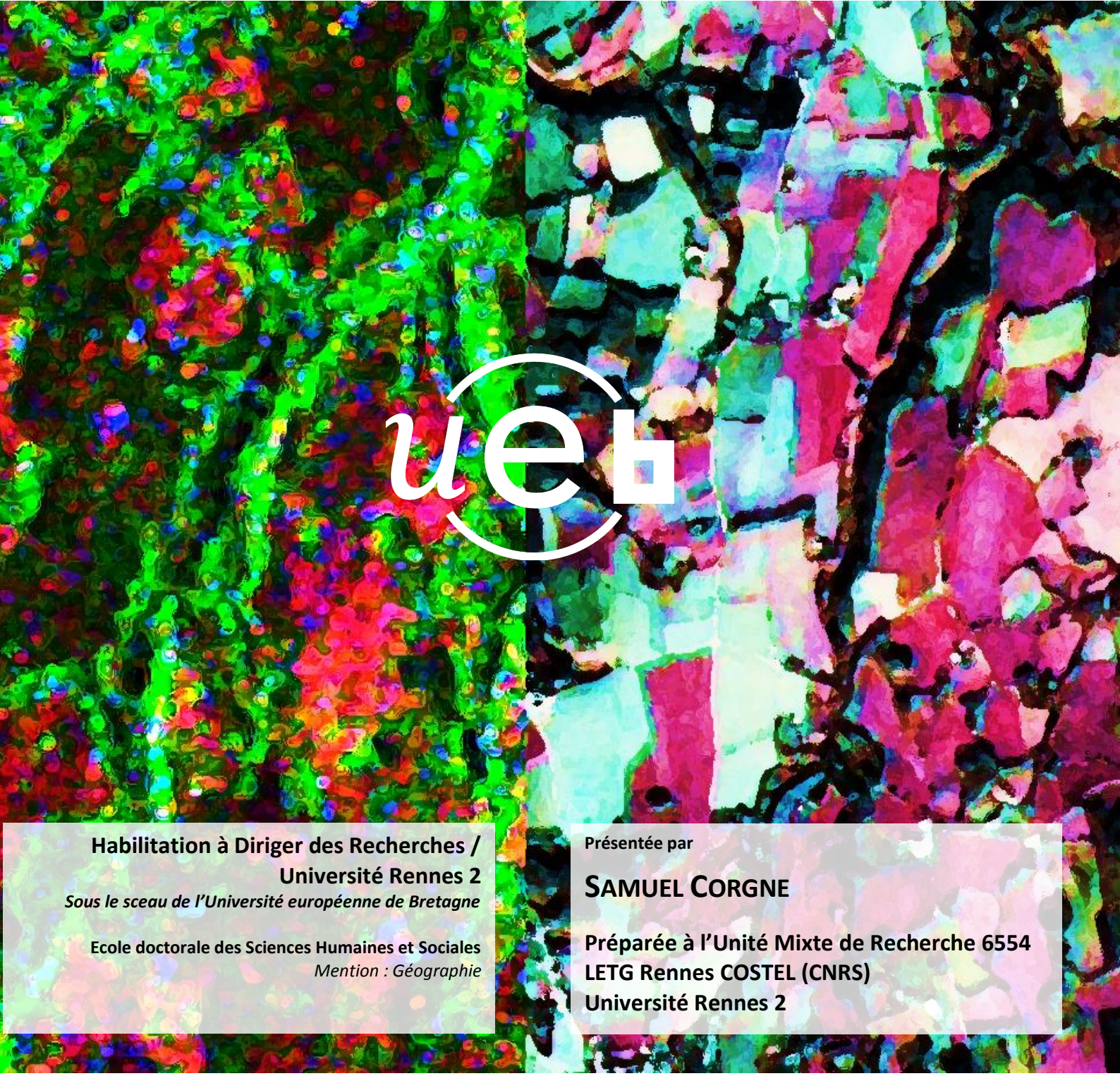


Habilitation à Diriger des Recherches /
Université Rennes 2
Sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne

