

THESE

pour obtenir

le grade de DOCTEUR

présentée conjointement

à

l'UNIVERSITE DE SAVOIE

Spécialité : Electronique - Electrotechnique - Automatique

et à

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" BUCUREȘTI

Spécialité : Ingénierie Electronique et Télécommunications

par

M. Florentin BUJOR

*Extraction - fusion d'informations
en imagerie radar multi-temporelle.*

Soutenue le 26 juillet 2004 devant le jury d'examen :

M. Corneliu BURILEANU	Président
M. Jean-Marie BECKER	Rapporteur
M. Alexandru ȘERBĂNESCU	Rapporteur
M. Vasile BUZULOIU	Directeur de thèse
M. Philippe BOLON	Directeur de thèse
M. Emmanuel TROUVÉ	Co-Directeur de thèse

Chapitre 7

Conclusions et perspectives

Les travaux présentés dans cette thèse s’articulent autour de trois axes : deux axes méthodologiques, l’extraction et la fusion d’informations en imagerie RSO multi-temporelle et un axe plus thématique : l’application des méthodes proposées à la détection de changements et d’objets géographiques stables.

Les attributs développés dans l’axe “extraction d’informations” ont été regroupés au chapitre 4. Ils contribuent à enrichir la “bibliothèque” des paramètres dédiés à l’analyse des images radar aux résolutions actuelles des données satellitaires. Cette “bibliothèque”, fruit du travail de la communauté “imagerie radar” au cours des quinze dernières années, comporte de nombreux paramètres couplés à des techniques d’estimation adaptées aux spécificités des données RSO. Ces paramètres sont généralement dédiés aux images mono-temporelles. Ils permettent d’obtenir une information plus discriminante que la radiométrie initiale en vue de la détection de divers types de structures (cf. [MAÎTRE, 2001]–chap. 8). Les attributs que nous proposons s’appuient sur ces paramètres et les étendent au cas multi-temporel pour exploiter soit la redondance de l’information en vue d’améliorer la détection des structures stables, soit les modifications de la radiométrie pour détecter les changements survenus entre les acquisitions. Les performances des méthodes proposées et leur sensibilité au paramétrage ont été évaluées sur les données PRI des satellites ERS dont les archives importantes permettent aujourd’hui de disposer de séries multi-temporelles dans de nombreuses régions.

Les attributs proposés couvrent les principaux types de structures afin de pouvoir traiter des objets ponctuels (points brillants), linéaires simples (contours) ou doubles (route, rivière fine) et surfaciques (champs, forêts, etc.). Ces paramètres ont l’avantage d’être rela-

tivement génériques et peuvent être facilement mis en œuvre pour traiter différentes applications. La poursuite de cet axe pourrait conduire au développement de paramètres plus spécifiques basés sur une plus forte information de nature radiométrique, morphologique (2D) ou temporelle. La prise en compte par exemple des dimensions d’objets recherchés pour les structures fines ou de l’évolution de la radiométrie au cours du temps pour les forêts et les zones de cultures permettra, pour certaines applications, d’améliorer les performances initiales des attributs, au détriment de leur généralité.

Le second axe méthodologique consiste à fusionner les informations extraites sous forme d’attributs par une méthode adaptée au contexte de l’analyse des images RSO multi-temporelles. Une étape de fusion est nécessaire pour tirer parti de ces données dans chacune des deux directions explorées : pour la détection des structures stables, l’exploitation de la redondance de l’information présente dans plusieurs images conduit naturellement à la fusion de paramètres estimés dans chacune des images. Pour la détection de changements, les paramètres mesurés sont de type “différence” ou “variabilité” temporelle. Ces paramètres qui ont tendance à rehausser le niveau de bruit sont particulièrement sensibles au phénomène de chatoiement (speckle) qui entache les images radar. Dans les deux cas, la fusion de plusieurs paramètres et éventuellement d’attributs issus d’informations a priori permet d’améliorer la détection de structures difficilement détectables à l’aide d’un seul paramètre.

