq une attention particulière est portée sur l'influence des corrélations spatiales sur le comportement des détecteurs. En effet, les tests d'hypothèse supposent que les observations dans chaque fenêtre d'échantillonnage soient indépendantes. A cause de la corrélation spatiale, cette hypothèse n'est pas vérifiée. Nous avons montré aussi bien empiriquement que théoriquement que cela résulte en une sous-estimation des seuils à fausses alertes constantes et nous avons proposé et comparé plusieurs méthodes permettant de résoudre les problèmes liés à la corrélation. Un sous-échantillonnage sur grille fixe, déduit de la fonction d'autocorrélation du capteur, donne les meilleurs résultats. L'application aux seuils des détecteurs d'un facteur de correction, basé sur la fonction d'autocorrélation, n'est utile que dans des régions non-texturées où la corrélation spatiale est uniquement due à la PSF du système imageur radar.

On termine la partie sur la détection de contours par la présentation d'un post-traitement permettant d'affiner la détection et la localisation des contours, suivie d'une proposition de fusion des résultats obtenus en sortie des différents détecteurs de contours étudiés. Pour chaque détecteur de contour proposé dans ce chapitre une analyse détaillée est proposée et les résultats sont présentés à différentes étapes dans la chaîne de traitement.

A la fin du chapitre cinq un détecteur de lignes est proposé en utilisant une modification de la géométrie des détecteurs de contours décrits auparavant. Ce détecteur est appliqué à la détection de lignes de communication (réseaux routiers et ferroviaire ainsi que les rivières) et les résultats sont utilisés dans la résolution du problème du recalage image/carte expliqué dans le chapitre huit.

Dans le chapitre six on aborde le problème de la segmentation et de la classification

de régions homogènes dans des images SAR polarimétriques. L'approche utilisée pour la segmentation consiste à étendre au cas vectoriel la méthode classique MUM (Merge Using Moments) en utilisant un des tests développés lors de l'analyse des détecteurs de contours ainsi qu'en introduisant une méthode basée sur la distance de Mahalanobis avec un seuil d'agglomération de régions adjacentes qui varie en fonction de la taille des régions à agglomérer.

La méthode utilisée pour la classification de régions est plus classique et consiste à mettre en place différents théorèmes de décomposition polarimétrique. L'idée de ces méthodes est de déduire, à partir de l'information polarimétrique, le type de rétrodiffusion qui a lieu dans la zone correspondante à chaque pixel de l'image. En faisant le lien entre les différentes couvertures de sol dignes d'intérêt et le type de rétrodiffusion qu'ils provoquent pour la fréquence radar utilisée, on obtient une méthode de classification d'image non-supervisée. Le but principale est de détecter les forêts et les villages, nécessaires pour le recalage abordé au chapitre huit. Cependant il s'est avéré que les méthodes de décomposition ne permettent pas de distinguer clairement les villages. En particulier il persiste une confusion entre forêts et villages due au fait que, dans les deux cas, les mêmes mécanismes de rétrodiffusion peuvent intervenir, ce qui est particulièrement vrai pour des images SAR en bande L utilisée dans ce travail.

Pour cette raison un détecteur spécifiquement dédié à la détection de villages ou zones bâties, a été développé. Il forme le sujet du chapitre sept. Le problème de la localisation de zones urbaines à partir d'images SAR est très actuel et relativement complexe. Après avoir présenté les différents mécanismes de rétrodiffusion pouvant intervenir au sein de zones urbaines, nous proposons un ensemble de caractéristiques image qui permettent de distinguer les zones urbaines du reste de l'image. Six caractéristiques sont définies. La première est basée sur les résultats de la segmentation en régions uniformes et consiste en une mesure de distance entre les centres de régions uniformes dans les huit directions principales. Les autres caractéristiques sont calculées au sein d'une fenêtre glissante et consistent en des mesures de statistique intra-canaux (variance et asymétrie) et inter-canaux (corrélation inter-canaux polarimétriques). Les différentes caractéristiques sont combinées en se servant de la régression logistique. Le résultat est évalué avec des courbes ROC et on démontre l'importance de l'information polarimétrique pour la détection des zones urbaines.

Enfin dans le huitième et dernier chapitre on présente une méthode hiérarchique de recalage et d'alignement d'images provenant de différents capteurs (radar, optique). La méthode proposée est basée sur l'utilisation de cartes topographiques de la zone étudiée, l'idée de base étant que pour chaque type d'image il devrait être possible de trouver un ou plusieurs objets disponible sur une carte et dont la détection dans l'image est facile. Comme le travail présenté dans cette thèse se limite aux images SAR, l'approche est illustrée pour le recalage de deux images SAR polarimétriques. L'approche proposée consiste en deux grandes parties. La première cherche un recalage entre chaque image et une carte topographique et la seconde trouve le recalage entre les différentes images en se servant des recalages déjà obtenus avec la carte. Le recalage entre l'image SAR et la carte est constitué de différentes étapes destinés à affiner le résultat progressivement.

Le but de la première étape est de trouver un recalage grossier entre la carte et l'image en

se servant de la position d'objets surfaciques de grande dimension. Dans cette étape et pour les images disponibles on a utilisé les forêts et les villages. Pour diverses raisons expliquées dans le texte il est difficile d'obtenir un appariement a priori des objets. Ce problème est résolu en se servant d'une méthode de vote analogue à la transformation de Hough. L'idée est de chercher, un à la fois, les paramètres d'une transformation géométrique simple telle que la transformation de similitude ou semi-affine. Par exemple, pour trouver la rotation on considère des paires d'objets présents à la fois sur la carte et dans l'image. Pour chaque couple de paires on détermine la rotation faisant correspondre l'orientation de la ligne reliant les objets. Les couples de paires d'objets qui correspondent à des objets physiquement identiques voteront pour la rotation correcte tandis que les autres, faux appariements, disperseront leur vote de façon aléatoire dans l'espace des angles de rotation. La vraie rotation correspond donc au maximum dans l'espace de vote. Les différents problèmes pratiques rencontrés en appliquant cette méthode, ainsi que leur solution, sont présentés dans le texte.

La deuxième étape se sert des contours des forêts pour affiner le recalage obtenus par la méthode de vote. Une méthode des moindres carrés est utilisée pour recalculer les vertex des polygones décrivant les contours des forêts. La dernière étape dans le recalage entre carte et image SAR est basée sur la position des routes. Une méthode qui permette de tenir compte des ambiguïtés d'appariement dues au résultat imparfait du détecteur de lignes, est mise en oeuvre. Une fois l'image recalée avec la carte, le recalage entre images consiste en un affinement. Pour cela nous avons utilisé une méthode des moindres carrés basée sur la position des contours dans les différentes images. Il y a principalement deux raisons expliquant pourquoi utiliser les contours dans cette dernière phase du recalage. La première est le fait que les contours délimitent la frontière entre des régions physiquement différentes dans le terrain et qu'il est donc probable de trouver suffisamment de contours communs entre différents types d'images. La deuxième raison est liée à la géométrie des images radar. En effet, la visée latérale a comme conséquence qu'on ne peut obtenir un recalage précis entre différentes images (même différentes images SAR obtenues à partir de différentes directions de visée) qu'en se servant de caractéristiques à faible hauteur. Les contours entre régions uniformes sont donc de bons candidats pour ce recalage final.

Le dernier chapitre résume les différents résultats obtenus, décrit les principales conclusions que l'on peut en tirer et propose quelques recommandations relatives aux perspectives d'évolution ou de continuation du présent travail.