DÉTECTION SUPERVISÉE DES DATES DES OPÉRATIONS DE FAUCHE DES PRAIRIES IRRIGUÉES DANS LA PLAINE DE LA CRAU, FRANCE

[1]Malika HADJ SAID, [1]Mourad LAGHROUCHE, [2]Mokrane MALEK,*
[3] Rachid HADRIA, [2]Albert OLIOSO, [2]Dominique COURAULT et [1]Soltane AMEUR.
[1]Laboratoire LAMPA, Faculté Génie Electrique et Informatique,
Université Mouloud Mammeri, BP n° 17 RP, 15000 Tizi-Ouzou, Algérie.
[2]INRA, UMR 1114 – INRA-UAPV-Domaine Saint Paul - Site Agroparc, 84914, Avignon Cédex 9, France.
[3]INRA, Centre Régional de l'Oriental, Oujda, 60000, Maroc. E-mail : malikahadjsaid@yahoo.fr

Soumis le 30 juin 2010 ; accepté le 28 juin 2011 - © *Revue Télédétection*, 2011, vol. 10, n[os] 2-3, p. 129-136

Résumé :

Nous présentons dans ce travail une méthode de détection de changements appliquée à une séquence d'images de télédétection à hautes résolutions spatiale et temporelle pour détecter certaines pratiques culturales comme la fauche et l'irrigation.

La zone d'étude est la plaine de la Crau située au sud-est de la France. Les images utilisées sont issues du satellite Taïwanais FORMOSAT-2 à hautes résolutions spatiale (8m) et temporelle (potentiellement une image par jour). La méthode proposée est basée sur la combinaison d'une technique de mesure de différence (dissimilarité) et des contours actifs basés régions. La première permet la localisation des zones qui ont évolué entre deux dates d'acquisition successives d'images d'une même scène, tandis que la deuxième affine le résultat en segmentant l'image de différence en zones de changements et de non-changements (prise de décision). Cette étude a montré l'intérêt et les potentialités de la combinaison d'une mesure de différence et des contours actifs pour la détection et l'identification des changements liées aux coupes des prairies. Cependant, la méthode appliquée aux données de télédétection optiques seules ne permet pas un suivi rigoureux des irrigations.

Mots clefs : télédétection optique, contours actifs basés régions, level sets, détection de changements, prairies irriguées, pratiques culturales.

SUPERVISED DETECTION OF THE DATES OF OPERATIONS OF MOWING OF THE MEADOWS IRRIGATED IN THE PLAIN OF THE CRAU, FRANCE

Abstract:

We present in this study a method of surface change detection applied to a sequence of optical high spatial and temporal resolution remote sensing images to detect certain agricultural practices such as mowing and irrigation.

The study area is the Crau plain in the south-eastern France. Used images were acquired by the Taiwanese satellite FORMOSAT-2 with a high spatial (8m) and temporal (potentially an image a day) resolutions. The proposed method is based on the combination of a measurement of difference technique (dissimilarity) and active contours based areas. The first allows the location of areas that have changed between two successive dates of images acquisition, while the second refines the result by segmenting the image difference in areas of change and non-changes (decision-making). This study has shown the potential of the combination of a measurement of difference technique and active contours for detection and identification of changes related to meadow cuts. However, the application de the method to optical remote sensing data alone does not allow close monitoring of irrigation.

Key words: optical remote sensing, active contours based areas, level sets, change detection, irrigated meadows, agricultural practices.

1. INTRODUCTION

Le suivi des paysages est devenu un sujet très important au sein de la communauté scientifique qui s'intéresse de plus en plus au maintien de la diversité des écosystèmes agricoles. Un tel suivi permet, par exemple, de comprendre la part de la contribution humaine dans les changements globaux à travers les modifications des pratiques agricoles ou les

interventions sur les éléments qui constituent le paysage (abondance et/ou adoption de certains types de cultures au détriment d'autres types par exemple).

La région méditerranéenne est particulièrement sensible à ces modifications de pratiques et de surface, avec des effets d'autant plus marqués qu'elle est soumise à des aléas climatiques parfois extrêmes. La présence de longues périodes de sécheresse à des périodes clés pour le développement de certaines cultures amène, suivant les contextes, soit à augmenter les irrigations pour maintenir une production acceptable, soit à diminuer les apports pour maintenir une réserve suffisante pour toute l'année. La compréhension de ces interactions culture – climat pose encore beaucoup d'interrogations à fine et à large échelle. La plaine de la Crau au Sud-Est de la France est un site type représentatif de la région méditerranéenne. Elle est caractérisée par sa grande diversité de cultures et des forts contrastes hydriques et thermiques y régnant.

Les prairies permanentes irriguées sont dominantes dans la plaine de la Crau (12000 ha sur les 52000 ha de la surface totale), et ont une valeur économique très importante. Elles fournissent un foin de qualité labellisé AOC et exporté partout à travers le monde (http://www.foindecrau.com). Elles sont irriguées par un système gravitaire et consomment une grande quantité d'eau (autour de 20000 m^3/ha/an). Ce système participe à presque 60% à la recharge de la nappe à cause de la nature très caillouteuse du sol (Mailhol and. Mérot, 2008).