Le contexte de collaboration avec des “géophysiciens”, notamment au sein du laboratoire *Géomatériaux* de l’Institut Francilien de Géosciences, Université de Marne-la-Vallée, nous a conduit à développer une méthode de fusion interactive basée sur la connaissance qu’ont les experts des zones recherchées et du comportement des attributs. Le choix d’un système de fusion symbolique floue s’est effectué dans la continuité des travaux menés au LISTIC [VALET, 2001] dans le domaine de l’imagerie sismique. La méthode retenue consiste à effectuer une fusion symbolique interactive en s’appuyant sur la théorie des sous-ensembles flous pour relier l’univers numérique des attributs à l’univers symbolique des mots qui les décrivent et ceux correspondant aux classes thématiques recherchées. Présentée au chapitre 5, cette méthode a l’avantage d’être très générale (tous les attributs peuvent être décrits par un ensemble réduit de mots) et proche du raisonnement de l’expert grâce à la description du résultat attendu sous forme de règles floues. Une interface graphique dédiée à la fusion a été construite en IDL, langage du logiciel ENVI très répandu dans la communauté de la télédétection. Outre les fonctionnalités de réglage interactif des fonc-

tions d'appartenance, l'interface développée incorpore un ensemble de fonctionnalités qui la rendent facilement utilisable pour des opérateurs appartenant aux domaines d'application : d'une part la visualisation des données initiales, des attributs, des résultats de fusion floue (degrés d'appartenance) ou de classification après décision, d'autre part la sélection de zones de références utilisables à différents niveaux (aide à l'ajustement des règles en mode interactif par visualisation des points dans l'espace des attributs 2D ou 3D, apprentissage des règles en mode semi-supervisé, évaluation des résultats flous ou nets par courbes COR et matrices de confusion).

Cet axe a également donné lieu à la mise en œuvre de deux méthodes de classification, l'une automatique, les C-moyennes floues (*fuzzy C means*), l'autre supervisée, les SVM (*Support Vector Machine*). Ces deux classifieurs ont été appliqués pour fusionner les mêmes attributs afin de positionner la méthode proposée par rapport à des méthodes relativement "standards" et d'évaluer les performances des trois méthodes. Les résultats traduisent logiquement la supériorité d'une approche interactive ou supervisée. Les performances obtenues par SVM et par fusion interactive floue sont très proches, les différences étant du même ordre que celles des fluctuations liées à la sélection des régions d'apprentissage des SVM ou au réglage interactif des règles floues.

Deux aspects importants de l'axe fusion pourront donner lieu à une poursuite des travaux. D'une part, bien que la méthode de fusion floue ne limite pas le nombre d'attributs, l'ergonomie de l'interface de fusion interactive nous a conduit à nous limiter à trois attributs. L'extension à un plus grand nombre d'attributs nécessiterait un réglage dans des hypercubes dont la représentation et la perception par l'expert sont plus délicates. Un autre choix consisterait à ne pas fusionner les attributs en parallèle mais de façon séquentielle (en cascade). Cette stratégie est aujourd'hui possible pour un nombre restreint de classes recherchées en utilisant les sorties de fusions floues intermédiaires comme attributs des fusions suivantes. Néanmoins la mise en œuvre de cette stratégie repose fortement sur l'expert pour déterminer l'ordre des fusions et interpréter les résultats intermédiaires. Une autre approche utilisée au chapitre 4 dans le cas particulier de certains attributs de même nature consiste à effectuer une pré-fusion numérique de ces attributs. Afin d'explorer l'ensemble de ces pistes en effectuant des comparaisons quantitatives, il sera également nécessaire d'ajouter à l'évaluation de performance finale fournie par la matrice de confusion classique, des outils de suivi des performances intermédiaires tels qu'une mesure de l'information apportée par chaque attribut ou des matrices de confusion floues (avant décision). Ces travaux potentiels font partie des recherches en cours au LISTIC.

Enfin sur l'axe thématique, trois exemples d'application ont permis d'illustrer l'approche extraction-fusion sur des données multi-temporelles RSO acquises par les satellites ERS dans des régions tropicales humides. Dans ce type de régions à fort couvert nuageux, les capteurs RSO sont les seuls à pouvoir garantir une répétitivité des données compatible avec des applications de suivi des évolutions telles que l'érosion côtière, la déforestation ou la mise à jour de cartes. Les trois applications présentées au chapitre 6 permettent d'illustrer les méthodes proposées dans deux directions d'exploitation de l'imagerie multi-temporelle : la détection de changements et l'amélioration de la détection des structures stables. La première application illustre la difficulté de la détection de structures temporelles comme les changements dues à la déforestation de petites parcelles dans la région de Saint-Laurent du Maroni en Guyane Française. La seconde est consacrée à la détection de structures stables telles que des routes à l'est de Douala au Cameroun. Enfin la troisième application propose de combiner des attributs dédiés aux structures spatiales, aux structures temporelles et à la présence d'hétérogénéité 3D pour détecter simultanément ces deux types structures dans la région de Kourou en Guyane.