Ecole doctorale des Sciences Humaines et Sociales
Mention : Géographie

Présentée par

SAMUEL CORGNE

Préparée à l'Unité Mixte de Recherche 6554
LETG Rennes COSTEL (CNRS)
Université Rennes 2

Etude des changements d'occupation et d'usage des sols en contexte agricole par télédétection et fusion d'informations

VOLUME 1 :

Position et projet scientifique

Habilitation à Diriger les Recherches soutenue à Rennes le 19 juin 2014 devant le jury composé de :

Laurence Hubert-Moy
Professeur, Université Rennes 2 / *Examinateur*
Hervé Quénol
Directeur de Recherche, CNRS / *Examinateur*
Marc Robin
Professeur, Université Nantes / *Examinateur*
Grégoire Mercier
Professeur, Télécom Bretagne / *Examinateur*
Jean Dezert
Ingénieur de recherche, ONERA / *Examinateur*
Monique Bernier
Professeur, INRS Québec / *Rapporteur*
Catherine Mering
Professeur, Université Paris-Diderot / *Rapporteur*

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches n'auraient jamais pu se faire sans les nombreuses rencontres et collaborations scientifiques effectuées depuis mon recrutement à l'Université Rennes 2.

Un grand merci donc à tous les collègues du site LETG RENNES !!! Laurence qui a accepté d'être une fois de plus ma « tutrice » pour ce travail et ce, malgré un emploi du temps surchargé ! Hervé, qui m'a motivé et soutenu dans ce projet d'écriture difficilement compatible avec les charges d'un enseignant-chercheur…et bien évidemment l'ensemble de l'équipe, chercheurs, enseignant-chercheurs, professeurs émérites, doctorants, stagiaires, gestionnaires administratifs…qui participent de près ou de loin à ces travaux. Une spéciale dédicace à « mes » deux doctorants, Julie et Daouda Sylla !

Tous mes remerciements à l'UMR LETG, structure de recherche CNRS qui m'offre un cadre de travail privilégié et reconnu pour développer une recherche exigeante et enthousiasmante (Marc, Françoise, Cyril…) ; aux collègues de l'OSUR et du Gis Bretel (Laurent, Gérard, Grégoire, Hervé, Éric, René…) qui me permettent de me confronter au mieux à l'interdisciplinarité ! Un grand merci également aux nombreux collègues rencontrés dans le cadre d'échange et collaborations scientifiques, avec une pensée particulière aux cousins québécois de l'Université de Sherbrooke (Goze Bénié, Ramata, Alain…) et aux collègues indiens (Sekhar, Amit…).

Tous mes remerciements aux membres du jury pour leur disponibilité et leurs conseils critiques sur ce travail.

Ma famille a joué un grand rôle dans l'aboutissement de ce mémoire, je les remercie du fond du cœur, ma mère et ma sœur surtout ! Ainsi que toute la « familia Corgne » de Retiers !

Enfin, un « abrazo muy grande » à mi « Carito » qui m'accompagne et me soutient dans cette aventure !

SOMMAIRE

Introduction 6

CHAPITRE 1- Positionnement scientifique 10

1. Contexte scientifique des recherches portant sur l'étude des changements d'occupation et d'usage des sols 10

1.1. Identification, caractérisation et suivi des changements d'occupation et d'usage des sols 12

1.2. Etude des facteurs de changements d'occupation et d'usage des sols 13

1.3. Modélisation des changements d'occupation et d'usage des sols 14

1.4. Evaluation des impacts des changements d'occupation et d'usage des sols dans un contexte de changement global 16

2. Positionnement de mes travaux de recherche dans ce contexte général 16

2.1. La nécessaire prise en compte de l'incertitude pour l'étude des changements d'occupation des sols en contexte agricole 17

2.2. Une approche privilégiée : la fusion d'informations 19

2.3. Problématiques et axes de recherche majeurs 26

CHAPITRE 2- Etude des changements d'occupation et d'usage des sols par télédétection optique et radar 30