Dans la plaine de la Crau, les prairies irriguées sont fauchées trois fois par an, entre mai et septembre et les producteurs s'engagent à répondre à un cahier de charges qui exige un certain niveau de qualité du foin produit (voir le décret officiel sur le site : www.foindecrau.com). D'après ce cahier de charges, la première coupe doit avoir lieu en mai et en minimum 60 jours après la période de pâturage. En plus, le délai entre deux coupes successives doit être de 40 à 70 jours. Les trois coupes doivent être réalisées respectivement avant le 31 mai, le 25 juillet et le 30 septembre, respectivement, sauf en cas de dérogation spéciale comme dans le cas de mauvaises conditions méthodologiques par exemple. Dans ce contexte, et vu la grande superficie occupée par les prairies irriguées dans la plaine de la Crau, le développement de nouvelles méthodes d'aide au contrôle externe du respect des termes du cahier de charges semble indispensable.

La télédétection spatiale offre des solutions très pratiques et efficaces pour le suivi des changements des surfaces, et en particulier les changements dus aux pratiques agricoles à des grandes échelles spatiales. Dans le domaine du spectre optique, les propriétés de la réflectance de la surface ont été largement étudiées. Par conséquent, plusieurs méthodes ont été développées pour suivre des variables biophysiques des cultures telles que l'indice foliaire (LAI) ou la fraction de rayonnement photosynthétiquement actif absorbée par la végétation (Baret et Guyot 1991, Gutman et Ignatov 1995, Hall *et al.* 1995, Asner *et al.* 1998, González-Sanpedro *et al.*, 2008, Hadria *et al.*, 2009, 2010).

Dans la littérature, plusieurs études ont exploité l'imagerie satellite pour le suivi de l'état de surface des terres agricoles dans la plaine de la Crau (ex. : Bsaibes *et al.*, 2009, Courault *et al.*, 2008, 2010). Dans le même contexte, l'objectif de cette étude est de développer une méthode de détection et d'identification automatique des changements de l'état de surface à partir d'une séquence d'images FORMOSAT-2 à hautes résolutions spatiale et temporelle. La méthodologie adoptée dans ce travail est la méthode qui combine le calcul de différence et les contours actifs basés régions. Elle consiste à étudier les variations des réflectances dans le domaine Rouge (0,63 – 0,69 μm) et le Proche Infra Rouge (0,76-0,90 μm) en fonction des pratiques agricoles.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Zone d'étude et données

La plaine de la Crau, située dans le Sud-Est de la France (43.38N 5E 00N), à environ 50 km au sud de la ville d'Avignon (figure 1), est une zone plate (~ 5 m au-dessus du niveau moyen de la mer). Sur ses 52000 ha, 12000 ha sont des prairies essentiellement irriguées en gravitaire. Le tour d'eau varie entre 11 et 22 jours et la submersion des parcelles est progressive et dure plusieurs heures voir quelques jours en fonction de leurs tailles. Les volumes d'eau apportés sont de l'ordre de 20000 m3/ha/an. Les prairies irriguées sont fauchées trois fois par an, entre mai et septembre.

Entre mars et octobre 2006, 36 images FORMOSAT-2 non affectées par les nuages ont été acquises tous les 3 ou 4 jours sur cette zone. FORMOSAT-2 est un satellite taïwanais lancé depuis mai 2004 (http://www.spotimage.fr/web/944-images-formosat-2.php). Il permet l'acquisition d'images à une haute résolution spatiale (pixel de 8m) dans les quatre bandes spectrales suivantes: Bleu (0,45 – 0,52 μm), vert (0,52 – 0,60 μm), rouge (0,63 – 0,69 μm) et proche infrarouge (0,76 – 0,90 μm). L'avantage de ce capteur réside dans le fait qu'il permet d'observer une même région de 24 km x 24 km avec un angle de vue constant et avec un pas de temps journalier. Ces caractéristiques font des images acquises par ce satellite un produit idéal pour le suivi des cultures et pour la détection des changements de l'état de surface. Les images acquises en 2006 ont été traitées, géoréférencées et corrigées des effets atmosphériques par l'équipe du CNES-CESBIO à Toulouse en utilisant les méthodes décrites dans [(Baillarin *et al.* 2004), (Hagolle *et al*. 2008)].

