

APPORT DES IMAGES SATELLITAIRES DE TRES HAUTE RESOLUTION SPATIALE PLEIADES A LA CARACTERISATION DES CULTURES ET DES OPERATIONS CULTURALES EN DEBUT DE SAISON

Emmanuelle Vaudour¹, Paul-Emile Noiro-Cosson¹, Olivier Membreve¹

1: UMR 1091 INRA/AgroParisTech « Environnement et Grandes Cultures », Equipe Sol, avenue Lucien Brétignières F-78850 Thiverval-Grignon, France *Email: Emmanuelle.Vaudour@agroparistech.fr

Résumé

Cette étude s'inscrit dans des programmes de recherche visant à surveiller spatialement l'effet des apports de produits résiduels organiques sur les stocks de carbone des sols, et nécessitant pour cela le recueil de données spatialisées sur les systèmes de culture. L'objectif de cette étude est celui d'évaluer, au niveau d'organisation spatiale des parcelles culturales, l'apport des images satellitaires de Très Haute Résolution (THR) spatiale Pléiades à l'identification des cultures à des stades de développement précoce d'une part, à la détection des changements d'état de surface des sols nus liés aux opérations culturales, d'autre part. La région d'étude, vaste d'environ 4000 ha, dont 2100 ha de surface agricole utile, est située à l'ouest du territoire périurbain francilien de la Plaine de Versailles et du Plateau des Alluets (PVPA) (Yvelines). Environ 100 parcelles culturales ont fait l'objet d'observations de terrain synchrones des prises de vue des deux images Pléiades acquises les 3 et 24 avril 2013 et d'une image SPOT4 acquise le 2 avril 2013. La structuration géomatique de ces données acquises sur le terrain a servi à délimiter des zones susceptibles de servir à l'entraînement ou la validation des résultats de classification assistée par machine à support de vecteurs à noyau polynomial (pSVM). La classification pSVM a été mise en œuvre sur les 4 bandes spectrales assorties du NDVI pour les images monodates, et pour les 8 bandes spectrales assorties de 2 bandes NDVI pour l'image bi-temporelle Pléiades. Pour les classifications monodates des cultures, la précision totale atteint 87% pour l'image SPOT4 du 2 avril (6 classes), 79% pour l'image Pléiades du 3 avril (6 classes) et 85% pour celle du 24 avril (7 classes). Pour la classification bitemporelle (7 classes), la précision totale est de près de 80%, avec des cultures d'hiver très bien discriminées tandis que les confusions opèrent entre l'orge de printemps aux stades 2-3 feuilles et les sols nus préparés pour les autres cultures de printemps. A la date la plus précoce (2-3 avril), l'image Pléiades discrimine bien les opérations culturales (précisions utilisateur et producteur >77%), les jachères et les prairies et renseigne sur l'hétérogénéité spatiale des stades de développement des cultures, tandis que les céréales d'hiver et le colza sont mieux détectés sur l'image SPOT4 (précisions utilisateur et producteur >70%). Les images Pléiades apportent donc des informations complémentaires à celles des images multispectrales de haute résolution spatiale.

Mots-clés : Pléiades, THR, cartographie des cultures, stades phénologiques, opérations culturales, SVM

Abstract

This study is part of several projects aiming at spatially monitoring the effects of exogenous organic matter apply on soil organic carbon sequestration, and necessitating for this purpose the gathering of spatial data about cropping systems. The aim of this study was to assess the contribution of very high spatial resolution (VHR) Pléiades images to both early season crop identification and mapping and changes in bare soil surface characteristics due to cultural operations. The study region covering 4000 ha including 2100 ha-croplands is located west of the peri-urban territory of the Versailles plain and the Alluets plateau (Yvelines, France). About 100 cropped fields were observed on the ground synchronously with two Pléiades images of 3 and 24 April 2013 and one SPOT4 image of 2 April 2013. The GIS structuring of these field data was used for delimitating both training and test zones for the support vector machine classifier with polynomial function kernel (pSVM). For the single date-images, the pSVM was computed on the 4 spectral bands while for the bi-temporal Pléiades image, it relied on the 8 spectral bands and the two NDVI bands. For the single-date classifications of crops, the overall accuracy reached 87% for the SPOT4 image of 2 April (6 classes), 79% for the Pleiades image of 3 April (6 classes) and 82% for that of 24 April (7 classes). For the bi-temporal Pléiades image, the overall accuracy was about 80% (7 classes), winter crops, grasslands and fallows being very well detected while confusions occurred between spring barley at initial stages (2-3 leaves) and bare soils prepared for other spring crops. At the earlier date (2-3 April), the Pléiades image very well discriminated cultural operations (>77%, user's or producer's accuracies) as well as fallows and grasslands, and brought unique information about within-field spatial heterogeneity of crop development stages, while winter cereals and rapeseed were better discriminated by the SPOT4 image winter cereals (>70%, user's or producer's accuracies). Pleiades images therefore bring information complementary to multispectral images with high spatial resolution.