1. La télédétection : une information spatialisée de base pour l'étude des changements d'occupation des sols 30

2. Evaluation de l'imagerie radar et de sa combinaison avec l'imagerie optique pour la caractérisation de l'occupation et de l'usage des sols 34

2.1. Utilisation de l'imagerie radar polarimétrique pour la caractérisation de la couverture hivernale des sols en Bretagne 35

2.2. Exploitation de la combinaison radar/optique pour la caractérisation de la couverture hivernale des sols en Bretagne 47

3. Evaluation des séries multi temporelles radar pour l'étude des changements d'occupation des sols 54
3.1. Etude des changements intra-annuels de l'occupation de sols en contexte agricole intensif et bocager 54
3.2. Etude des changements intra annuels des changements d'occupation des sols au sein d'une zone humide 61
3.3. Etude des changements inter annuels des changements d'occupation des sols en milieu semi-aride 65

CHAPITRE 3- Modélisation des changements d'occupation des sols et durabilité des territoires agricoles 71

1. Modélisation des changements d'occupation et d'usage des sols 72
1.1. Application à la dégradation des sols en milieu semi-aride 72
1.2. Application à la qualité de l'eau en Bretagne 80
1.3. Application à la variabilité climatique et aux changements d'occupation des sols dans le grand ouest français 91
2. Perspectives de recherche 102
2.1. Sur le plan thématique : les territoires agricoles face au changement climatique 103
2.2. Sur le plan méthodologique : Evaluation de nouveaux capteurs satellitaires pour une meilleure compréhension des territoires agricoles 111
Conclusion 115
Bibliographie 119
Figures 129
Tableaux 132
Annexe: Bases de la polarimétrie radar 134

INTRODUCTION

L'étude des changements d'occupation et d'usage des sols et leurs interactions avec les sociétés humaines et leurs territoires constitue un enjeu majeur pour la communauté scientifique dans un contexte de changement global (climatique, environnemental, démographique, socio-économique, politique…). Il y a un peu plus de 40 ans, lors de la conférence initiée par l'ONU sur « The Human Environment » à Stockholm (1972), la communauté scientifique pointait déjà l'urgence d'une collaboration internationale pour une étude des changements globaux, ces derniers concernant toutes les modifications majeures engendrées tant par les activités anthropiques que par les facteurs naturels à l'échelle planétaire. Les premiers programmes internationaux comme le WCRP (World Climate Research Program) sous l'impulsion de l'ICSU (International Council for Science) lancés à partir de 1979 se focalisaient déjà sur le changement climatique et le rôle des activités humaines. Depuis les années 1980, les programmes de recherche et les structures internationales sur l'étude des changements globaux se sont multipliés, parmi lesquels quatre programmes majeurs, DIVERSITAS (International Programme for Biodivesity Science), IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme), IHDP (International Human Dimensions Programme) et WCRP (World Climate Research Program) regroupés dans une structure fédérative appelé ESSP (Earth System Science Partnership) lors de la première conférence mondiale sur le changement global (2001, Amsterdam). L'ESSP a pour objectif d'étudier le changement global à travers une démarche pluridisciplinaire en se focalisant spécifiquement sur l'impact des activités humaines et leurs interactions. La tâche n'est pas aisée car le changement global concerne aussi bien l'atmosphère, que la biodiversité, les ressources hydriques, l'agriculture, l'urbanisation, l'économie, les sociétés humaines… Les approches interdisciplinaires sur le changement global restent encore aujourd'hui difficiles à mettre en œuvre. Lors de la dernière conférence des Nations Unies pour le développement durable qui s'est tenue à Rio de Janeiro au Brésil en juin 2012, D. Liverman, co-responsable de la plateforme de recherche interdisciplinaire « Future Earth » de l'ICSU insistait « encore » sur la nécessité de développer « une nouvelle approche qui soit plus interdisciplinaire, plus internationale et plus collaborative pour relever les défis majeurs issus du changement global … ». Ceci dit, depuis 1972, les différents travaux de recherche menés à l'échelle mondiale ont démontré que les activités humaines génèrent des changements (sur le climat, la biodiversité, les ressources en eau…) qui s'étendent bien au-delà de la variabilité naturelle (Appriou, 1991; Bunn, 2005; Foley et al., 2005; Goetz et al., 2005). Parmi les activités anthropiques étudiées, l'étude des changements d'occupation et d'usage des sols tient une place majeure. Ils ont en effet un impact significatif sur le climat, la biodiversité (structure et fonctionnement des écosystèmes, diversité écologique des espèces…), les ressources naturelles (eau, sol, forêts...), le développement des territoires…La communauté scientifique a donc pleinement conscience du rôle majeur joué par les changements d'occupation et d'usage des sols sur le changement global. C'est pourquoi, l'IGBP et l'IHDP ont développé depuis 1990 des programmes de recherche internationaux sur l'étude des changements d'occupation et d'usage des sols (LULCC, Land Use and Land Cover Change puis le GLP, Global Land Project) dont l'objectif général est d'améliorer notre compréhension du sujet (De Sherbinin, 2002). Plus précisément, voici les principaux objectifs développés à travers ces programmes : (1)