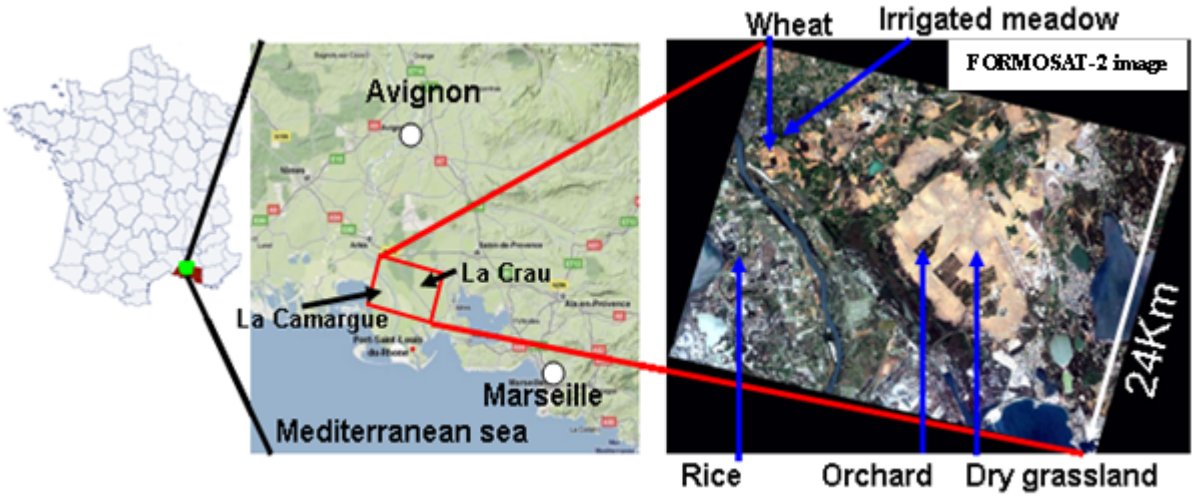


Figure 1. Localisation géographique de la région de la Crau et un exemple d'image FORMOSAT-2 illustrant la biodiversité de cette région.

Dans cette étude, nous avons choisi les images acquises entre le 11 avril et le 17 juillet et nous avons sélectionné une petite scène de 16km2 (501pixels×501pixels) de chaque image (figure 4) pour développer et tester la méthode de détection automatique des changements. La période choisie correspond au stade de pleine croissance des prairies et couvre la période de la première coupe. Le choix de l'échantillon de l'image est basé sur le fait qu'il couvre une région assez contrastée en termes de paysages agricoles et sur le fait que l'on dispose aussi d'un ensemble d'informations sur l'occupation du sol et sur les pratiques agricoles sur ce secteur.

2.2 Méthode de détection de changements

Le problème de détection des changements dans la séquence d'images FORMOSAT-2 se divise en deux parties :

a- Caractérisation de zones de changements

Pour caractériser les zones de changement dans une séquence d'image, nous avons utilisé une mesure de différence (pixel à pixel) entre deux images successives d'une même séquence. Cette mesure est une adaptation d'une méthode déjà utilisée dans les techniques de détection de changements dans les séquences vidéo et qui sont largement commentées et documentées dans la littérature [(Lefèvre, 2002), (Gargi et Kasturi, 1996), (Eickeler et Rigoll, 2000), (Hampapur *et al.* 1995), (Ruiloba *et al.* 1999)]. La formule utilisée est :

$$\Delta\left(I^{t}, I^{t-1}\right) = \left[\alpha\left(I^{t,PIR} - I^{t-1,PIR}\right) + \left(1-\alpha\right)\left(I^{t,R} - I^{t-1,R}\right)\right]^{P} \quad (1)$$

$I^{t,PIR}$ est l'image des réflectances enregistrées dans la bande spectrale du proche infrarouge (PIR) et $I^{t,R}$ est celle enregistrée dans la bande rouge (R). Dans ces deux bandes, l'évolution annuelle de la signature spectrale présente des caractéristiques permettant l'identification des couverts végétaux (Guyot *et al.* 1988).

Les paramètres α et p sont choisis d'une manière empirique en tenant compte de l'aspect visuel des changements entre deux images successives, et des caractéristiques des bandes spectrales rouge et proche infrarouge pour l'identification et le suivi des couverts végétaux. Le paramètre α, de valeur comprise entre 0 et 1 ($\alpha \in [0,1]$), est choisi de telle sorte que l'effet de la bande PIR soit prédominant : c'est l'évolution temporelle des réflectances dans cette bande qui nous renseigne le plus sur les changements brusques tels que les dates de coupes (Robin, 2006).

La valeur de p (p =1, 2, 3…) nous permet de donner plus ou moins d'importance à la mesure de distance calculée pour chaque couple de pixels issus de deux images successives : avec ce paramètre, on augmente l'influence des plus grandes différences, on peut donc espérer détecter un changement.

Après plusieurs tests nous avons choisi de prendre $\alpha = 0.8$ et $p = 2$.

b- Segmentation des zones de changements

- *Contours actifs basés régions*

Le principe des contours actifs consiste à plonger une courbe déformable dans une image en considérant que l'intensité et la couleur de celle-ci constituent en quelque sorte un potentiel attractif ou répulsif qui va contraindre la courbe à épouser les détails de l'image pertinents pour l'application traitée. Mathématiquement, C'est d'attacher une énergie à une courbe paramétrique définie dans une image de manière à ce que la segmentation idéale corresponde à la courbe d'énergie minimale, la segmentation se faisant alors par minimisation de cette énergie (Kass *et al*. 1988).

