



HAL
open science

L'usage de séries temporelles d'images de télédétection pour une gestion durable des territoires : Application à l'étude des prairies dans l'Ouest de la France

Pauline Dusseux, Thomas Corpetti, Laurence Hubert-Moy

► To cite this version:

Pauline Dusseux, Thomas Corpetti, Laurence Hubert-Moy. L'usage de séries temporelles d'images de télédétection pour une gestion durable des territoires : Application à l'étude des prairies dans l'Ouest de la France. *Cybergeo: Revue européenne de géographie / European journal of geography*, 2019, 10.4000/cybergeo.33245 . hal-02376209

HAL Id: hal-02376209

<https://hal.science/hal-02376209>

Submitted on 24 May 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



Cybergeo : revue européenne de géographie / European journal of geography

Revue fondée en 1996 / Journal founded in 1996
Cartographie, Imagerie, SIG | 2019

L'usage de séries temporelles d'images de télédétection pour une gestion durable des territoires : Application à l'étude des prairies dans l'Ouest de la France

*The use of time series of remote sensing images for a sustainable management of
territories: Application to the study of grasslands in the West of France*

*El uso de series temporales de imágenes satelitales para una gestión sustentable
de los territorios: Aplicación al estudio de praderas en el oeste de Francia*

Pauline Dusseux, Thomas Corpetti et Laurence Hubert-Moy



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/cybergeo/33245>

DOI : 10.4000/cybergeo.33245

ISSN : 1278-3366

Éditeur

UMR 8504 Géographie-cités

Ce document vous est offert par Université de Rouen Normandie – Bibliothèque Universitaire



Référence électronique

Pauline Dusseux, Thomas Corpetti et Laurence Hubert-Moy, « L'usage de séries temporelles d'images de télédétection pour une gestion durable des territoires : Application à l'étude des prairies dans l'Ouest de la France », *Cybergeo: European Journal of Geography* [En ligne], Cartographie, Imagerie, SIG, document 919, mis en ligne le 06 novembre 2019, consulté le 24 mai 2024. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/33245> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/cybergeo.33245>

Ce document a été généré automatiquement le 16 février 2023.



Le texte seul est utilisable sous licence CC BY 4.0. Les autres éléments (illustrations, fichiers annexes importés) sont « Tous droits réservés », sauf mention contraire.

L'usage de séries temporelles d'images de télédétection pour une gestion durable des territoires : Application à l'étude des prairies dans l'Ouest de la France

The use of time series of remote sensing images for a sustainable management of territories: Application to the study of grasslands in the West of France

Pauline Dusseux, Thomas Corpetti et Laurence Hubert-Moy

Introduction

- 1 Les prairies, qui sont caractérisées par une grande diversité, représentent la formation végétale la plus répandue sur le globe. Cependant, bien qu'elles couvrent plus de 40 % de la surface terrestre (European Communities, 2008), les surfaces en prairies ont fortement diminué depuis plusieurs décennies. Ainsi, en Europe, elles occupent aujourd'hui, environ un tiers de la Surface Agricole Utile (SAU) – la SAU représentant 40 % de la surface totale (Eurostat, 2016) – contre plus de la moitié au milieu du XXe siècle (Huyghe *et al.*, 2014). C'est principalement au profit des cultures céréalières et fourragères, et dans une moindre mesure au profit des surfaces urbanisées et des surfaces boisées, ainsi qu'à la mise en place de la politique de modernisation et d'intensification de l'agriculture des années 1970, que les surfaces en herbe se sont réduites. L'intensification de l'agriculture a entraîné une évolution des pratiques agricoles se traduisant, d'une part, par une augmentation des surfaces de prairies temporaires au détriment des prairies permanentes et, d'autre part, par l'utilisation accrue de fertilisants augmentant ainsi la croissance de l'herbe et l'intensification de l'usage des surfaces en herbe au cours de l'année.

- 2 Or, les prairies remplissent des fonctions multiples. Les services écosystémiques qu'elles rendent ont été identifiés à l'occasion du Millenium Ecosystem Assessment (MEA, 2005). En effet, elles jouent un rôle important tant sur le plan économique, pour la gestion des stocks de fourrages (Vigneau-Loustau, Huyghe, 2008), que sur le plan environnemental, en influant notamment sur la régulation des flux d'azote, de polluants et de carbone, préservant ainsi la qualité de l'eau, des sols et de l'air (Vertès *et al.*, 2010 ; Soussana, Lüscher, 2007). Enfin, elles présentent une biodiversité végétale et animale plus riche que les grandes cultures, ceci contribuant de manière positive à la qualité de l'environnement. Cependant, le rôle fonctionnel des prairies et l'importance respective de leurs différentes contributions varient fortement selon leur nature, leur mode d'utilisation et leur contexte d'exploitation. Dès lors, des pratiques intensives telles que le surpâturage, la multiplication des fauches ou le retournement fréquent des parcelles génèrent des flux de nitrates plus importants, un stockage de carbone limité, un appauvrissement de la biodiversité et ainsi des risques élevés sur l'environnement (Vertès *et al.*, 2010 ; Soussana, Lüscher, 2007 ; Sullivan *et al.*, 2010).
- 3 Au regard de ces diverses fonctions, la régression des prairies pose plusieurs types de problèmes (Carrère, 2012), parmi lesquels un manque de fourrage en cas de sécheresse estivale et une baisse du stockage du carbone et de l'azote dans les sols. L'estimation de la place des prairies dans les systèmes de production et l'identification des pratiques agricoles qui leur sont associées représentent donc un enjeu important, notamment pour mesurer leur impact sur l'environnement. Dans ce contexte, deux échelles d'étude sont à considérer : l'échelle interannuelle pour recenser les prairies et déterminer leur âge et l'échelle intra-annuelle pour identifier leurs modes de gestion et leur productivité.
- 4 Or, la connaissance que nous avons actuellement des prairies sur leur répartition au sein des paysages agricoles et sur leur évolution dans le temps est lacunaire ou peu précise (Garcia-Feced *et al.*, 2014). La répartition spatiale et la dynamique temporelle des pratiques associées aux prairies telles que la fauche, le pâturage ou la fertilisation sont *a fortiori* largement méconnues (Hill *et al.*, 2005), dans la mesure où elles varient en fonction de la configuration des exploitations agricoles (selon le type de système d'exploitation, la superficie, la situation géographique de la prairie vis-à-vis du siège d'exploitation), des besoins de l'agriculteur et des conditions climatiques. Dans le but d'étudier les interrelations entre les systèmes agricoles et l'environnement, par exemple pour évaluer l'impact des pratiques agricole sur l'environnement, la cartographie des prairies doit être réalisée à l'échelle de la parcelle puis analysée à des échelles plus petites telles que celles du bassin-versant ou de la région.
- 5 Quand les pratiques agricoles sont observées sur le terrain ou à partir de l'interprétation de photographies aériennes, leur inventaire et leur suivi peuvent être très précis mais ils sont le plus souvent limités à quelques parcelles, voire au mieux à quelques exploitations agricoles (Delaby *et al.*, 2001). Quand ils sont effectués avec des données issues des recensements agricoles, ils peuvent couvrir le territoire national, mais l'inventaire des prairies est incomplet et les pratiques associées à ces prairies ne sont pas répertoriées (Lecerf, 2008). En conséquence, les modèles utilisés pour comprendre le fonctionnement des systèmes agricoles incluant des prairies, pour simuler leur évolution future et évaluer leur impact sur l'environnement, sont limités à l'utilisation des informations qui ne sont pas représentatives de la diversité réelle des pratiques rencontrées et simulent des pratiques sans connaître leur fréquence et leur

répartition spatiale sur des territoires étendus. Ainsi, pour connaître précisément les dynamiques spatiotemporelles des prairies et des pratiques agricoles qui leur sont associées à des échelles territoriales, il est nécessaire d'avoir recours à des données acquises par télédétection.

- 6 La télédétection spatiale est un outil d'observation couramment utilisé pour étudier les changements d'occupation et d'utilisation des sols. Les techniques d'observation spatiale ont beaucoup progressé ces dernières années : avec la multiplication des capteurs et la mise en orbite de satellites permettant d'enregistrer des données à haute résolution spatiale avec une forte capacité de "revisite", on peut envisager l'identification précise des prairies et des pratiques agricoles associées (Hill, 2013 ; Richter *et al.*, 2012). Or, si dans le domaine agricole, les cultures font l'objet d'inventaires et de suivis réguliers avec ces données (Blaes *et al.*, 2005 ; Marais Sicre *et al.*, 2016 ; Waldner *et al.*, 2016), les prairies restent très peu étudiées. En effet, la végétation peut être analysée à partir de séries d'images satellites optiques et/ou radars à travers l'estimation de paramètres décrivant l'état de la surface terrestre. Cependant, dans le cas des prairies et des pratiques agricoles qui leur sont liées, de nouvelles interrogations se posent tant sur le choix des paramètres à extraire des images pour identifier les prairies que sur les méthodes à mettre en place pour traiter les séries temporelles d'images afin d'effectuer le suivi des prairies et de déterminer leurs modes de gestion et leur ancienneté.
- 7 L'objectif de cet article est de montrer un exemple de l'utilisation de séries temporelles d'images à haute résolution spatiale pour, d'une part, étudier la dynamique spatiotemporelle des prairies depuis les années 50, et, d'autre part, les caractériser en déterminant leur mode de gestion et leur productivité. Après avoir exposé la problématique de la cartographie des prairies en milieu agricole, nous décrirons et analyserons les travaux que nous avons menés dans un bassin-versant de l'Ouest de la France.
- 8 Ces travaux ont été conduits au laboratoire LETG Rennes, dans le cadre du projet ACASSYA (ACcompagner l'évolution Agro-écologique deS SYstèmes d'élevAge dans les bassins-versants côtiers), programme ANR SYSTERRA (Ecosystèmes, Territoires, Ressources vivantes et Agricultures).