Keywords: Pleiades, VHR, crop mapping, phenological stages, cultural operations, SVM

1. Introduction

Le suivi environnemental des sols de grandes cultures, particulièrement dans l'objectif d'en restaurer les stocks de carbone organique (e.g. Noiro-Cosson et al., 2014) ou d'en évaluer les émissions de gaz à effet de serre

(e.g., Rolland et al., 2010), requiert la caractérisation spatiale des systèmes de cultures et des pratiques culturales afin de paramétrer des modèles de culture agri-environnementaux. Pour ce qui se réfère à la répartition des cultures, ces informations spatialisées sont disponibles via le Registre Parcellaire Graphique

(RPG), qui enregistre toutes les parcelles déclarées dans le cadre de la politique agricole commune de l'Union Européenne. Cependant, le délai de mise à jour de ces données est assez long (2-3 ans) et celles-ci peuvent être imprécises géographiquement et sémantiquement. En effet, un îlot de culture déclaré peut regrouper différentes parcelles culturales et, pour des cultures telle que l'orge, il n'est pas précisé s'il s'agit d'escourgeon ou d'orge de printemps. Les images satellitaires de très haute résolution spatiale telles que Pléiades sont susceptibles de collecter des informations spatialisées détaillées sur les cultures, ainsi que, celles sur les opérations culturales, habituellement issues d'enquêtes fastidieuses auprès des agriculteurs.

La télédétection est largement utilisée pour des thématiques agricoles et plus, particulièrement, le suivi des cultures et la prévision des récoltes (Atzberger, 2013), au moyen de séries temporelles MODIS de résolution grossière (250 m), ou de jeux multi-date d'images Landsat (30 m), notamment. L'utilisation d'images multispectrales de très haute résolution spatiale est plus récente et plus restreinte (Castillero-González et al., 2009) du fait de limitations d'acquisition (et de coût) et de revisite. Le capteur Pléiades offre, par son agilité, sa résolution spatiale et sa précision géométrique, de sérieux atouts pour la caractérisation des systèmes de culture. Le présent travail vise à discriminer les cultures à des stades précoces ainsi qu'à détecter les opérations culturales de printemps. Il pose les questions suivantes : (1) avec quelle précision, comparée à celle d'une image SPOT4 à 20 m de résolution spatiale, est-il possible de distinguer les stades précoces des cultures telles que le blé d'hiver, le colza, l'escourgeon et l'orge de printemps ? (2) est-il possible de séparer ces stades précoces et les sols nus, et pour ces derniers, est-il possible de distinguer les états de surface hérités d'un labour d'hiver non repris et les états de surface résultant des opérations culturales de reprise de labour et de préparation du lit de semence ? (3) L'utilisation de deux images de début de saison permet-elle d'améliorer la précision comparée à celle issue d'une seule image ?

Parmi les algorithmes de classification tels que les machines à support de vecteurs (*Support Vector Machines*, SVM), les réseaux de neurones, les "random forests" et la classification bayésienne par maximum de vraisemblance, les SVM ont fait preuve d'une efficacité bien supérieure pour divers objectifs (Pal et Mather, 2004 ; Mathur et Foody, 2008 ; Mountrakis et al. ; 2011) et notamment les SVM à noyau polynomial (pSVM) se sont avérés les plus performants pour cartographier les opérations culturales (Vaudour et al., 2014a) : c'est pourquoi ceux-ci sont retenus dans le présent travail.