Les régions à segmenter peuvent avoir différentes propriétés de texture, d'homogénéité ou de mouvement qui ne peuvent être incluses dans une seule intégrale de contour. Le principal objectif des contours actifs basés régions est d'introduire une information globale dans l'équation d'évolution du contour actif en plus de l'information locale procurée par les termes basés contours (Rousselle, 2003).

- *Les courbes de niveaux*

L'évolution de la courbe peut être représentée implicitement par l'intermédiaire d'une fonction continue $\Phi(x,y)$ proposée par Osher et Sethian en 1988 (Osher *et al*, 1988), appelée fonction level set qui est définie par la courbe $C \subset \Omega$, représentée par le niveau zéro d'une fonction distance signée $\Phi : \Omega \to \Re$, telle que (figure 2):

$$\begin{cases} C = \partial\Omega = \{(x,y) \in \Omega : \Phi(x,y) = 0\} \\ \text{intérieur}(C) = \Omega_{\text{int}} = \{(x,y) \in \Omega : \Phi(x,y) < 0\} \\ \text{extérieur}\,(C) = \Omega_{ext} = \{(x,y) \in \Omega : \Phi(x,y) > 0\} \end{cases} \quad (2)$$

Où Ω est le plan entier de l'image.

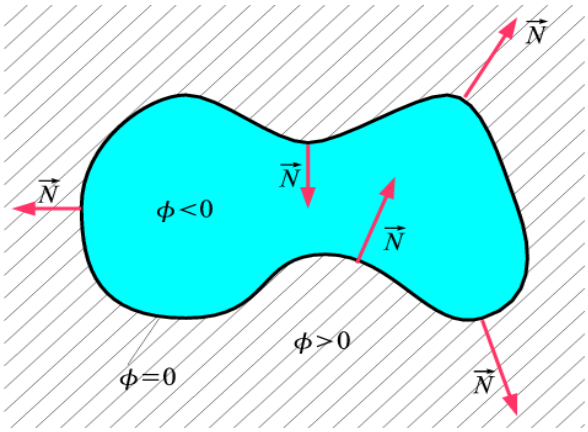


Figure 2. La définition de la fonction level set.

Le plus gros avantage de la représentation en ensembles de niveaux est que le contour peut se diviser ou fusionner au cours de l'évolution de la fonction level set (Sethian, 1996). Les changements de topologie sont ainsi gérés automatiquement et les résultats obtenus sont très précis (Montagnard *et al*, 2001). D'Où l'intérêt de cette dernière à la segmentation des images de différence.

- *Formulation énergétique de Chan et Vese*

La formulation énergétique se diffère d'un auteur à un autre, nous nous intéressons à la forme d'évolution proposée par Chan et Vese **(**Chan et Vese, 2001**)** en utilisant les fonctions, Heaviside H et Dirac δ de la fonction level set $\Phi(x,y)$ pour exprimer la longueur du contour $|C|$:

$$\begin{aligned} J(c_1,c_2,C) &= \mu\int_\Omega \delta(\Phi(x,y))|\nabla\Phi(x,y)|dxdy + \nu\int_\Omega H(\Phi(x,y))dxdy \\ &+ \lambda_1\int_\Omega |I(x,y)-c_1|^2 H(\Phi(x,y))dxdy \\ &+ \lambda_2\int_\Omega |I(x,y)-c_2|^2 (1-H(\Phi(x,y)))dxdy \end{aligned} \quad (3)$$

Les constantes c_1 et c_2 peuvent être aisément exprimées en fonction de Φ, on obtient :

$$c_1 = \frac{\int_\Omega I(x,y)\mathrm{H}(\Phi(x,y))dxdy}{\int_\Omega \mathrm{H}(\Phi(x,y))dxdy},\ c_2 = \frac{\int_\Omega I(x,y)\{1-\mathrm{H}(\Phi(x,y))\}dxdy}{\int_\Omega (1-\mathrm{H}(\Phi(x,y)))dxdy} \quad (4)$$

avec $\mu \geq 0, \nu \geq 0, \lambda_1 \geq 0, \lambda_2 \geq 0$ des paramètres fixés, sont des constantes pour pondérer les différents termes de la fonction (3).

La convergence du contour initiale vers les contours des objets présents sur l'image se traduit par une valeur nulle de la fonction (3).

L'implémentation du modèle de Chan et Vese (Chan et Vese, 2001) permet de visualiser l'évolution du contour actif. Cela permet de voir l'évolution de la courbe initiale vers la courbe finale pour chaque image de différence de la séquence. Il permet aussi de visualiser la partition de chaque image en deux régions de caractéristiques différentes: c.-à-d. une région qui a subi des changements par rapport à l'image précédente est représentée par une classe en blanc et une région qui n'a pas changé par rapport à l'image précédente est représentée par une autre classe en noir.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

La méthode de détection des changements détaillée dans la section précédente a été appliquée à une série d'images FORMOSAT-2 acquises entre le 11 avril et le 17 juillet 2006 (20 images). La zone test est une scène de 16km², dominée par les prairies irriguées, et dans laquelle des informations sur l'occupation du sol et sur les pratiques agricoles sont disponibles. Nous nous focalisons ici sur les prairies irriguées pour appliquer la méthode de détection de changements et interpréter les résultats finaux. Ces résultats correspondent à l'application de la méthode des courbes de niveaux (level sets) sur des séquences d'images pour les valeurs des paramètres suivantes: Δt=10000, $\lambda 1 = \lambda 2$ =10, h=1 et v=0 et μ=0.00001*255^2.