L'identification et le suivi des prairies par télédétection

La diversité des prairies et de leurs modes de gestion en milieu agricole

- 9 Le terme "prairie" recouvre une grande diversité selon les milieux considérés et les activités humaines qui s'y exercent. Le Service Central des Études et Enquêtes Statistiques du ministère de l'Agriculture (SCEES) a établi en 1998 une typologie des prairies en milieu agricole basée sur leur composition botanique, leur âge et leur mode de gestion. Ainsi, trois grandes catégories de prairies sont distinguées : 1. Les surfaces toujours en herbe ou prairies permanentes, 2. Les prairies temporaires, 3. Les prairies artificielles. Les surfaces toujours en herbe (STH) ou prairies permanentes correspondent aux surfaces herbacées de plus de 5 ans, regroupant ainsi des prairies productives fauchées et/ou pâturées et des prairies plus ou moins productives essentiellement pâturées. Cette catégorie comprend des prairies bien différentes : des

prairies "naturelles" non labourables et des prairies de longue durée semées ou améliorées par sur-semis. Les prairies temporaires correspondent aux surfaces herbacées âgées de moins de 5 ans. Elles sont semées, utilisées de manière assez intensive et retournées au moins tous les 5 ans, regroupant ainsi des prairies à forte production exploitées en fauche et par pâturage. Enfin les prairies artificielles correspondent à des surfaces ensemencées en légumineuses fourragères annuelles exclusivement fauchées.

- 10 À l'échelle Européenne, depuis 2004, une distinction a été établie entre les prairies permanentes et les prairies temporaires (Commission Régulation EU N°796/2004). Dans ce cadre, les prairies permanentes correspondent aux surfaces herbacées, ressemées naturellement ou cultivées, pâturées et/ou fauchées, non retournées pendant au moins 5 années. Les prairies temporaires sont, quant à elles, des surfaces herbacées semées et implantées, pâturées et/ou fauchées de manière plus intensive et ayant une ancienneté de moins de 5 années entrant ainsi dans une rotation culturale.
- 11 Les prairies sont très diverses. Outre le choix des espèces et des variétés, conditionné par le contexte pédoclimatique et les objectifs de l'agriculteur, les facteurs qui vont influencer la diversité floristique et la productivité des prairies relèvent majoritairement des pratiques agricoles qui leur sont associées. Au cours de la saison végétative la prairie peut être exploitée par pâturage ou par fauche de manière exclusive ou combinée, les pratiques et leurs intensités diffèrent selon le type de prairie considéré. Des prairies fauchées, pâturées et à usage mixte peuvent coexister au sein d'une même exploitation agricole. En fonction de la structure des exploitations, les besoins des troupeaux et le choix des systèmes d'élevage, les pratiques appliquées sur les prairies vont varier selon leur distance au siège d'exploitation. Les prairies pâturées présentent généralement une strate herbacée basse, très dense au niveau du sol, irrégulière et plutôt hétérogène, souvent formée de touffes et de zones plus rases alors que les prairies fauchées peuvent atteindre des hauteurs d'herbe plus importantes pour ensuite être coupées à ras et présentent une strate herbacée régulière et assez homogène. Ainsi, la distinction entre les prairies exclusivement pâturées et celles uniquement fauchées est assez nette d'un point de vue physiologique, les premières s'identifiant par leur hétérogénéité alors que les secondes se reconnaissent à leur hauteur et leur homogénéité de structure. D'un point de vue floristique, les prairies pâturées montreront généralement une diversité d'espèces plus importante que les prairies fauchées, à nuancer selon l'intensité des pratiques de pâturage et de fauche. Aussi, fauche et pâturage peuvent se succéder sur une même parcelle durant la saison végétative correspondant à l'exploitation mixte des prairies, ceci rendant plus difficile leur distinction.

La cartographie des prairies par télédétection : intérêt des séries temporelles à haute résolution spatiale

- 12 La télédétection est un outil d'observation couramment utilisé depuis plus de deux décennies pour étudier l'état et l'évolution des surfaces terrestres. Elle permet d'effectuer un suivi des systèmes agricoles mis en place sur des territoires plus ou moins étendus en fonction des données utilisées et ainsi de comprendre les dynamiques agricoles qui en découlent à l'échelle d'une exploitation, d'un bassin-versant, d'une région ou d'un pays tout entier (Xie *et al.*, 2008 ; Thorp *et al.*, 2004). Elle produit des

images à partir desquelles il est possible de dériver des paramètres et des variables permettant d'identifier et de caractériser les prairies. Le choix des images, en fonction de l'objectif recherché, c'est-à-dire l'identification des prairies et des pratiques associées dans notre cas, est effectué selon deux caractéristiques principales qui sont les résolutions (spatiale et temporelle) des capteurs utilisés pour acquérir les images. La première est assimilée à la taille couverte par les pixels de l'image, et son choix est fixé en fonction de la taille minimale des éléments à reconnaître au sol : les parcelles de prairies dans notre cas qui doivent être couvertes par plusieurs pixels au minimum. La seconde correspond à la capacité de revisite d'un capteur sur un même site d'étude, sachant que l'étude des prairies nécessite l'acquisition de plusieurs images au cours de l'année en raison de leur grande diversité. Les résolutions spatiale et temporelle varient fortement selon les capteurs. La première peut aller du kilomètre au mètre selon l'échelle considérée, passant de l'inventaire des prairies à l'échelle globale pour les faibles résolutions à l'étude des pratiques agricoles à l'échelle parcellaire, voire infraparcellaire, pour les résolutions les plus fines. La résolution temporelle des capteurs varie quant à elle d'un pas de temps journalier à un pas de temps quasi mensuel, la disponibilité d'images exploitables étant toutefois grandement contrainte par la couverture nuageuse pour les capteurs fonctionnant dans le domaine optique. Jusqu'à présent, ces résolutions sont inversement proportionnelles, un capteur à haute résolution spatiale possédant une plus faible capacité de revisite qu'un capteur à basse résolution spatiale. Ainsi, les données satellites à basse résolution spatiale sont plutôt utilisées pour cartographier la couverture terrestre à l'échelle globale afin d'étudier les changements des grands types d'occupation des sols (Bartholomé *et al.*, 2005). Les données à moyenne résolution spatiale sont retenues pour suivre les dynamiques interannuelles de l'occupation des sols dans des paysages homogènes, peu fragmentés, au mieux à l'échelle de l'îlot parcellaire (Benoit *et al.*, 1989 ; Lecerf, 2008). Les données à haute ou très haute résolution spatiale (HRS ou THRS) permettent, quant à elles, d'identifier et de caractériser des objets géographiques de petite taille comme des parcelles agricoles, et d'en suivre l'évolution inter et intra-annuelle (Franke *et al.*, 2012 ; Fœrster *et al.*, 2012 ; Schuster *et al.*, 2011 ; Mehner *et al.*, 2004).

- 13 Différents paramètres peuvent être dérivés des données de télédétection tels que des indices de végétation (par exemple le NDVI) directement calculés à partir des mesures de réflectance des images ou des variables biophysiques (par exemple le LAI ou le fCOVER) estimées avec un modèle physique de transfert radiatif. Ces paramètres permettent, d'une part, de reconstituer l'évolution des parcelles en fonction de la croissance de la végétation et des pratiques agricoles mises en place du fait de leur sensibilité à la densité et à l'état de la végétation, et, d'autre part, d'estimer la productivité des prairies.

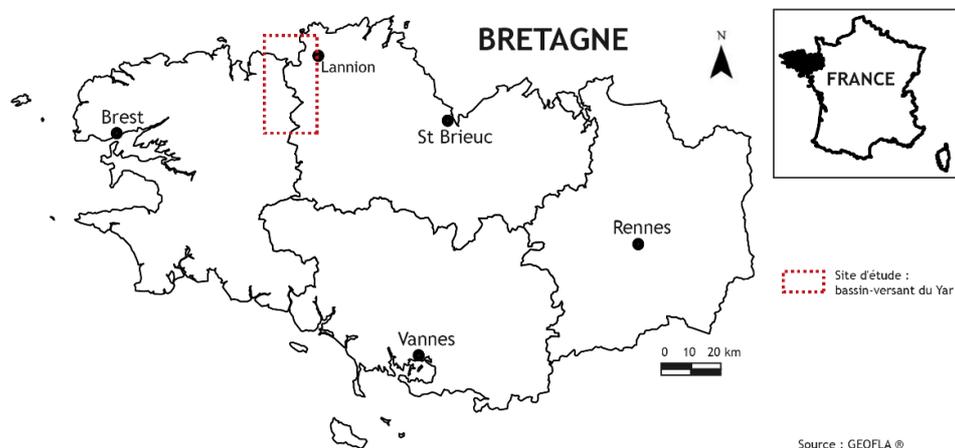
Applications aux prairies dans l'Ouest de la France

Site d'étude

- 14 Le site d'étude retenu est le bassin-versant du Yar (Figure 1). D'une superficie de 61.5 km² et localisé sur le littoral nord-ouest de la Bretagne, ce site, majoritairement agricole et essentiellement orienté vers l'élevage bovin, présente une grande proportion de prairies (60 % de la SAU). La régression des surfaces en prairies s'est

accompagnée sur ce site d'un accroissement de leur fertilisation. En conséquence, des taux élevés d'azote dans les eaux des rivières ont été enregistrés depuis plusieurs années, entraînant un fort développement d'algues vertes sur le littoral de ce bassin-versant. Les prairies sont pâturées, fauchées ou gérées en pratiquant le pâturage et la fauche dans une même parcelle. À l'échelle du bassin-versant, près de 55 % des prairies sont principalement pâturées, 5 % sont fauchées exclusivement, 40 % étant exploitées de façon mixte. Ce bassin-versant est ainsi représentatif de la grande diversité des prairies de l'Ouest de la France qui résultent des pratiques agricoles qui y sont associées. Ce site a fait l'objet de nombreuses études de suivi de l'occupation du sol par télédétection. Ainsi, une importante base de données permettant de retracer son évolution paysagère est disponible. Elle comprend plusieurs types d'information qui ont été collectés sur le terrain : des relevés d'occupation et d'usage des sols, des mesures physiques (réflectance, biomasse, indice de surface foliaire) et des enquêtes auprès d'agriculteurs-exploitants qui ont servi à calibrer et/ou valider les traitements effectués sur les images de télédétection.