Du fait que la version du RPG la plus récente au moment des acquisitions Pléiades était celle de 2010 et tandis que la version 2013 n'est pas encore sortie, notre étude s'est appuyée sur une série d'observations qualitatives de terrain collectées à ± 2 jours des dates d'acquisition. Ce jeu d'observations a été partitionné, selon un échantillonnage aléatoire stratifié, en un jeu d'entraînement et un jeu de validation.

2. Matériels et méthodes

2.1 Région d'étude

Située dans le territoire péri-urbain francilien de la Plaine de Versailles et du Plateau des Alluets

(Yvelines), la région d'étude couvre 40 km², dont 21 km² de surface agricole utile (SAU), à l'ouest de ce territoire (Vaudour et al., 2013; 2014a, b) (Figure 1). Distant d'environ 30 km de Paris, la région d'étude est le "plateau de Maule" (Maule étant la plus grande agglomération de la région d'étude), établi à environ 120 m d'altitude, qui domine la vallée de la Mauldre (un affluent de la Seine) traversant sa partie orientale du Sud au Nord. Le plateau de Maule repose sur un substratum de craie du Crétacé supérieur à sa base, surmontée d'argiles, de sables littoraux du Lutétien puis de calcaires éocènes à son sommet, recouvert de limons loessiques quaternaires. Ces derniers ont évolué en luvisols et néoluvisols, tandis que des calcosols, colluviosols calcaires résultent des calcaires, marnes et craie et/ou colluvions sur le versant bordant le plateau (Crahet, 1992 ; Vaudour et al., 2013, 2014b). Les horizons de surface ont une teinte dominante 10YR (définie dans le code Munsell®) et la plupart des sols (sauf les calcaires) ont une terre fine légèrement acide à neutre avec des classes texturales de limons légers à limon argileux.

Les principales successions culturales sont composées de colza/blé d'hiver/orge de printemps et quelquefois maïs ou pois. Elles sont principalement gérées par des pratiques de labour conventionnel : labour d'hiver vers Novembre-Décembre suivi par un travail superficiel en Mars puis la préparation du lit de semence pour les cultures de printemps. L'orge de printemps est en principe semée en Mars, suivie du maïs en Avril, néanmoins ce calendrier a été retardé de 3 semaines en 2013 en raison d'un printemps très frais et pluvieux.

2.2 Images satellitaires et données géographiques

Trois images satellitaires multispectrales ont été acquises sur la région d'étude les 2, 3 et 24 avril 2013 : une image SPOT4 à 20 m de résolution spatiale (2 avril) et 2 images Pléiades PHR-1A (3 Avril) and PHR-1B (24 Avril) à 2,80 m de résolution spatiale. Les images des 2 et 3 avril ont été acquises dans des conditions de ciel clair et de visée quasi-nadirale tandis que quelques cumulus et une visée oblique de -16.5° caractérisent l'image du 24 avril.

Le capteur HRV (Haute Résolution Visible) de SPOT4 est doté de 4 bandes spectrales (b1 : 0,50–0,59 μm ; b2 : 0,61–0,68 μm ; b3 : 0,79–0,89 μm ; b4 : 1,58–1,75 μm). L'image SPOT4 a été acquise dans le cadre du programme SPOT4-Take Five du Centre National d'Études Spatiales (CNES) et d'Airbus Défense & Space (Spotimage) de février à juin 2013 sur plusieurs sites dont celui de la région d'étude (Hagolle, 2013). Elle a été orthorectifiée et corrigée atmosphériquement et topographiquement en réflectance de surface (Hagolle et al., 2010).

Le capteur Pléiades dispose de 4 bandes spectrales (b0 : 0,43–0,55 μm ; b1 : 0,50–0,62 μm ; b2 : 0,59–0,71 μm ; b3 : 0,74–0,94 μm). Les images Pléiades ont été livrées en tant que produit "ortho" (Astrium Geoinformation Services, 2012). Nous avons réalisé la correction atmosphérique de ces images au moyen du modèle de transfert atmosphérique ATCOR2 en mode prédéfini, pour terrain plat, condition atmosphérique uniforme, sans retrait de la brume et avec le fichier de calibration par défaut, dont la précision est comprise entre $\pm 2\%$ and 4% de réflectance en dehors des régions de rétrodiffusion (Richter & Schlöpfer, 2014 ; Vaudour et al., 2014b).