Notons qu'il n'existe aucune loi sur le choix de ces valeurs car sont des paramètres d'adéquation aux données images, et se diffèrent d'une image à une autre. Dans notre cas après avoir fait plusieurs tests, nous avons remarqué, qu'avec les valeurs données aux constantes, le contour assure une meilleure convergence vers les détails des images de différences.

La figure 3 présente un exemple des résultats obtenus lors de l'application de la méthode pour détecter les changements qui ont eu lieu entre le 14 et le 16 mai. Les imagettes **a**, **b** et **c** de cette figure montrent, l'image de différence entre les deux dates d'acquisition, l'évolution du contour et l'image finale segmentée, respectivement.

Pour faciliter l'interprétation de la figure 3, on présente sur la figure 4 la scène étudiée extraite de l'image FORMOSAT-2 avec les principales informations sur l'occupation du sol en vraies couleurs. Comme le montre cette figure, la résolution spatiale de 8m permet de voir clairement les changements liés aux pratiques agricoles et en particulier ceux liés à la fauche des prairies.

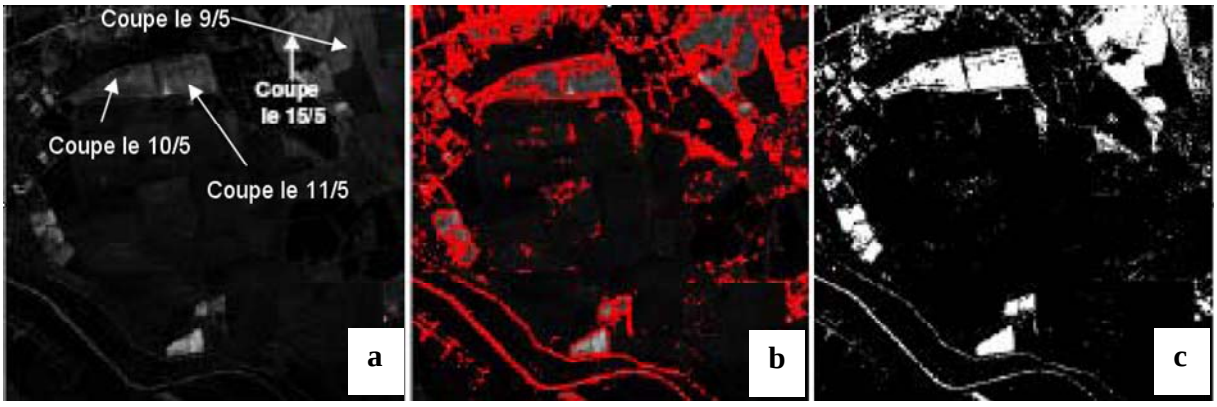


Figure 3. Détection de changement entre le 14 et le 16 mai : a) image de différence, b) l'évolution du contour actif et c) l'image segmentée.

Sur la figure 3a, les zones qui ont subi des changements de l'état de surface entre le 14 et le 16 mai 2006 sont claires tandis que celles restées stables sont affichées en noir. L'analyse des données collectées à partir des enquêtes de terrain et la comparaison avec les images brutes (figure 4) ont révélé que les changements détectés sont dus principalement à la

fauche des prairies. En effet, les quatre parcelles sur lesquelles des changements ont été détecté ont été fauchées entre le 9 et le 15 mai. Les changements observés sur les parcelles fauchées avant le 14 mai sont dus aux différentes opérations liées à la fauche (mise en andain, fanage, mise en ballots puis ramassage). Ces opérations s'étalent sur des périodes qui varient entre 3 et 6 jours et causent des variations notables de l'état de surface, et donc de la valeur du NDVI (Hadria *et al.* 2009a, Courault *et al.* 2010). Les figures 3b et 3c montrent que la méthode développée ici permet de bien distinguer les contours des parelles et des objets qui ont subi des changements entre les deux dates considérées. On note ici que la date d'acquisition et la résolution spatiale sont deux paramètres très importants dans l'application de la méthode. Cependant, la limite de la méthode est qu'elle est moins efficace dans le cas des changements progressifs et lents de l'état de surface comme dans le cas des cultures annuelles comme le blé et le maïs dont la sénescence est progressive. Une autre limite de la méthode est le problème d'hétérogénéité des parcelles qui bruite le signal, problème souvent rencontré dans les applications de la télédétection en agriculture.