Figure 1 : Localisation du site d'étude



Matériels et méthodes utilisés

À une échelle interannuelle

- 15 Deux trajectoires temporelles d'occupation des sols ont été reconstituées à l'échelle parcellaire sur le site d'étude afin de retracer l'évolution des prairies dans les systèmes de production agricole depuis les années 50.
- 16 La première trajectoire a été effectuée sur un pas de temps long c'est-à-dire des années 1950 aux années 2000. Les données utilisées pour analyser la dynamique spatiotemporelle des prairies sur cette période sont des cartes de l'occupation des sols du bassin-versant du Yar pour les années 1952, 1978, 1998 et 2008. Ces cartes ont été élaborées à partir de la classification, par photo-interprétation assistée par ordinateur, de photographies aériennes d'une résolution spatiale de 0,5 m. Elles ont ensuite été intégrées dans un Système d'information Géographique (SIG) afin de déterminer la dynamique spatiotemporelle des prairies.

- 17 La deuxième trajectoire a été réalisée sur un pas de temps court, c'est-à-dire sur une période allant de 1997 à 2008. Les données utilisées pour l'analyse de la dynamique spatiotemporelle des prairies sur cette période sont des cartes annuelles de l'occupation des sols du bassin-versant du Yar des années 1997 à 2008. Ces cartes ont été établies à partir du traitement d'images satellites acquises par des capteurs à haute résolution spatiale (de 2 à 30 m) de type Quickbird, SPOT ou Landsat. Deux images ont été acquises par année, une en période estivale et une autre en période hivernale. Elles ont d'abord été géoréférencées et corrigées des effets de l'atmosphère puis classées individuellement. Des classifications automatiques supervisées ont été réalisées sur la base d'observations effectuées à l'échelle parcellaire chaque année sur la zone d'étude (type d'occupation des sols, hauteur et densité de la végétation). Enfin, ces classifications ont été intégrées dans un SIG afin d'identifier et de corriger manuellement par requête et photo-interprétation des successions hautement improbables ou impossibles sur le plan agronomique en fonction de la dynamique de l'occupation des sols observée.

À une échelle intra-annuelle

- 18 Trois séries temporelles d'images satellites à haute résolution spatiale ont été utilisées pour étudier les prairies à une échelle intra-annuelle. Ces séries sont composées d'images SPOT, Landsat et Quickbird acquises pendant la saison végétative (Tableau 1). Ces images, qui ont des résolutions spatiales comprises entre 2 et 30 m, apparaissent bien adaptées aux paysages agricoles de type fragmenté (petites parcelles bocagères). Plusieurs séries acquises sur des années différentes ont été étudiées afin 1. d'évaluer l'intérêt des périodes d'acquisition des données en fonction des stades phénologiques de la végétation ; 2. d'analyser la croissance des prairies en fonction des conditions climatiques.
- 19 Toutes les images ont été corrigées des effets radiométriques, atmosphériques et géométriques qui perturbent le signal afin de rendre les images superposables et comparables. Une fois ces prétraitements réalisés, l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI : *Normalized Difference Vegetation Index*) a été calculé pour chacune des images. Cet indice est très utilisé pour effectuer le suivi de la densité et de l'état de la végétation (Rouse *et al.*, 1974). En plus, deux variables biophysiques ont été dérivées des images satellites en appliquant le modèle de transfert radiatif PROSAIL (Jacquemoud *et al.*, 2009) : la surface foliaire (LAI : *Leaf Area Index*) et la fraction de couverture végétale verte (fCOVER : *fraction of Vegetation Cover*). L'intérêt de ces variables a déjà été largement montré pour caractériser l'état des couverts végétaux (Jacquemoud *et al.*, 2009 ; Lecerf 2008). Ces indices et variables ont ensuite été intégrés dans un SIG : les images utilisées présentant des résolutions spatiales différentes, les indices et variables qui en ont été dérivés à l'échelle pixellaire ont été transposés à l'échelle parcellaire par le calcul de la valeur moyenne et médiane des pixels inclus dans une parcelle.
- 20 Deux méthodes de classification supervisées ont été évaluées : la méthode des k plus proches voisins (KNN) et la méthode des séparateurs à vastes marges (SVM). Ces méthodes présentent des caractéristiques différentes et ont largement été exploitées en télédétection (Mountrakis *et al.*, 2011). L'indice Kappa (Cohen *et al.*, 1960) et la précision globale ont été calculés pour évaluer les résultats des classifications (Dusseux *et al.*, 2014b). Des campagnes de terrain mensuelles ont été pratiquées sur le site d'étude afin de collecter plusieurs types d'informations : des relevés d'occupation et

d'utilisation des sols, des mesures spectrales et de biomasse, des photographies hémisphériques et des enquêtes chez les agriculteurs. Les relevés d'occupation et d'utilisation des sols ont été utilisés pour constituer un jeu de calibration et de validation pour les classifications des images. Les mesures *in situ* et les photographies ont, quant à elles, servies à calibrer et valider les prétraitements des images et calculer des indices de végétation et des variables biophysiques (Dusseux *et al.*, 2014a).

Tableau 1 : Caractéristiques des images de télédétection optique utilisées

	Date de prise de vue (DOY)	Capteur	Résolution spatiale (m)
2006	19/03/2006 (78)	Quickbird 5	2,5
	06/04/2006 (96)	SPOT-2 HRV1	20
	01/06/2006 (152)	SPOT-5 HRG2	10
	18/07/2006 (199)	SPOT-5 HRG1	10
	23/09/2006 (266)	SPOT-4 HRVIR2	20
2010	19/04/2010 (109)	SPOT-5 HRG2	5
	21/05/2010 (141)	SPOT-5 HRG1	10
	26/06/2010 (177)	SPOT-5 HRG1	5
	02/09/2010 (245)	LANDSAT TM	30
2011	21/03/2011 (80)	SPOT-4 HRVIR2	20
	22/04/2011 (112)	SPOT-4 HRVIR2	20
	23/05/2011 (143)	SPOT-4 HRVIR2	20
	10/08/2011 (222)	SPOT 4 HRVIR2	20
	15/10/2011 (288)	SPOT 4 HRVIR2	20

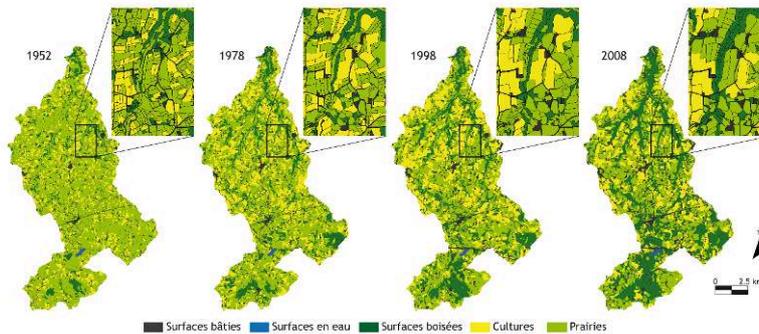
Résultats et discussion

La dynamique spatiotemporelle des prairies depuis les années 50

- 21 Le résultat cartographique de la photo-interprétation des photographies aériennes s'étalant des années 50 aux années 2000 est présenté dans la Figure 2. Selon la qualité des photographies, l'identification des types d'occupation des sols peut être plus ou moins difficile. De plus, certaines photographies ont été acquises à des périodes où les cultures peuvent se confondre avec les prairies selon leur stade de développement. Grâce à des enquêtes *in situ* et à la comparaison à des statistiques agricoles, on estime à 10-15 % le degré d'incertitude associé à la photo-interprétation.
- 22 Le croisement de ces quatre cartes d'occupation des sols, correspondant aux années 1950-2000, dans un Système d'information Géographique (SIG) a permis de mettre en évidence une évolution importante des couverts prairiaux sur le site d'étude. En effet, si les surfaces en prairie dominent toujours en 2008 sur le bassin-versant, leur surface a diminué de 40 % depuis 1950, ceci au profit des surfaces boisées et des cultures. Parallèlement à cette évolution, la superficie moyenne des parcelles de

prairies a augmenté de 40 %, ce qui s'est traduit par une baisse du nombre de parcelles de prairies. Cette étude a aussi permis de mettre en évidence les dynamiques spatiales des surfaces occupées par les prairies. En effet, 40 % des parcelles en prairie en 1952 sont toujours là en 2008 alors que 50 % des cultures de 2008 étaient en prairies en 1952 et 20 % des prairies de 2008 étaient des cultures en 1952.