Les scènes entières ont été découpées en sous-scènes de ~5 km × 8 km (Figure 1) centrées sur la région d'étude. Le logiciel ENVI 5.0 Classic® (Exelis Visual Information Solutions, Inc.) a été utilisé pour manipuler et traiter les images. Afin de traiter uniquement des pixels agricoles, un masque de la SAU a été construit à partir de la couche vecteur du RPG de 2010. Celle-ci est caractérisée par 478 îlots déclarés par 45 agriculteurs, dont 20 îlots à cultures multiples. Le détail des parcelles culturales de ces îlots a été visuellement interprété sous le logiciel ArcGIS10.1® sur les compositions colorées infrarouge couleur des images Pléiades, résultant en un nouveau fichier vecteur. L'image du 24 avril a fait l'objet d'un masquage supplémentaire des nuages et de leurs ombres portées, qui ont été extraits par interprétation visuelle.

2.3 Observations de terrain sur les cultures, les stades phénologiques et les états de surface du sol

Des observations phénologiques de terrain ont été échantillonnées autour de chaque date d'acquisition (\pm 2 jours), dans des parcelles disposées de part et d'autre de carrefours de chemins ruraux, permettant des arrêts nombreux en voiture, qui ont été géolocalisés. Une parcelle en sols nus a fait l'objet de mesures de réflectance les 17 et 24 avril selon un protocole décrit antérieurement (Vaudour et al., 2014b), mais ces mesures ne seront pas utilisées dans le présent article. Au total, les observations de terrain portant sur le type de culture, le stade phénologique selon l'échelle BBCH (Meier, 2001), l'état de surface du sol nu (présence ou non de croûte de battance, de pierrosité, de débris organiques ou résidus de culture) et le type d'opération culturale, ont concerné 104 parcelles réparties sur la région d'étude autour des 2-3 avril et 55 parcelles (dont 20 n'avaient pas été visitées les 2-3 avril) pour l'image du 24 avril. Le pourcentage de recouvrement végétal a été visuellement interprété pour cette date.

2.4 Approches de classification assistée pSVM

Fondé sur les observations de terrain, un jeu d'aires d'entraînement/validation sélectionné selon un échantillonnage aléatoire stratifié a été construit en vue de mettre en œuvre des classifications pSVM, soit pour une seule date, soit pour une image bi-temporelle. Pour les images des 2-3 avril, ces jeux prenaient en compte 11 classes potentielles (Tableau 1) : types d'opérations culturales pour les sols nus (labour de fin d'hiver non repris ou bien état de surface avec travail superficiel de printemps, passé au cross-kill et/ou au rouleau) ; 2 grands types de cultures (céréales d'hiver et colza) caractérisés par 3 ou 4 stades phénologiques, prairies et jachères. Pour l'image du 24 avril, le jeu d'entraînement/validation prenait en compte 9 classes : 1 unique classe de sol nu en lit de semence (anticipant le semis du maïs ou des pommes de terre, voire des pois), 4 types de cultures (blé d'hiver, escourgeon, colza, orge de printemps) avec 1 ou 2 stades phénologiques et, pour le colza, deux classes de recouvrement végétatif (60-80% et 90-100%), enfin les prairies et les jachères.

Les classifications pSVM ont été mises en œuvre sur les 4 bandes spectrales assorties du NDVI, suivies d'un filtrage au moyen d'un filtre médian 5x5 pour les images Pléiades. Les classes phénologiques ont été recombinaées en classes de cultures, le jeu de validation servant à calculer les matrices de confusion afin

d'évaluer la performance de la classification, en mode détaillé comme en mode recombinaé. Les images des 2 et 3 avril rendent compte de 6 classes recombinaées (céréales d'hiver, colza, labour d'hiver non repris, travail superficiel et lit de semence, jachères, prairies), tandis que celles du 24 avril et l'image bi-temporelle rendent compte de 7 classes sémantiquement plus précises pour les cultures : blé d'hiver, escourgeon, colza, orge de printemps, autres cultures de printemps (maïs, pomme de terre), jachères, prairies.