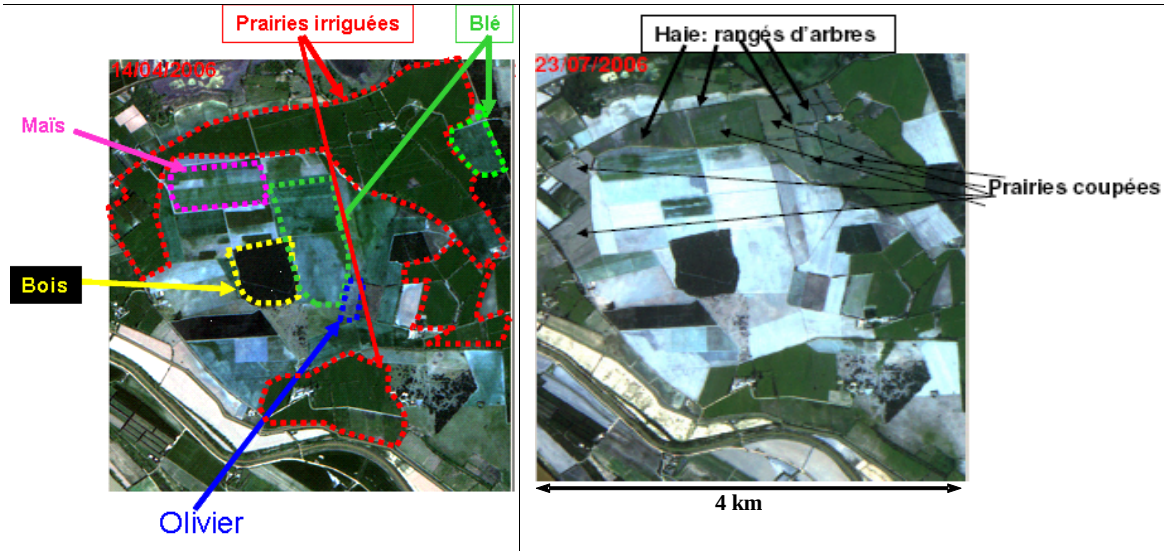


Figure 4. Occupation du sol de la région d'étude et illustration de l'effet des coupes des prairies irriguées à partir des images FORMOSAT-2.

Un autre exemple de détection est représenté sur la figure 5. Il s'agit de deux images successives acquises le 27 et le 30 mai. Ces images, acquises après la première coupe, correspondent à une période de croissance de la végétation. Les changements détectés correspondraient aux effets de l'irrigation. En effet, une telle détection est possible pendant cette période car la végétation n'est pas assez dense pour couvrir complètement le sol (environ trois semaines après la première coupe). Ces effets seront masqués une fois que la végétation sera bien développée. Cependant, en absence d'informations concernant les dates d'irrigation, nous ne pouvons pas confirmer cela.

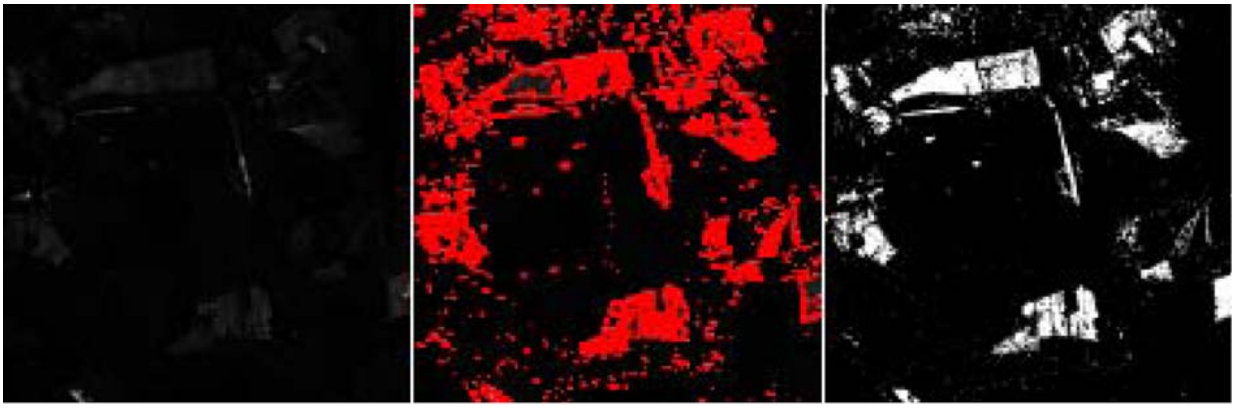


Figure 5. Détection de changement entre le 27 et le 30 mai. Les imagettes correspondent de la gauche à la droite à : l'image de différence, l'évolution du contour actif et l'image segmentée.