Figure 2 : Occupation des sols sur le bassin-versant du Yar en 1952, 1978, 1998 et 2008 (Delaby et al., 2015)



Depuis les années 90

- 23 Le résultat cartographique de la classification automatique d'images satellites acquises entre 1997 et 2008 est présenté dans la Figure 3. Du fait qu'une seule image acquise au cours de la période estivale, en complément d'une image hivernale, ait été utilisée pour réaliser la classification annuelle de l'occupation des sols, de fortes confusions s'observent entre les cultures et les prairies. On estime à 40-50 % le degré d'incertitude associé à la classification annuelle automatique. Ainsi, une identification et une correction manuelle par requête et photo-interprétation des successions hautement improbables ou impossibles sur le plan agronomique en fonction de la dynamique de l'occupation des sols observée a été effectuée aboutissant à un degré d'incertitude autour de 10 %.
- 24 L'analyse de l'évolution de l'occupation des sols sur la période 1997-2008 montre une stabilité des prairies par rapport à la surface totale de la SAU. En outre, l'analyse de ces cartes a permis d'identifier la dynamique spatiale des prairies à travers un indicateur : le nombre maximal d'années successives (fréquence d'occurrence) au cours desquelles une parcelle a été en prairie *versus* en culture (Figure 4). Ainsi, l'analyse des fréquences d'occurrence montre que 30 % des parcelles du bassin-versant ont été en prairie sur toute la période étudiée tandis que 20 % d'entre elles ne l'ont jamais été ou l'on était une fois seulement. De plus, les prairies dont l'ancienneté est de 4 à 7 années consécutives sont les plus représentées (environ 40 %). Le classement des prairies prenant en compte leur âge met en évidence trois classes : 1. Les prairies de longue durée ayant toujours été en prairie sur la période d'étude ; 2. Les prairies dites permanentes qui ont été entre 5 et 10 années consécutives en prairie ; 3. Les prairies

temporaires ayant été moins de 5 années consécutives en prairie. Ce regroupement montre une prédominance des prairies permanentes ou de longue durée avec près de 30 % des parcelles toujours en prairie et 35 % recouvertes pendant 5 à 10 années consécutives, soit plus de 60 % de la surface totale en prairie. On observe aussi que la superficie moyenne des parcelles en prairie dites temporaires est supérieure (le double) à celle des prairies permanentes. Enfin, la spatialisation des prairies selon leur ancienneté révèle que les prairies temporaires sont principalement présentes dans la partie nord du site d'étude où elles sont intégrées dans les rotations culturales, alors que les prairies permanentes se situent là où les exploitations sont davantage destinées à l'élevage bovin.

Figure 3 : Cartes de l'occupation des sols sur le bassin-versant du Yar de 1997 à 2008

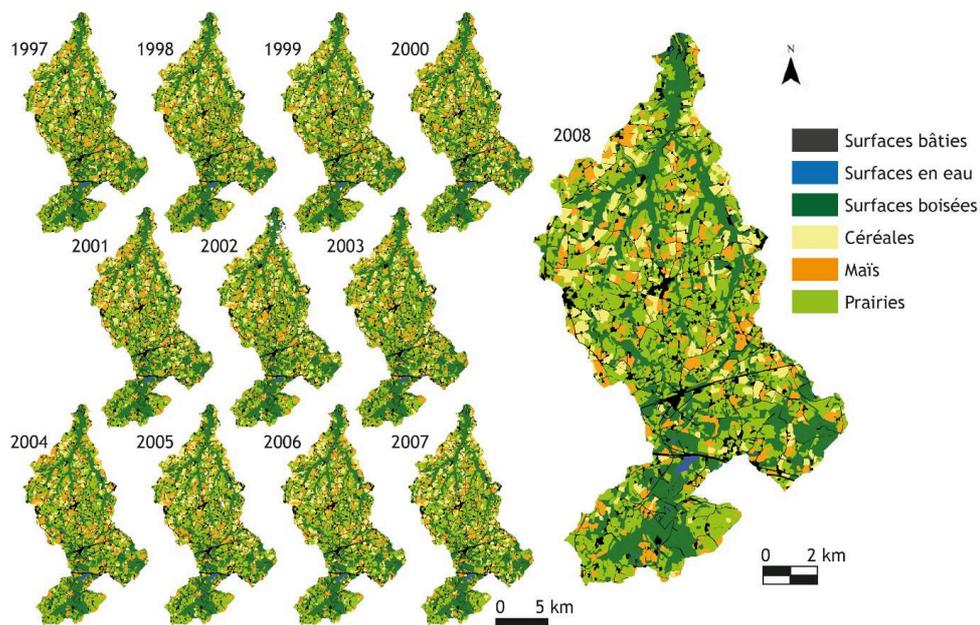
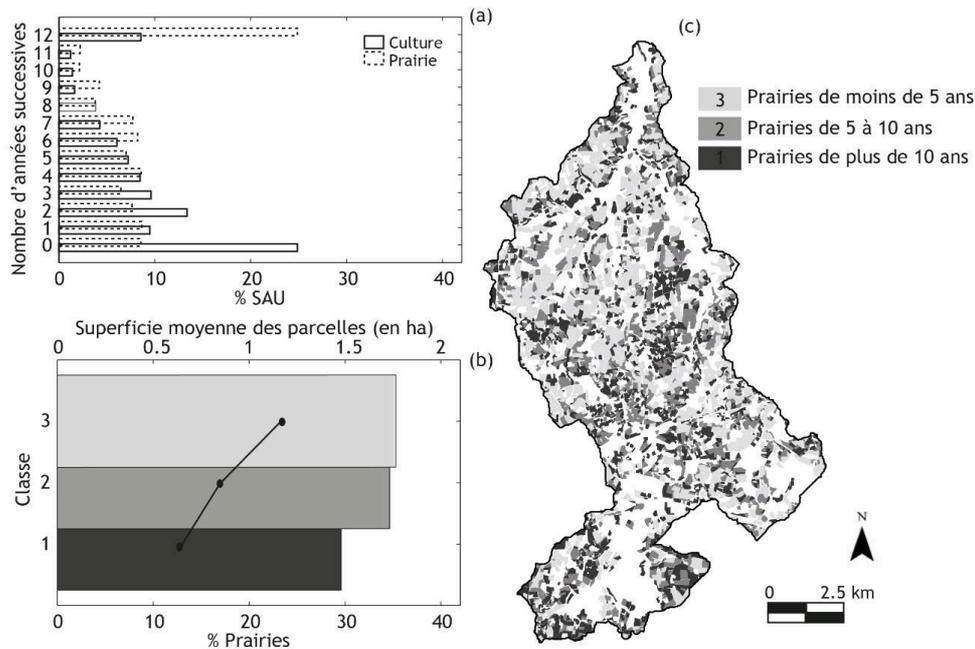


Figure 4 : Dynamiques spatiotemporelles des prairies à l'échelle du bassin-versant du Yar sur la période 1997-2008



(a). Nombre d'années successives en prairie et culture ; (b). Pourcentage de prairies selon leur ancienneté et superficie moyenne des parcelles (en ha) ; (c). Carte des prairies selon leur ancienneté

La multiplication des observations par satellite pour une étude plus précise des prairies

- 25 La plupart des études menées jusqu'à présent par télédétection sur les prairies utilisent une à deux images à haute résolution spatiale acquises au cours d'une même année comme présenté dans la section précédente. Le traitement de ces séries (classification automatique puis corrections par photo-interprétation) sur quelques années permet de déterminer l'évolution interannuelle des prairies en précisant leur ancienneté et leur place dans les successions culturales (Vannier, 2012 ; Guo, 2004 ; Benoit *et al.*, 1989). Cependant, les informations dérivées de ces images ne sont pas toujours assez précises pour discriminer correctement les prairies des autres couverts végétaux en raison du trop faible nombre d'image utilisé. En effet, d'importantes confusions peuvent être observées entre les prairies et certaines cultures comme les blés d'hiver ou le maïs qui produisent des réponses spectrales similaires aux prairies en fonction des dates d'acquisition des images et du stade de croissance des différents couverts végétaux (Doraiswamy *et al.*, 2007 ; Wessels *et al.*, 2004).
- 26 Les profils temporels de LAI, illustrés dans la figure 5, montrent l'intérêt de l'information temporelle apportée par les séries d'images pour l'identification précise des prairies. En effet, les confusions existant entre prairies et cultures à une date donnée diminuent quand on utilise plusieurs images enregistrées au cours de l'année. Par exemple, des confusions importantes s'observent entre les prairies et les céréales d'hiver au printemps (figure 5, année 2006, DOY 152) alors qu'en été (figure 5, année 2006, DOY 199) les valeurs de LAI diffèrent complètement.

27 La figure 6 illustre le fait que l'utilisation du nombre maximum d'images satellites disponibles (en l'occurrence 5 en 2006, 4 en 2010 et 5 en 2011) permet de différencier les prairies des cultures avec un taux de précision supérieur à 80 % dans deux cas sur trois par classification automatique sans correction par photo-interprétation. De plus, l'utilisation des cinq images disponibles en 2006 n'améliore pas les résultats de classification obtenus avec deux dates seulement (précision de 90 %). Aussi, les images de juin et septembre (DOY 152 et 266, respectivement), qui peuvent être considérées comme des dates-clés, sont suffisantes pour discriminer les prairies des cultures. En effet, l'image de juin correspond au stade de l'épiaison pour les prairies et les céréales d'hiver (fortes valeurs de LAI) alors qu'à cette même période le maïs est tout juste semé (faibles valeurs de LAI). Ainsi, les valeurs de LAI des prairies et des céréales d'hiver estimées à partir des données satellites peuvent être similaires, mais elles sont très différentes de celles du maïs. L'image de septembre correspond au stade de maturation du maïs (fortes valeurs de LAI) et à la fin de la récolte des céréales d'hiver (très faibles valeurs de LAI). L'état des prairies dépend des modes de gestion pratiqués sur les parcelles mais les valeurs de LAI estimées à partir des images sont supérieures à celles des parcelles de céréales d'hiver et généralement inférieures aux valeurs estimées sur les parcelles de maïs. La combinaison de ces deux dates permet donc de discriminer les prairies des cultures. Cependant, il n'est pas toujours possible d'obtenir dans l'Ouest de la France des images exploitables correspondant aux dates-clés d'identification des classes d'occupation des sols considérées en raison d'une importante et fréquente couverture nuageuse, il faut alors multiplier le nombre d'acquisition pour obtenir une bonne précision de classification comme illustré par les résultats de classification des années 2010 et 2011. Ainsi, l'utilisation aujourd'hui de séries temporelles intra-annuelles d'images satellites acquises par des capteurs comme Sentinel-2, avec une forte capacité de revisite et une haute résolution spatiale, permet d'acquérir un nombre plus important d'images sur une même zone et donc d'améliorer l'identification et la caractérisation des prairies. Inversement, dans certaines régions, le nombre d'images satellites optiques disponibles restera toujours limité pendant la saison végétative en raison d'une importante et fréquente couverture nuageuse (par exemple, cela s'observe aujourd'hui avec les données Sentinel-2, malgré la résolution temporelle de ce capteur). Ainsi, les données radars, insensibles aux conditions climatiques, peuvent être utilisées en complément des données optiques pour identifier les prairies (Hill *et al.*, 2005 ; McNairn *et al.*, 2002). Certains paramètres dérivés des images radars sont bien corrélés à l'état de la végétation et peuvent être utiles pour caractériser la rugosité de surface (Inoue *et al.*, 2014 ; Smith, Buckley 2011). Comme les céréales d'hiver et le maïs sont caractérisés par des structures et des hauteurs de végétation différentes de celles des prairies, il pourrait être pertinent de les différencier en utilisant des données radars en complément des données optiques. Les premiers travaux effectués en utilisant la complémentarité des données optiques et radar pour l'identification des prairies révèlent des résultats très encourageants (Dusseux *et al.*, 2014c).