3. Résultats et discussion

3.1 Classifications monodate

Concernant les classifications monodate des stades phénologiques des cultures et des opérations culturales, la précision totale atteint 66% pour l'image SPOT4 du 2 avril, et près de 64% pour l'image Pléiades du 3 avril (Tableau 1). Tandis que les céréales d'hiver et le colza sont mieux détectés sur l'image SPOT4, l'image Pléiades discrimine mieux les opérations culturales (>77%, précisions utilisateur et producteur), révélant nettement la géométrie des limites parcellaires (Figure 2). Elle discrimine mieux les jachères et les prairies et renseigne sur l'hétérogénéité spatiale des stades de développement des cultures. La performance obtenue pour la détection des opérations culturales de début de saison végétative est supérieure à celle obtenue dans une étude antérieure, via une paire optique/radar (Vaudour et al., 2014a) ; cependant, dans notre étude, l'emprise considérée est 10 fois plus petite et les types de sols plus homogènes. Lorsque divers stades phénologiques d'une même culture cohabitent dans la région d'étude, ils ne sont pas bien discriminés entre eux, hormis pour les stades de début et mi-tallage des céréales d'hiver.

Pour les classifications monodate recombinaées des cultures, la précision totale atteint 87% pour l'image SPOT4 du 2 avril, 79% pour l'image Pléiades du 3 avril (Tableau 2) et 85% pour celle du 24 avril (Tableau 3). Si l'on teste la classification pSVM sur l'image SPOT4 sans la bande 4, la précision totale de la classification recombinaée chute à 69% ainsi que les précisions du colza (25% producteur, 76% utilisateur). La résolution de 20 m, intégrant mieux le comportement spectral du couvert, ainsi que la bande 4 du moyen infrarouge réfléchitif de SPOT4, semblent être un atout pour discriminer les céréales d'hiver et le colza à des stades précoces (C1 à D1) avant floraison. En effet, aux dates des 2-3 avril, le colza a un recouvrement végétatif faible et variable (40-60%), susceptible, à très haute résolution spatiale, de conduire des confusions avec les céréales d'hiver au stage mi-tallage (matrice de confusion non détaillée ici). Les images Pléiades apportent donc des informations complémentaires à celles des images multispectrales de résolution plus grossière.

3.2 Classification bi-temporelle

La précision totale de la classification bi-temporelle (7 classes) est de près de 80% : les confusions opèrent entre l'orge de printemps au stade 2-3 feuilles (stade 12 sur l'échelle BBCH) et les sols nus préparés en lit de semence pour d'autres cultures de printemps telles que le maïs et la pomme de terre. Cette précision est inférieure à celle de la classification monodate du 24 avril, en revanche la classification bi-temporelle permet

Performance ▼	Image ►	SPOT-2 Avril		Pléiades-3 Avril	
		Précision producteur	Précision utilisateur	Précision producteur	Précision utilisateur
Céréales d'hiver		92,9	81,4	88,9	69,2
Colza		80,8	95,4	54,0	81,1
Labour d'hiver non repris		87,2	94,2	91,2	99,9
Travail superficiel et lit de semence		90,7	68,4	100,0	77,0
Jachères		75,0	79,0	100,0	96,3
Prairies		70,6	100,0	100,0	99,0
Précision totale (%)		86,8		79,1	
Kappa (%)		81,3		70,5	

Tableau 2 : Performances des classifications pSVM monodate pour SPOT et Pléiades les 2 et 3 avril

Performance ▼	Image ►	Pléiades-24 Avril		Pléiades-3+24 Avril	
		Précision producteur	Précision utilisateur	Précision producteur	Précision utilisateur
Blé d'hiver		79,1	81,2	99,3	85,1
Escourgeon		87,0	69,9	73,6	96,8
Colza		72,3	88,9	90,0	94,3
Orge de printemps		59,8	54,0	71,1	34,2
Autres cultures de printemps (maïs, pomme de terre)		85,0	87,8	59,8	87,6
Jachères		99,6	88,3	100,0	100,0
Prairies		89,9	61,0	99,3	99,3
Précision totale (%)		84,8		79,6	
Kappa (%)		81,2		74,7	