l'amélioration de la caractérisation des principaux types d'occupation des sols et de leurs changements passés (lointains et récents), (2) une meilleure identification des dynamiques spatio-temporelles qui caractérisent les changements d'occupation et d'usage des sols (vitesse des changements, échelles auxquelles ils se produisent…), (3) l'identification des principaux facteurs (spatiaux, biophysiques, climatiques, socio-économiques…) qui favorisent les changements d'occupation et d'usage des sols et (4) l'amélioration et le développement de nouveaux modèles susceptibles d'évaluer les impacts des changements d'occupation et d'usage des sols sur les sociétés et les territoires.

Si la déforestation et l'irrigation représentaient jusqu'au 19ème siècle les principaux changements d'occupation et d'usage des sols d'origine anthropique, l'avènement de l'ère industrielle basée sur la combustion d'énergie fossile a profondément accéléré la dynamique de ces changements. Aujourd'hui, près de 50% des surfaces terrestres non recouvertes par la glace ont subi des changements d'occupation et d'usage des sols (Haberl et al., 2007). Ces derniers, en modifiant les interactions terre-atmosphère, touchent indirectement toute la planète *via* le changement climatique ou la pollution atmosphérique. La plupart de ces changements sont liés au développement de l'agriculture, de la déforestation et de l'étalement urbain. L'agriculture nécessite près de 85% des prélèvements en eau à l'échelle mondiale et apparaît aujourd'hui comme une des sources principales d'émission de gaz à effet de serre (Galloway et al., 2003). En plus de leur rôle dans le changement climatique, aux échelles locales, régionales et globales, ces changements ont un impact sur la biodiversité, les cycles biogéochimiques, entraînant la dégradation de la qualité de l'eau ou des sols. Souvent critiquée, car associée à l'utilisation d'intrants polluants et à la surexploitation des ressources naturelles (eau, sol), l'agriculture intensive fait l'objet depuis plusieurs décennies de nombreux débats à l'échelle mondiale (Bonny, 2011). De nombreuses voix se sont élevées pour demander un changement du modèle de production agricole du fait de ses effets négatifs, en particulier au niveau environnemental et sanitaire (pollution de l'eau, érosion des sols, baisse de la biodiversité…). Plusieurs voies ont ainsi été proposées pour faire face aux défis des prochaines décennies en matière d'alimentation, de préservation des écosystèmes, de la biodiversité, de la qualité de l'eau, de changement climatique…Parmi ces propositions, la majorité d'entre elles préconise une agriculture « écologique » utilisant de façon durable « les processus naturels et les fonctionnalités des écosystèmes » (Godfray et al., 2010). On recense ainsi comme nouveaux paradigmes, « l'agriculture écologiquement intensive » (Griffon, 2013), « l'intensification écologique », « l'agriculture à haute intensité écologique », « l'intensification durable »…Cette intensification écologique qui prône « une utilisation intensifiée des fonctionnalités naturelles offertes par les écosystèmes » (Chevassus-au-Louis & Griffon, 2007) repose sur un aspect fondamental : une compréhension à fine échelle des dynamiques d'occupation et d'usage des sols qui composent les territoires, et de leur évolution à court et moyen terme dans un contexte de changement global.