Figure 5 : Profils temporels de LAI des céréales d'hiver, maïs et prairies pour les trois années considérées

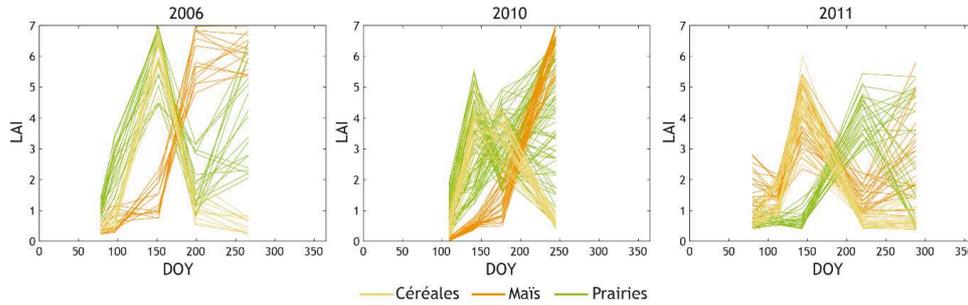
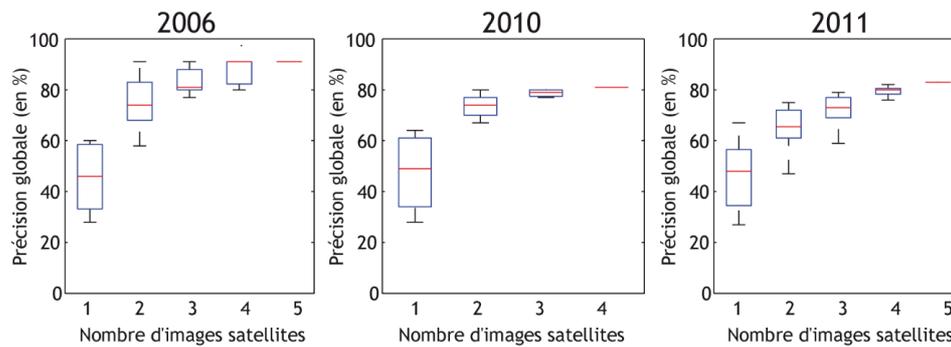


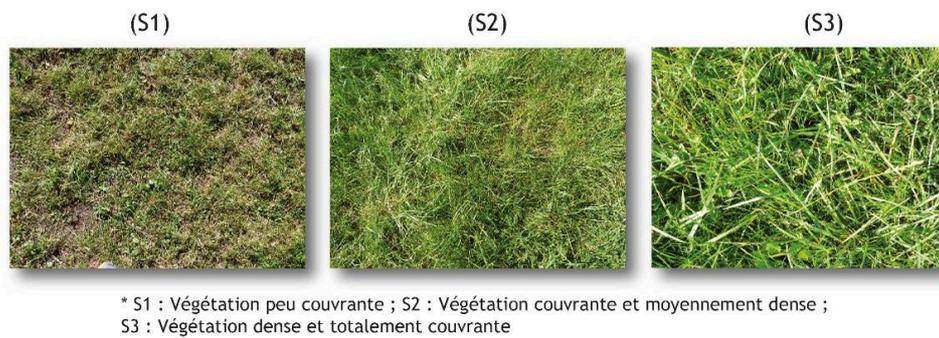
Figure 6 : Précision globale (en %) obtenues en utilisant différentes combinaisons d'images satellites pour les trois séries considérées



La caractérisation des prairies : productivité et modes de gestion

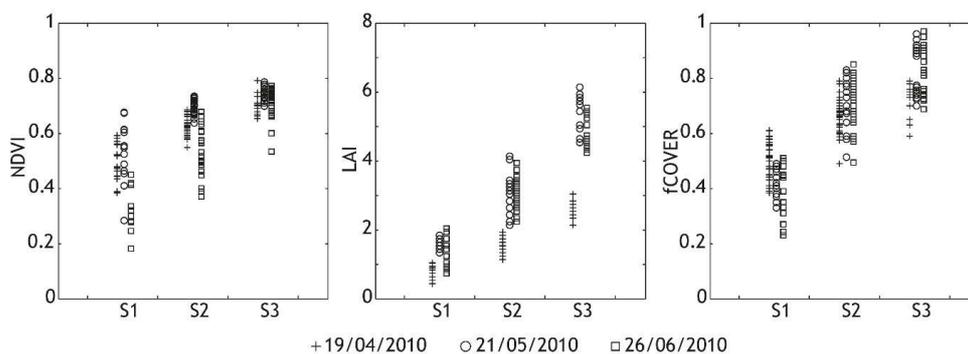
- 28 L'état de surface des couverts végétaux dépend des modes de gestion mis en place, des types de végétaux considérés et de leur développement phénologique. Ainsi, la hauteur, la densité et le taux de couverture de la végétation varient en fonction des saisons, des besoins de l'exploitant et du climat. Afin de comparer les paramètres dérivés des données de télédétection (NDVI, LAI et fCOVER), trois états de surface des couverts végétaux ont été identifiés correspondant : pour l'état 1 (S1) à une végétation peu couvrante (sol apparent) ; pour l'état 2 (S2) à une végétation couvrante et moyennement dense ; pour l'état 3 (S3) à une végétation dense et totalement couvrante (Figure 7). Ainsi, plus la densité est importante et la végétation couvrante, plus les valeurs des paramètres issus des données de télédétection seront élevées (Dusseux *et al.*, 2014a).

Figure 7 : Classification des prairies selon trois états de surface (S1, S2, S3)



- 29 La comparaison des paramètres dérivés des données de télédétection (exemple avec trois images acquises pendant l'année 2010) montre que le LAI est le paramètre le plus pertinent pour décrire l'état de surface de la végétation des prairies (Figure 8). En effet, le NDVI présente une relation non linéaire avec l'état de la végétation. Ainsi, pour des taux de couverture végétale dense, le NDVI est peu sensible, voire non sensible aux changements liés à la végétation (valeurs de l'état S3 similaires aux valeurs de l'état S2). Le fCOVER, lui, a tendance à surestimer la densité de la végétation car il exprime la couverture végétale au sol : une végétation couvrante mais peu dense présente alors des valeurs élevées (valeurs de l'état S2 similaires aux valeurs de l'état S3). Ainsi, des états de surface différents peuvent fournir des valeurs de NDVI ou de fCOVER similaires et alors limiter la caractérisation des prairies (Dusseux *et al.*, 2014a). En conséquence, le LAI, qui permet de mettre en évidence différentes classes d'état de surface des couverts végétaux, est le paramètre qui a été retenu pour spécifier les prairies dans cette étude. De plus, les valeurs de LAI estimées en intégrant des images satellites dans le modèle de transfert radiatif PROSAIL ont été comparées à des mesures de LAI effectuées à partir de photographies hémisphériques prises *in situ*. Les résultats, exposés par Dusseux *et al.* (2014a), permettent de justifier l'utilisation du modèle PROSAIL pour estimer le LAI sur les prairies (corrélation à 0.9 entre le LAI estimé des images satellites et le LAI estimé à partir de mesures *in situ*). Ces résultats confirment l'intérêt de PROSAIL pour évaluer les valeurs de LAI sur des couverts prairiaux (Darvishzadeh *et al.*, 2011 ; Si *et al.*, 2012 ; Quan *et al.*, 2017).

Figure 8 : NDVI, LAI et fCOVER dérivés des images satellites et présentés par classe d'état de surface et par mois d'acquisition



- 30 Il a aussi été montré par Dusseux *et al.* (2015a) que le LAI, dérivé d'images satellites, permet d'estimer la biomasse des prairies avec une précision supérieure à 75 %. À titre

d'exemple d'application, il est alors possible d'en dériver un indicateur de quantité d'herbe disponible dans les parcelles afin de proposer une aide à la gestion des prairies pour optimiser leur rentabilité pour l'alimentation du bétail et la constitution des stocks de fourrage. Punalekar *et al.* (2018) ont aussi observé une relation très significative entre le LAI obtenu à partir d'images Sentinel-2 et l'application du modèle de transfert radiatif PROSAIL et les biomasses mesurées *in situ* sur des prairies.