Tableau 3 : Performances des classifications pSVM monodate (24 avril) et bi-temporelle (3 et 24 avril) pour Pléiades

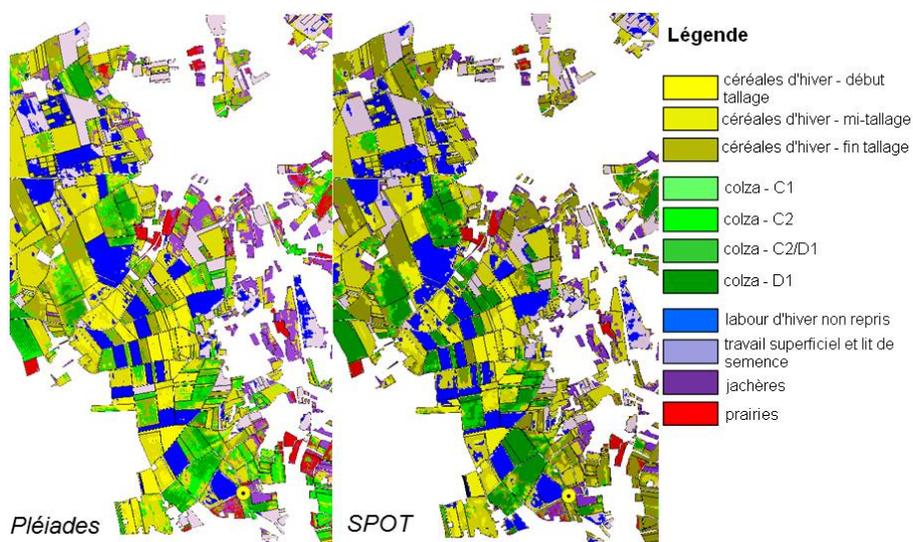


Figure 2 : Cartes des cultures issues des classifications monodate des 2 et 3 avril

de mieux discriminer le blé d'hiver, l'escourgeon, le colza, les prairies et les jachères.

L'incertitude des précisions totales n'a pas été évaluée en testant par bootstrap, l'effet de la composition des aires d'entraînement (Vaudour et al., 2014a). La précision obtenue l'a été à partir d'un jeu de données de terrain aisé à collecter en un temps limité. L'agilité du capteur Pléiades et la possibilité de le programmer l'avant-veille de la prise de vue sont des atouts pour mettre en œuvre une courte campagne de terrain en l'adaptant aux conditions météorologiques et logistiques. Un jeu additionnel de 107 parcelles de validation disponible sur 1/3 de la SAU étudiée a permis de vérifier qu'en moyenne, la prédiction des cultures était correcte pour 69 % des parcelles, étant la plus faible pour l'escourgeon (20% seulement, souvent confondu avec le blé d'hiver, y compris sur le terrain) et supérieure à 70% des parcelles pour le colza, les jachères, le blé d'hiver et les cultures de printemps autres que l'orge.

4. Conclusion

Il est possible de cartographier les cultures et les opérations culturales de printemps au moyen d'images satellitaires Pléiades de très haute résolution spatiale acquises en début de saison végétative, ceci avec une précision totale comprise entre 79 et 85% des pixels, et près de ~70 % des parcelles au moins. Il y a intérêt, si cela est possible, à combiner ces acquisitions avec celles d'images satellitaires multispectrales de haute résolution spatiale, afin de bénéficier des atouts complémentaires de ces images, pour des cultures telles que le colza notamment. Les images Pléiades permettent en outre de détecter les opérations culturales avec une précision utilisateur ou producteur élevée (>77%). Des développements ultérieurs de cette étude pourraient porter sur la comparaison de la performance de la classification pSVM avec celles d'autres algorithmes, notamment basés sur des approches orientées-objet. Outre la mise à jour détaillée des informations sur les cultures, l'intérêt de cette cartographie précoce est celui d'anticiper les récoltes et d'ouvrir des perspectives pour ajuster la conduite des cultures en cours de saison végétative. Le système Pléiades est susceptible de venir en complément des autres systèmes, tels que Venüs et Sentinel-2, fournissant des séries temporelles tout au long du cycle cultural.