Les résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes :

- les données RSO ont un très fort potentiel pour la détection de changements tels que la déforestation, l'érosion côtière, les inondations, l'accroissement des zones urbaines etc. à condition de disposer de deux types d'outils : des paramètres de mesure de la variabilité temporelle adaptés à la rétrodiffusion radar et des outils de fusion d'attributs, une seule mesure conduisant rarement à des taux de classification automatique acceptables.
- pour certaines thématiques nécessitant l'extraction de réseaux fins (routes, voies ferrées, petits cours d'eau, etc.), la résolution décimétrique des données RSO satellitaires actuelles est encore un obstacle majeur à leur utilisation. L'exploitation de la redondance apportée par les données multi-temporelles permet, pour des images acquises sous le même angle de visée, d'améliorer légèrement les performances en détection automatique de structures stables, notamment grâce au recul des fausses alarmes sous réserve que les images soient le plus décorréélées possibles (à l'inverse des conditions interférométriques : bases suffisamment grandes, rétrodiffusion volumique, légère évolution temporelles, etc.).
- une détection simultanée des discontinuités spatio-temporelles permet une analyse globale de l'information présente dans les volumes formés par les images multi-temporelles. Cette approche permet notamment de discriminer ces deux types d'in-

formations auxquelles sont sensibles les détecteurs dédiés à l'une ou l'autre des structures. Les taux de classification de l'ordre de 95% obtenus soit par l'approche de fusion floue interactive proposée, soit par classification supervisée constituent un très bon résultat en imagerie radar multi-temporelle.

En conclusion, il nous semble que les freins qui subsistent dans la communauté de la télédétection vis-à-vis des données radar par rapport aux données optiques viennent principalement de la faible diffusion d'outils de traitements spécifiques autres que quelques filtres de speckle mono-temporels qui détériorent la résolution spatiale sans apporter l'information recherchée. Le développement et le transfert vers les utilisateurs finaux de "bibliothèques" d'attributs dédiés à l'extraction d'informations dans les séries d'images radar est une première étape nécessaire en vue d'une meilleure utilisation de ces données. Cette étape est en train d'être franchie, notamment au travers de collaboration entre laboratoires méthodologiques et thématiques. Mais contrairement à l'imagerie optique où des index de végétation ou des cartes de différences peuvent conduire à des résultats satisfaisants, l'imagerie radar nécessite également le transfert de méthodes de fusion d'informations permettant de combiner un ensemble de paramètres sélectionnées par les experts. Lorsqu'elle est réalisée, cette seconde étape utilise le plus souvent des classifieurs supervisés très performants tels que les réseaux de neurones ou les SVM. Cependant ces méthodes nécessitent de posséder ou de créer des ensembles d'apprentissage, et sont souvent perçues comme des boîtes noires avec lesquelles il est difficile d'interagir pour améliorer un résultat insatisfaisant. La méthode de fusion floue interactive proposée est une alternative à ces méthodes qui permet d'intégrer les connaissances expertes et de laisser l'utilisateur final piloter la fusion vers une solution satisfaisante.

Les perspectives d'utilisation des méthodes proposées sont liées aux évolutions actuelles de l'imagerie satellitaire. Les masses de données importantes acquises par les satellites précédents et actuellement opérationnels tels qu'Envisat constituent une archive colossale dont l'exploitation "multi-temporelle" est encore limitée à quelques applications. Les outils développés au cours de cette thèse seront diffusés dans le cadre d'un logiciel libre afin de contribuer à la mise à disposition d'outils de traitement facilitant l'exploitation des données RSO actuelles. Dans un futur proche une nouvelle génération de satellites sera lancée avec une amélioration sensible de la résolution spatiale, ouvrant la porte à de nouvelles applications. La démarche extraction-fusion devrait rester d'actualité, mais il est probable que les nouvelles caractéristiques des données RSO nécessitent de faire évoluer les deux étapes de

traitement. L'étape d'extraction d'informations conduira au développement de nouveaux attributs qui s'appuient sur les caractéristiques des données futures (utilisation de la bande X pour le système Cosmo-SkyMed du projet ORFEO, résolution métrique, possibilité de survols plus fréquents grâce à des constellations de micro-satellites, etc.). L'étape de fusion sera quand à elle de plus en plus primordiale pour exploiter la plus grande diversité des données et des attributs qui en résultent (généralisation de la multi-polarisation, de la multi-incidence, voire à plus long terme des systèmes multi-bandes).