- 31 Par ailleurs, l'utilisation des séries temporelles de LAI permet d'identifier des modes de gestion mis en place sur les parcelles de prairies avec une précision de 70 à 80 % selon les séries d'images considérées (Tableau 2).

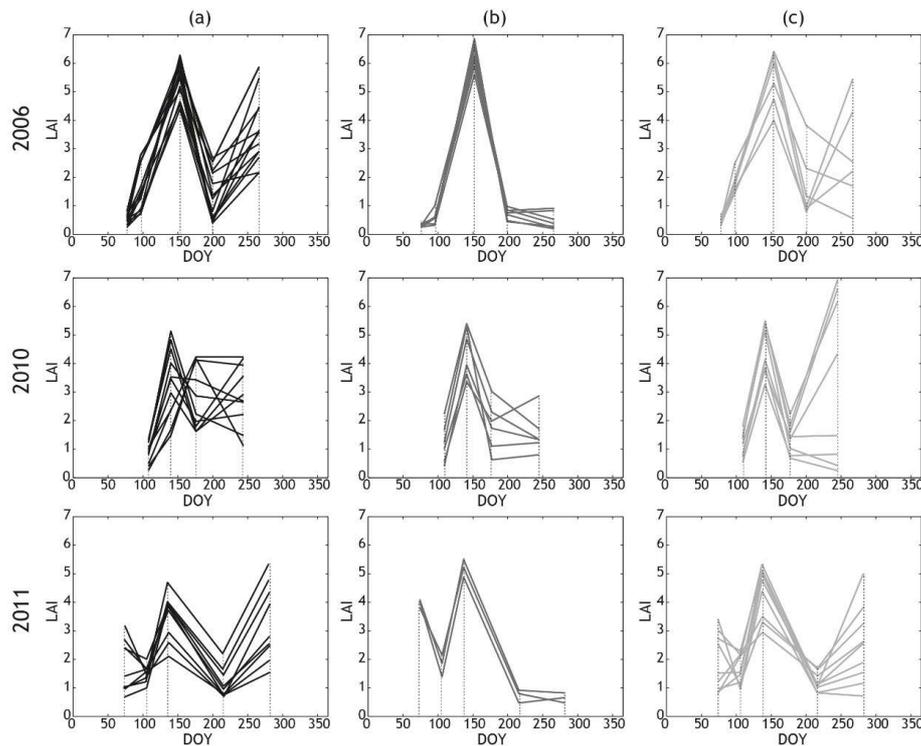
Tableau 2 : Performance de la classification des modes de gestion des prairies obtenue avec trois séries annuelles d'images satellites

Années considérées	Indice Kappa
2006	0.86
2010	0.73
2011	0.70

- 32 En effet, en fonction des dates d'acquisition des images, l'identification des modes de gestion est plus ou moins précise (Figure 9). Aussi, il convient de souligner que selon la série, les écarts entre les dates d'acquisition peuvent être conséquents, par exemple pour l'année 2010 aucune image n'a pu être acquise entre le 26 juin (DOY : 177) et le 02 septembre (DOY : 245). Ainsi, des informations sur la croissance de la végétation et les pratiques agricoles sont manquantes, notamment pour la pratique de la fauche (absence d'informations sur une éventuelle seconde croissance de la végétation à la période estivale et donc une seconde fauche). On peut tout de même distinguer, d'après les profils temporels de LAI, les parcelles exclusivement pâturées (profils (a), figure 9) des parcelles exclusivement fauchées (profils (b), figure 9) alors que la pratique mixte (profils (c), figure 9) est plus complexe à discriminer du fait de profils présentant une forte variance intraclasse due à la diversité des pratiques.
- 33 Ainsi, l'identification des modes de gestion des prairies est envisageable à une échelle territoriale en utilisant des séries temporelles d'images satellites à haute résolution spatiale. L'intérêt des séries temporelles d'images par rapport aux images monodates pour la cartographie des prairies et de leurs modes de gestion a largement été démontré (Hunt *et al.*, 2003 ; Schuster *et al.*, 2011 ; Vanden Borre *et al.*, 2011 ; Franke *et al.*, 2012 ; Punalekar *et al.*, 2018). La fréquence d'acquisition et la résolution spatiale des données de type Sentinel-2 permettent d'obtenir des séries temporelles d'images qui illustrent la phénologie saisonnière de la végétation ce qui facilite l'identification des pratiques mises en place sur les parcelles. Ces informations peuvent ensuite être

utilisées pour des applications sur l'intensification de l'usage des terres, la caractérisation des habitats écologiques, ou le suivi des changements d'usage des sols. La méthodologie exposée ici permet de produire des documents supports pouvant informer les gestionnaires de l'environnement sur l'état des terres et les aider à les surveiller, notamment dans le contexte de programmes de restauration ou de conservation des habitats (Vanden Borre *et al.*, 2011 ; Pettorelli *et al.*, 2016 ; Alleaume *et al.*, 2018).

Figure 9 : Exemple de profils temporels de LAI pour les trois modes de gestion des prairies



Modes de gestion des prairies pour 2006, 2010 et 2011 : (a) pâturage ; (b) fauche ; (c) exploitation mixte

Perspectives : intégration des informations dérivées des séries temporelles d'images à haute résolution spatiale dans des modèles

- 34 Des informations sur l'organisation spatiale des prairies de l'échelle de l'exploitation à l'échelle régionale peuvent être dérivées des cartes d'occupation des sols réalisées à l'échelle parcellaire à partir des données de télédétection telles que le total des surfaces en prairies, le nombre de parcelles en prairie, le pourcentage de surfaces en prairies situées en zone humide, la distance de chaque parcelle de prairie au siège d'exploitation. Toutefois, les variables estimées à partir des données de télédétection telles que le LAI ou le taux de couverture du sol par la végétation, les métriques dérivées de ces variables comme le maximum de croissance de la végétation ou encore les classifications des pratiques effectuées sur les prairies, peuvent aussi être utilisées pour calibrer ou valider des modèles ou également constituer une composante du modèle lui-même.

- 35 Les modèles en question, très divers, peuvent être regroupés en trois types différents :
1. Les modèles de croissance des plantes ou agro-climatiques ; 2. Les modèles de reconnaissance des successions culturales ; 3. Les modèles de gestion de pratiques agricoles. La nature de l'information utilisée, issue des données de télédétection, varie selon le type de modèle considéré.
- 36 Les informations dérivées des images satellites servent à configurer des modèles simulant le fonctionnement et la croissance des plantes, tels que STICS (Brisson *et al.*, 2003) ou GreenLab (Cournède *et al.*, 2005). Le premier a pour objectif de simuler à un pas de temps journalier les conséquences des variations du milieu (climat, sol) et du système de culture (pratiques culturales) sur la production d'une parcelle agricole et sur l'environnement (Di Bella *et al.*, 2005). Les pratiques effectuées sur les prairies et leurs fréquences sont des informations dérivées des données de télédétection qui peuvent être directement intégrées dans ce modèle. Le second, qui est un modèle dynamique de la croissance et de l'architecture végétale, a pour objectif de prédire et d'optimiser la croissance des plantes. Les variables biophysiques décrivant l'état et le fonctionnement de la végétation comme le LAI ou le fCOVER, qui sont directement dérivées des données de télédétection, peuvent servir dans ce modèle pour calibrer la fonction de croissance des plantes ou dans d'autres modèles de type agroclimatique pour l'estimation de la productivité des cultures (Betbeder *et al.*, 2016 ; Battude *et al.*, 2016 ; Muslim *et al.*, 2015).
- 37 Les études historiques d'occupation des sols effectuées avec des séries temporelles interannuelles d'images satellites permettent de déterminer les successions culturales à l'échelle parcellaire sur plusieurs décennies, généralement à l'échelle d'un bassin-versant. Ces informations peuvent alimenter des modèles temporels d'analyse de successions culturales basés par exemple sur des chaînes de Markov ou des automates temporisés (Largouët *et al.*, 2007), ces modèles visant à modéliser un système agricole donné et, le cas échéant, à produire des scénarios d'évolution des systèmes agricoles. Par exemple, le modèle CarottAge a pour objectif d'identifier des patrons de rotations culturales à l'échelle d'un territoire (Le Ber *et al.*, 2006). Les automates temporisés, quant à eux, servent à modéliser un système en temps réel selon des comportements types en intégrant un certain nombre de contraintes. Ils permettent par exemple de représenter une parcelle agricole comme un système dynamique et de modéliser son évolution selon les successions culturales. Les rotations culturales observées par télédétection permettent alors de calibrer ou de valider ces deux types de modèles. Par ailleurs, la dimension spatiale des informations sur les successions culturales issues de données de télédétection peut aussi être exploitée dans des modèles comme ArpentAge (Lazrak, 2012) ou CASIMOD'N (Moreau *et al.*, 2012) qui ont pour objectif de modéliser les systèmes agricoles en prenant en compte les successions spatiotemporelles de l'occupation des sols. Ainsi, les cartes des successions culturales sont utilisées comme une composante du modèle ou comme une donnée de calibration des modèles ou de validation de leurs sorties. Ainsi, Mari *et al.*, (2013) ont exploité la base de données historiques décrite ici pour modéliser les successions culturales à l'échelle d'un bassin-versant.
- 38 Les modèles de gestion des pratiques agricoles, tels que Patur'IN (Delaby *et al.*, 2001) ou PaturMata (Zhao, 2012) simulent la croissance de l'herbe selon différentes configurations, afin d'optimiser la gestion des prairies à l'échelle de l'exploitation agricole. Les informations issues des données de télédétection, telles que des métriques

liées à la croissance de l'herbe, le type de pratiques effectuées sur la parcelle et la fréquence de ces pratiques peuvent permettre de calibrer et/ou valider ces modèles.