Les résultats illustrés dans ces deux exemples sont, qualitativement, comparables aux résultats obtenus en utilisant une méthode basée sur l'analyse des profils temporels de l'indice de végétation NDVI [(Hadria *et al.* 2008), (Hadria *et al.* 2009a), (Caurault *et al.*, 2010)]. Cette dernière approche a été développée principalement pour la détection des trois dates de coupes des prairies irriguées et n'est pas conçue pour la sélection d'autres événements entre les coupes comme

l'irrigation par exemple. La méthode présentée dans ce travail a donc l'avantage de détecter tous les changements qui peuvent avoir lieu entre deux dates d'acquisition successives d'images. Il s'ajoute à cela l'aspect automatique de la méthode décrite ici, rendu possible par l'introduction des contours actifs basés régions.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La méthode développée dans cette étude consiste à détecter les changements de l'état de surface d'une région agricole à partir des images de télédétection optique FORMOSAT-2 à haute résolutions spatiale et temporelle. Cette méthode basée sur la technique des contours actifs basés régions permet de suivre des événements liés au changement de l'état de surface et de pratiques agricoles. Nous avons focalisé notre étude sur la détection des coupes des prairies irriguées en particulier.

Les résultats obtenus dans ce travail sont encourageants et montrent que, un bon choix des paramètres initiaux λ_1, λ_2, h, v et μ, la méthode appliquée à des images de hautes résolutions spatiale et temporelle permet la détection des changements brusque de l'état de surface. Par conséquent, cette méthode peut être appliquée pour le suivi des dates de coupes des prairies irriguées dans des zones où ces coupes doivent être soumises à des réglementations particulières.

Un autre avantage de la méthode est qu'elle peut servir pour délimiter les parcelles bien que l'hétérogénéité des parcelles bruite encore les résultats de la segmentation. En plus, l'introduction de l'approche *level set* dans la méthode l'a rendue plus simple à implémenter, à changer de topologie et à l'étendre facilement sur les images de différences.

Au début du lancement de cette étude, on s'est posé des questions sur la possibilité de suivre aussi les irrigations même si les données optiques ne sont pas les plus appropriées pour aborder ce point. Les résultats obtenus ont confirmé la difficulté de l'application de la méthode dans ce sens. Cette difficulté est particulièrement constatée durant les périodes de forte croissance de la végétation qui rend la surface du sol invisible dans les images FORMOSAT-2.

Afin de résoudre ce problème, l'utilisation des propriétés polarimétriques, des systèmes radar à synthèse d'ouverture (RSO) ou bien de données opérant dans l'infrarouge thermique, pourrait constituer un moyen efficace pour la détection des changements dus à l'irrigation. En effet, la sensibilité de la polarisation des ondes radar aux propriétés diélectriques et la température de surface sont fortement liées à l'humidité des surfaces. L'association de ces capteurs à l'utilisation de la méthode présentée ici, pourrait constituer un complément intéressant à l'utilisation des images de télédétection optique pour le suivi des pratiques agricoles (Hadria *et al.* 2009b).

Bibliographie

Asner, P.A., Braswell, B.H., Schimel, D.S. and Wessmann, C.A (1998) «Ecological research needs from multi-angle remote sensing data», Remote Sensing of Environment, 63, p. 155–165.

Baillarin, S., Gleyzes, J. P., Latry, C., Bouillon, A., Breton, E., Cunin, L., Vesco, C. and Delvit, J.M. (2004) « Validation of an automatic image orthorectification processing », IGARSS's Proceedings, 20–24 Sept. 2004, vol. 2. (p. 1398−1401) ISBN: 1390-7803-8742-1392.

Baret, F. and Guyot, G. (1991) «Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment», Remote Sensing of Environment, 35, p. 161–173.

Bsaibes, A., Courault, D., Baret, F., Weiss, M., Olioso, A., Jacob, F., Hagolle, O., Marloie, O., Bertrand, N., Desfond, V. and Kzemipour, F. (2009) « Albedo and LAI estimates from FORMOSAT-2 data for crop monitoring », Remote sensing of environment 113, p. 716–729.

Chan, T. and Vese, L. (2001a) « Active contours without edges », IEEE Transaction on image processing, vol. 10, no. 2, p. 266-277.

Chan, T. and Vese, L. (2001b) « Level Set algorithm for minimizing the Mumford-Shah functional in image processing », in proc of IEEE, Workshop on variational, Geometric and level set methods in computer vision, p. 161-168.

Courault, D., Bsaibes, A., Kpemlie, E., Hadria, R., Hagolle, O., Marloie, O., Hanocq, J-F., Olioso, A., Bertrand N., and Desfonds, V. (2008) « Assessing the potentialities of FORMOSAT-2 data for water and crop monitoring at small regional scale in South-Eastern France», Sensors, 8, p. 3460-3481.

Courault, D., Hadria, R., Ruget, F., Olioso, A., Duchemin, B., Hagolle, O. and Dedieu, G (2010) «Combined use of FORMOSAT-2 images with a crop model for biomass and water monitoring of permanent grasslands in Mediterranean region», Hydrol. Earth Syst. Sci., 14, 1731-1744, DOI: 10.5194/hess-14-1731-2010.

Eickeler, S. and Rigoll, G. (Juin 2000) « A novel error measure for the evaluation of video indexing system », Dans International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Istanbul, Turkey.