Remerciements

Cette étude a bénéficié du soutien du Centre National d'Études Spatiales (CNES) au travers du volet agriculture du programme ORFEO (Optical and Radar Federated Earth Observation) « Recette thématique utilisateurs » (RTU) du CNES. Elle a bénéficié aussi des soutiens de l'ADEME dans le cadre du projet PROSTOCK-Gessol3 et du Labex BASC du campus Paris-Saclay dans le cadre du projet SOCSENSIT. Nous remercions particulièrement D. Hadjar et B. Boucat pour leur contribution aux observations de terrain.

Références

Astrium GeoInformation Services, 2012. *Pléiades imagery user guide*. Astrium Geo-Information Services,

Toulouse, France, 106 p. URL: http://www.satimagingcorp.com/media/pdf/User_Guide_Pleiades.pdf

Atzberger C., 2013. *Advances in remote sensing of agriculture: context description, existing operational monitoring systems and major information needs*. Remote Sensing, 5, 949-981.

Castillero-González I.L., López-Granados F., García-Ferrer A., Peña-Barragan J.M., Jurado-Expósito M., Sánchez de la Orden J.M., González-Audicana M. (2009). *Object- and pixel-based analysis for mapping crops and their agro-environmental associated measures using QuickBird imagery*. Computers and Electronics in Agriculture, 68: 207-215.

Crahet M., 1992. *Carte des sols de Versailles, échelle 1/50'000*. Notice explicative. Service d'étude des sols et de la Carte Pédologique de France, INRA.

Hagolle, O., 2013. *Séries temporelles, SPOT4 Take Five blog*, URL: <http://www.cesbio.ups-tlse.fr/multitemp/>

Hagolle O., Huc M., Villa Pascual D., Dedieu G., 2010. *A multi-temporal method for cloud detection, applied to FORMOSAT-2, VENUS, LANDSAT and SENTINEL-2 images*. Remote Sensing of Environment, 114:1747-1755.

Meier, U. (Ed.), 2001. *Growth stages of mono- and dicotyledonous plants*. BBCH Monograph. Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry, Germany.

Noirot-Cosson P.E., Vaudour E., Aubry C., Gilliot J.M., Gabrielle B., Houot S., 2014. *Scenarios of organic amendment use to increase soil carbon stocks and nitrogen availability in cropped soils at the territory scale: spatial and temporal simulations with the NCSOIL/CERES-EGC crop model*. Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly 2014, Vienna, Austria, Vol. 16, EGU2014-2656.

Mathur, A., Foody, G.M., 2008. Crop classification by a support vector machine with intelligently selected training data for an operational application. International Journal of Remote Sensing, 29, 2227-2240.

Mountrakis G., Im J., Ogole C., 2011. *Support vector machines in remote sensing: a review*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66:247-259.

Pal, M., Mather, P.M., 2004. *Assessment of the effectiveness of support vector machines for hyperspectral data*. Future Generation Computer Systems, 20, 1215-1225.

Richter R., Schläpfer D., 2014. *ATCOR-2/3 user guide*, version 8.3.1, Zurich, Switzerland, 238 p.

Rolland M.N., Gabrielle B., Laville P., Cellier P., Beekmann M., Gilliot J.M., Michelin J., Hadjar D., Curci G., 2010. *High-resolution inventory of NO emissions from agricultural soils over the Ile-de-France region*. Environmental Pollution, 158(3) : 711-722.

Vaudour E., Baghdadi N., Gilliot J.M., 2014a. *Mapping tillage operations over a peri-urban region using*

combined SPOT4 and ASAR/ENVISAT images. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 28 :43-59.

Vaudour E., Gilliot J.M., Bel L., Bréchet L., Hadjar D., Hamiache J., Lemonnier Y., 2014b. Uncertainty of soil reflectance retrieval from SPOT and RapidEye multispectral satellite images using a per-pixel bootstrapped empirical line atmospheric correction over an agricultural region. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 26:217-234.

Vaudour E., Bel L., Gilliot J.M., Coquet Y., Hadjar D., Cambier P., Michelin J., Houot S., 2013. Potential of SPOT multispectral satellite images for mapping topsoil organic carbon content over peri-urban croplands. Soil Science Society of America Journal, 77:2122-2139.