Conclusion

- 39 Les travaux que nous avons effectués sur le Yar ont montré que l'utilisation de séries temporelles de données de télédétection HRS permet d'identifier et de caractériser avec un niveau de précision élevé les prairies à l'échelle parcellaire sur l'ensemble d'un bassin-versant. En effet, d'une part, les prairies ont été différenciées des cultures et, d'autre part, des modes de gestion des prairies ont été identifiés. Afin d'obtenir une spatialisation dynamique des prairies et de leur mode de gestion par télédétection, nous avons constitué des séries temporelles de 4 ou 5 images par an à partir d'images acquises par des capteurs différents. La disponibilité de nouvelles séries temporelles d'images enregistrées à partir d'un seul capteur à haute résolution spatiale et avec une très forte capacité de revisite comme Sentinel-2 permet à présent d'envisager une amélioration de la caractérisation des prairies.
- 40 Les informations dérivées des séries d'images de télédétection telles que des variables biophysiques, des métriques temporelles obtenues à partir de ces dernières ou les cartes des successions culturales peuvent être utilisées dans des modèles agro-climatiques, de croissance des plantes, des modèles de reconnaissance des patrons de successions culturales ou encore des modèles de gestion de pratiques agricoles. Elles sont soit directement intégrées dans ces modèles comme variables d'entrée, ou utilisées pour calibrer et/ou valider ces modèles. Les informations dérivées des données de télédétection que nous avons traitées sur le bassin-versant du Yar ont d'ores et déjà été exploitées dans les modèles ArpentAge (Lazrak, 2012 ; Mari *et al.*, 2013), CASIMOD'N (Moreau *et al.*, 2012) et PaturMata (Dusseux *et al.*, 2015b). Plus généralement, les informations que nous dérivons sur les prairies ainsi que sur le reste du territoire peuvent être introduites dans des modèles de prédiction des changements d'occupation et d'utilisation des sols en relation avec le changement climatique (Houet *et al.*, 2009) ou dans des modèles physiques de fonctionnement des surfaces, mettant en œuvre des processus tels que le stockage de carbone, ou le ruissellement.

BIBLIOGRAPHIE

Alleaume S., Dusseux P., Thierion V., Commagnac L., Laventure S., Lang M., Feret J.-B., Hubert-Moy L., Luque S., 2018, "A generic remote sensing approach to derive operational essential biodiversity variables (EBVs) for conservation planning", *Methods in Ecology and Evolution*, Vol.9, 1822-1836.

Battude M., 2016, "Estimating maize biomass and yield over large areas using high spatial and temporal resolution Sentinel-2 like remote sensing data", *Remote Sensing of Environment*, Vol.184, 668-681.

- Bartholomé E., Belward A.S., 2005, "GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data", *International Journal of Remote Sensing*, Vol.26, No.9, 1959-1977.
- Benoit M., Girard M.C., De Vaubernier E., 1989, "Utilisation de la télédétection pour reconnaître et cartographier les types de prairies permanentes", In *16e Congrès International des Herbages*, Nice, France, 1385-1386.
- Betbeder J., Fieuzal R., Baup F., 2016, "Assimilation of LAI and Dry Biomass Data From Optical and SAR Images Into an Agro-Meteorological Model to Estimate Soybean Yield", *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing*, Vol.9, No.6, 2540-2553.
- Blaes X., Vanhalle L., Defourny P., 2005, "Efficiency of crop identification based on optical and SAR image time serie", *Remote Sensing of Environment*, Vol.96, Issues 3-4, 352-365.
- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussièrre F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillere J.P., Hénault C., Maraux F., Seguin B., Sinoquet H., 2003, "An overview of the crop model STICS", *European journal of agronomy*, Vol.18, No.3-4, 309-332.
- Carrère P., 2012, "Concilier les services rendus par les prairies pour assurer la durabilité des systèmes d'élevage herbagers", *Fourrages*, Vol.211, 213-218.
- Cournède, P.H., De Reffye, P., 2005, "GreenLab: A Dynamical Model of Plant Growth for Environmental Applications", *ERCIM News*, No.61, 41-42.
- Cohen, J., 1960, "A coefficient of agreement for nominal scales", *Educational and Psychological Measurement*, Vol.20, No.1, 37-46.
- Darvishzadeh R., Atzberger C., Skidmore A., Schlerf M., 2011, "Mapping grassland leaf area index with airborne hyperspectral imagery: A comparison study of statistical approaches and inversion of radiative transfer models", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.66, No.6, 894-906.
- Delaby, L., Peyraud J.L., Faverdin P., 2001, "Pâtur'IN : le pâturage des vaches laitières assisté par ordinateur", *Fourrages*, No.167, 385-398.
- Delaby L., Vertès F., Ruiz L., Devienne S., Corgne S., Hubert-Moy L., Dusseux P., Nabucet J., 2015, "Des scénarios co-construits pour une transition agroécologique", in *Comment réconcilier agriculture et littoral ? Vers une agroécologie des territoires*, Gascuel C., Ruiz L., Vertes F. (coord.), Ed. Quae, 49-74.
- Di Bella C., Faivre R., Ruget F., Seguin B., 2005, "Using VEGETATION satellite data and the crop model STICS-Prairie to estimate pasture production at the national level in France", *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol.30, No.1-3, 3-9.
- Doraiswamy P.C., Stern A.J., Akhmedov B., 2007, "Crop classification in the U.S. Corn Belt using MODIS imagery", In *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'07*, 809-812.
- Dusseux P., Vertès F., Corpetti T., Corgne S., Hubert-Moy L. 2014a, "Agricultural practices in grasslands detected by spatial remote sensing", *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol.186, No.12, 8249-8265.
- Dusseux P., Gong X., Hubert-Moy L., Corpetti T., 2014b, "Identification of grassland management practices from leaf are index time series", *Journal of Applied Remote Sensing*, Vol.8, No.1, 083559.
- Dusseux P., Corpetti T., Hubert-Moy L., Corgne S., 2014c, "Combined use of multi-temporal optical and radar satellite images for grassland monitoring", *Remote Sensing*, Vol.6, No.7, 6163-6182.

- Dusseux P., Hubert-Moy L., Corpetti T., Vertès F., 2015a, "Evaluation of SPOT imagery for the estimation of grassland biomass", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol.38, 72-77.
- Dusseux P., Zhao Y., Cordier M.-O., Corpetti T., Delaby L., Gascuel-Oudoux C., Hubert-Moy L., 2015b, "PaturMata, a model to manage grassland under climate change", *Agronomie for Sustainable Development*, Vol.35, No.3, 1087-1093.
- European Communities, 2008, "LIFE and Europe's grasslands. Restoring a forgotten habitat", *LIFE focus*, 54 p.
- Eurostat, 2016, *Agricultural statistics at regional level*, URL : <https://ec.europa.eu/eurostat/fr/web/conferences/conf-2016>.
- Foerster S., Kaden K., Foerster M., Itzerott S., 2012, "Crop type mapping using spectral-temporal profiles and phenological information", *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.89, 30-40.
- Franke J., Keuck V., Siegert F., 2012, "Assessment of grassland use intensity by remote sensing to support conservation schemes", *Journal for Nature Conservation*, Vol.20, No.3, 125-134.
- García-Feced C., Weissteiner C.J., Baraldi A., Paracchini M.L., Maes J., Zulian G., Kempen M., Elbersen B., Pérez-Soba M., 2014, "Semi-natural vegetation in agricultural land : European map and links to ecosystem service supply", *Agronomy for Sustainable Development*, 1-11.
- Guo X., 2004, "Measuring Spatial and Vertical Heterogeneity of Grasslands Using Remote Sensing Techniques", *Journal of Environmental Informatics*, Vol.3, No.1, 24-32.
- Hill M.J., Ticehurst C.J., Lee J.S., Grunes M.R., Donald G.E., Henry D., 2005, "Integration of optical and radar classifications for mapping pasture type in Western Australia", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.43, No.7, 1665-1681.
- Hill M. J., 2013, "Vegetation index suites as indicators of vegetation state in grassland and savanna: An analysis with simulated SENTINEL 2 data for a North American transect", *Remote Sensing of Environment*, Vol.137, 94-111.
- Houet T., Loveland T.R., Hubert-Moy L., Gaucherel C., Napton D., Barnes C.A., Sayler K. L., 2009, "Exploring subtle land use and land cover changes: a framework for future landscape studies", *Landscape Ecology*, Vol.25, No.2, 249-266.
- Hunt E.R., Everitt J.H., Ritchie J.C., Moran M.S., Booth D.T., Anderson G.L., Clark P.E., Seyfried M.S., 2003, "Applications and Research Using Remote Sensing for Rangeland Management", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol.69, No.6, 675-693.
- Huyghe C., De Vlieghe A., Van Gils B., Peeters A., 2014, "Grasslands and herbivore production in Europe and effects of common policies", *QUAE editions*, 323 p.
- Inoue Y., Sakaiya E., Wang C., 2014, "Capability of C-band backscattering coefficients from high-resolution satellite SAR sensors to assess biophysical variables in paddy rice", *Remote Sensing of Environment*, Vol.140, 257-266.
- Jacquemoud S., Verhoef W., Baret F., Zarco-Tejada P., Asner G.P., François C., Ustin S.L., 2009, "PROSPECT+SAIL models: A review of use for vegetation characterization", *Remote Sensing of Environment*, Vol.113, S56-S66.
- Largouët C., Cordier M.-O., 2007, "Reconnaissance de l'occupation du sol à l'aide d'un automate temporisé, Raisonnements sur l'espace et le temps : des modèles aux applications", *Traité IGAT, série Géomatique*, Lavoisier, Paris.