Gargi, U. and Kasturi, R. (Août 1996) « An evaluation of color histogram-based methods in video indexing », Dans International Workshop on Image Databases and Multimedia Search, p. 75–82, Amsterdam, The Netherlands.

González-Sanpedro, M.C., Le Toan, T., Moreno, J., Kergoat, L. and Rubio, E (2008) «Seasonal variations of leaf area index of agricultural fields retrieved from Landsat data», Remote Sensing of Environment 112, p. 810–824.

Gutman, G. and Ignatov, A. (1995) «Global land monitoring from AVHRR: Potential and limitations», International Journal of Remote Sensing, 16, p. 2301–2309.

Guyot, G. and Baret, F (1988) « Utilisation de la Haute Résolution Spectrale pour Suivre L'état des Couverts Végétaux », Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, European Space Agency, p. 279-286, France.

Hadria, R., Courault, D., Desfonds, V., Bsaibes, A., Olioso, A.and Duchemin, B. (novembre 2008) « Utilisation des images FORMOSAT-2 à hautes résolutions spatiale et temporelle pour le suivi des prairies irriguées dans la région de La Crau Camargue au SE de la France », Journées Scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUF, Madagascar. p. 159-162, 3-7.

Hadria, R., Courault, D., Olioso, A., Desfonds, V., Duchemin, B., Bsaibes, A., Ruget F. and Hagolle, O. (2009a) « Irrigated grasslands monitoring using high spatial and temporal resolutions FORMOSAT-2 images in the SE of France », Submitted to Agricultural Water Management.

Hadria, R., Duchemin, B., Baup, F., Le Toan, T., Bouvet, A. Dedieu G. and Le Page, M. (2009b) «Combined use of optical and radar satellite data for the detection of tillage and irrigation operations», Case study in Central Morocco. Agricultural Water Management, 96, p. 1120–1127.

Hadria, R., Duchemin, B., Jarlan, L., Bouvet, A., Dedieu, G., Baup, F., Khabba, S. and Olioso, A (2010) «Potentiality of optical and radar satellite data at high spatio-temporal resolutions for the monitoring of irrigated wheat crops in Morocco», International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 12S, S32–S37: (DOI : 10.1016/j.jag.2009.09.003).

Hagolle, O., Dedieu, G., Mougenot, B., Debaeker, V., Duchemin, B. and Meygret, A. (2008) « Correction of aerosol effects on multitemporal images acquired with constant viewing angles: Application to Formosat-2 images », Remote Sensing of Environment, 4 (112), p. 1689-1701.

Hall, F.G., Townshend, J.R. and Engmann, E.T. (1995) «Status of remote sensing algorithms for estimation of land surface parameters», Remote Sensing of Environment, 51, pp. 138–156.

Hampapur, A., Jain, R.C. and Weymouth, T. (Mars 1995) « Production model based digital video segmentation », International Journal of Multimedia Tools and Applications, 1(1): p. 9–46.

Kass, M., Witkin , A. and Terzopoulos, D. (1988) « Snakes, active contour model », International Journal of Computer Vision, vol. 1, no. 4, p. 321-331.

Lefèvre, S. (décembre2002) « Détection d'événement dans une séquence Vidéo », Thèse de doctorat de 3e cycle, université François Rabelais, Tours.

Mailhol, J-C., Mérot, A. (2008) «SPFC: a tool to improve water management and hay production in the Crau region», Irrigation Science 26, p. 289–302.

Montagnard, J., Delingette, H. and Ayache, N. (décembre 2001) « A review of deformable surfaces: Topology, Geometry and Deformation », Image and Vision Computing, vol. 19, no. 14, p. 1032-1040.

Osher, S., Sethian, J.A. (1988) «Fronts propagation with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations », journal of computational physics, vol. 79, p. 12–49.

Rousselle, J.J. (juillet 2003) « Les contours actifs, une méthode de segmentation : Application à l'imagerie médicale », Thèse de doctorat, Université de François Rabelais, Tours, France.

Robin, A. (2007) « Détection de changements et classification sous pixeliques en imageries satellitaire, application au suivi temporel des surfaces continentales », Thèse de doctorat, Université Paris Descartes, France.

Ruiloba, R., Joly, P., Maillet, M. and Quénot, G. (Octobre 1999) « Towards a standard protocol for the evaluation of video-to-shots segmentation algorithms», d*ans* European Workshop on Content Based Multimedia Indexing, p. 41–48, Toulouse, France.

Sethian, J.A. (1996) « Level Set Methods and fast marching methods», Cambridge university press, 1ére edition, USA.

http://www.spotimage.com/web/945-les-caracteristiques-des-images-formosat-2.php.

Remerciements :

Cette étude fait partie de projets financés par la région MIP-PACA en France et par le CNES (DAR 2006 TOSCA). Les données FORMOSAT-2 sont fournies par SPOT Image @NSPO (2006). Les auteurs remercient toutes les personnes et institutions qui ont contribué à la réalisation de ce travail.