- Lazrak E.G., 2012, *Fouille de données stochastique pour la compréhension des dynamiques temporelles et spatiales des territoires agricoles. Contribution à une agronomie numérique des territoires*, Thèse en Sciences agronomiques, Université de Lorraine, 214 p.
- Le Ber F., Benoit M., Schott, C., Mari J.-F., Mignolet C., 2006, "Studying Crop Sequences with CarrotAge, a HMM-Based Data Mining Software", *Ecological Modelling*, Vol.191, No.1, 170-185.
- Lecerf R., 2008, *Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution (Application à la Bretagne)*, Thèse de Géographie, Université de Rennes 2, 325 p.
- Lobell D.B., Field C.B., 2007, "Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming", *Environmental Research Letters*, Vol.2, No.1, 7 p.
- Marais Sicre C., Inglada J., Fieuzal R., Baup F., Valero S., Cros J., Huc M., Demarez V., 2016, "Early Detection of Summer Crops Using High Spatial Resolution Optical Image Time Series", *Remote Sensing*, Vol.8, No.7, 591.
- Marie J.-F., Lazrak E.G., Benoit M., 2013, "Time space stochastic modelling of agricultural landscapes for environmental issues", *Environmental Modelling and Software*, Vol.46, 219-227.
- McNairn H., Ellis J., Van Der Sanden J.J., Hirose T., Brown R.J., 2002, "Providing crop information using RADARSAT-1 and satellite optical imagery", *International Journal of Remote Sensing*, Vol.23, No.5, 851-870.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005, *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*, Island Press, Washington, DC.
- Mehner H., Cutler M., Fairbairn D., Thompson G., 2004, "Remote sensing of upland vegetation : the potential of high spatial resolution satellite sensors", *Global Ecology and Biogeography*, Vol.13, No.4, 359-369.
- Moreau P., Ruiz L., Mabon F., Raimbault T., Durand P., Delaby L., Devienne S., Vertès F., 2012, "Reconciling technical, economic and environmental efficiency of farming systems in vulnerable areas", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Vol.147, 89-99.
- Mountrakis G., Im J., Ogole C., 2011, "Support vector machines in remote sensing: A review", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.66, No.3, 247-259.
- Muslim M., Romshoo S.A., Rather A.Q., 2015, "Paddy crop yield estimation in Kashmir Himalayan rice bowl using remote sensing and simulation model", *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol.187, No.6, 1-12.
- Pettorelli N., Owen H.J.F., Duncan C., 2016, "How do we want satellite remote sensing to support biodiversity conservation globally ?", *Methods in Ecology and Evolution*, Vol.7, 656-665.
- Quan X., He B., Yebra M., Yin C., Liao Z., Zhang X., Li X., 2017, "A radiative transfer model-based method for the estimation of grassland aboveground biomass", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol.54, 159-168.
- Richter K., Hank T.B., Vuolo F., Mauser W., D'Urso G., 2012, "Optimal Exploitation of the Sentinel-2 Spectral Capabilities for Crop Leaf Area Index Mapping", *Remote Sensing*, Vol.4, No.3, 561-582.
- Rouse J., Haas R., Schell J., Deering D., Harlan J., 1974, "Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation", *NASA/GSFC, Type III, Final report*, Greenbelt, MD, Etats-Unis, 371p.

- Schuster C., Ali I., Lohmann P., Frick A., Förster M., Kleinschmit B., 2011, "Towards Detecting Swath Events in TerraSAR-X Time Series to Establish NATURA 2000 Grassland Habitat Swath Management as Monitoring Parameter", *Remote Sensing*, Vol.3, No.12, 1308-1322.
- Si Y., Schlerf M., Zurita-Milla R., Skidmore A., Wang T., 2012, "Mapping spatio-temporal variation of grassland quantity and quality using MERIS data and the PROSAIL model", *Remote Sensing of Environment*, Vol.121, 415-425.
- Smith M., Buckley J.R., 2011, "Investigating RADARSAT-2 as a tool for monitoring grassland in western Canada", *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol.37, No.1, 93-102.
- Soussana J.-F., Lüscher A., 2007, "Temperate grasslands and global atmospheric change: a review", *Grass and Forage Science*, Vol.62, No.2, 127-134.
- Sullivan C. A., Skeffington M. S., Gormally M. J., Finn J. A., 2010, "The ecological status of grasslands on lowland farmlands in western Ireland and implications for grassland classification and nature value assessment", *Biological Conservation*, Vol.143, No.6, 1529-1539.
- Thorp K.R., Tian L.F., 2004, "A Review on Remote Sensing of Weeds in Agriculture. Precision Agriculture", October 2004, Vol.5, Issue 5, 477-508.
- Vanden Borre J., Paelinckx D., Mûcher C.A., Kooistra L., Haest B., De Blust G., Schmidt A.M., 2011, "Integrating remote sensing in Natura 2000 habitat monitoring: Prospects on the way forward", *Journal for Nature Conservation*, Vol.19, Issue 2, 116-125.
- Vannier C., 2012, "Analyse spatiale de structures paysagères en contexte agricole bocager", *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 607, mis en ligne le 17 mai 2012, URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/25354>.
- Vertès F., Benoit M., Dorioz J.M., 2010, "Couverts herbacés pérennes et enjeux environnementaux (en particulier eutrophisation) : atouts et limites", *Fourrages*, Vol.202, 83-94.
- Vigneau-Loustau L., Huyghe C., 2008, *Stratégie fourragères*, France Agricole Editions, 336 p.
- Waldner F., Lambert M.-J., Li W., Weiss M., Demarez V., Morin D., Marais-Sicre C., Hagolle O., Baret F., Defourny P., 2015, "Land Cover and Crop Type Classification along the Season Based on Biophysical Variables Retrieved from Multi-Sensor High-Resolution Time Series", *Remote Sensing*, Vol.7, 10400-10424.
- Wessels K.J., De Fries R.S., Dempewolf J., Anderson L.O., Hansen A.J., Powell S.L., Moran E.F., 2004, "Mapping regional land cover with MODIS data for biological conservation : Examples from the Greater Yellowstone Ecosystem, USA and Pará State, Brazil", *Remote Sensing of Environment*, Vol. 92, No.1, 67-83.
- Xie Y., Sha Z., Yu M., 2008, "Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review", *Journal of Plant Ecology*, Vol.1, No.1, 9-23.
- Zhao Y., 2014, *Modélisation qualitative des agro-écosystèmes et aide à leur gestion par utilisation d'outils de model-checking*, Thèse de doctorat en Informatique, Université de Rennes 1, 146 p.

ANNEXES

Liste des sigles

ACASSYA : ACcompagner l'évolution Agro-écologique deS SYstèmes d'élevAge dans les bassins versants côtiers

ANR : Agence Nationale de la Recherche

DOY : Day Of Year – Jour de l'année

fCOVER : fraction of Vegetation Cover – fraction de couverture végétale verte

LAI : Leaf Area Index – Indice de surface foliaire

LETG : Littoral, Environnement, Télédétection et Géomatique

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index – Indice de végétation normalisé

SAU : Surface Agricole Utile

SCEES : Service Central des Études et Enquêtes Statistiques du ministère de l'Agriculture

SIG : Système d'information Géographique

STH : Surfaces Toujours en Herbe

RÉSUMÉS

La diminution du nombre de prairies, que l'on observe à l'échelle mondiale depuis plusieurs décennies, s'est accompagnée de l'évolution de leur mode de gestion dans un contexte d'intensification de l'usage des terres. Face aux enjeux que ces changements impliquent, tant sur le plan environnemental qu'économique, il est nécessaire d'identifier et de caractériser les dynamiques spatiotemporelles des prairies, afin notamment d'évaluer les impacts du changement climatique sur ces dernières et leur capacité à s'y adapter. La télédétection, qui est un outil d'observation couramment utilisé pour étudier la surface terrestre, permet de répondre aux problématiques de gestion des territoires. Cet article présente un exemple de l'utilisation de séries temporelles d'images à haute résolution spatiale pour d'une part étudier la dynamique spatiotemporelle des prairies depuis les années 50, et d'autre part les caractériser en déterminant leur mode de gestion et leur productivité. Les informations dérivées de ces séries d'images peuvent être intégrées dans des modèles agro-climatiques afin de pouvoir simuler le fonctionnement des agro-écosystèmes pour évaluer leur évolution face aux changements climatiques *in fine* et proposer des scénarios d'adaptation à ces changements.

The decrease of grasslands, which has been observed on a global scale for several decades, occurred with changes in their management in the context of land use intensification. Faced with the environmental and economic implications of these changes, it is necessary to identify and characterize the spatial and temporal dynamics of grasslands, in particular to assess the impacts of climate change on these grasslands and their capacity to adapt. Remote sensing, which is an observation tool commonly used to study the Earth's surface, makes it possible to address territorial management issues. This article presents an example of the use of time series of high spatial resolution images to study the spatial and temporal dynamics of grasslands since the 1950s and to characterize them by determining their management and their productivity. Information derived from these images series can be integrated into agro-climatic models in

order to simulate the agro-ecosystems functioning to evaluate their evolution regarding climate change and to propose adaptation scenarios.

INDEX

geographyun 908, 926, 250

Keywords : agriculture, environment, land cover, land use, satellite imagery, high resolution images

Mots-clés : agriculture, environnement, occupation et utilisation du sol, image satellite, images très haute résolution

AUTEURS

PAULINE DUSSEUX

Maître de Conférences, Université Grenoble Alpes, UMR 5194 CNRS PACTE, Grenoble, France.
pauline.dusseux@univ-grenoble-alpes.fr

THOMAS CORPETTI

Directeur de Recherche CNRS, Université Rennes 2, UMR 6554 CNRS LETG, Rennes, France.
thomas.corpetti@univ-rennes2.fr

LAURENCE HUBERT-MOY

Professeur des universités, Université Rennes 2, UMR 6554 CNRS LETG, Rennes, France.
laurence.hubert@univ-rennes2.fr