Pour atteindre ces objectifs et comprendre les changements récents survenus sur le « système Terre », il apparait donc fondamental que la communauté scientifique puisse disposer de « données quantitatives spatialement explicites » sur la façon dont l'homme a modifié l'occupation des sols au cours de ces derniers siècles et sur les changements probables à court, moyen et long terme (Berrien & Lambin, 2000). Pour ce faire, deux approches méthodologiques sont combinées au sein du projet « Global Land Project »:

(1) l'analyse multi-scalaire des changements d'occupation des sols dans un passé lointain et récent ;

(2) le développement de modèles de changements d'occupation des sols qui doivent permettre une meilleure compréhension des interactions « homme-société-environnement » à plusieurs échelles (locale, régionale et globale).

L'étude des changements d'occupation et d'usage des sols a donc émergé comme étant une composante fondamentale des recherches internationales menées sur le changement global. Elle apparaît même depuis une dizaine d'années comme une discipline scientifique à part entière, avec une approche interdisciplinaire solidement ancrée. Le « Land Change Science » (Turner et al., 2007) vise ainsi à comprendre les dynamiques d'occupation et d'usage des sols comme un système complexe basé sur le couple « homme – environnement » en énonçant et développant des théories, concepts et modèles relevant des sciences sociales et environnementales.

Dans ce contexte scientifique, la Géographie joue « naturellement » un rôle prépondérant. Placée à l'interface des sciences environnementales, sociales et humaines, la géographie apparaît ainsi bien représentée dans les programmes internationaux tels que l'IGBP ou l'IHDP. Elle appréhende le changement global en général et les changements d'occupation des sols en particulier en apportant des réponses aux défis de plus en plus médiatisés posés par le changement global. Ainsi, de nombreux ouvrages en géographie étudient les impacts des activités humaines sur l'environnement et les sociétés en proposant de nouvelles approches des rapports Nature/Société, de nouveaux modèles économiques…dans le contexte d'un développement durable (Mancebo, 2006). C'est pourquoi, certains géographes soutiennent que la géographie a contribué de manière précoce, sans même le savoir, à se poser indirectement des questions sur le changement global à travers l'étude du fonctionnement des processus naturels et l'impact des activités humaines sur ces processus (Pech, 2007). L'expertise et le savoir-faire du géographe apparaissent donc être un atout majeur pour répondre aux défis complexes posés par le changement global. Sa valeur ajoutée réside dans une analyse spatialisée et une contribution importante à la modélisation dynamique des systèmes complexes à l'interface Nature/Société.

Mes travaux de recherche s'inscrivent dans cette démarche et tentent de contribuer à cette réflexion. Ils sont centrés sur l'étude des changements d'occupation et d'usage des sols en interaction avec les sociétés humaines et leurs territoires. Parmi ces interactions, l'analyse des interactions entre les changements d'occupation et d'usage des sols et les territoires agricoles est privilégiée. Si mes travaux de recherche concernent surtout des sites expérimentaux localisés en Bretagne (Programme LTER-Europe « Zone Atelier Armorique », programme « Bretagne eau Pure »…), ils intègrent également des sites d'étude localisés dans des pays de la zone intertropicale (Afrique de l'Ouest, Argentine, Inde…). Pouvant paraître à première vue assez différents et éloignés, ces territoires (i.e. Zone HAPEX Sahel, bassin versant du Berambadi en Inde) sont tous soumis à de fortes pressions anthropiques (conflits d'usage, surexploitation des ressources,…). Ils sont étudiés selon une même logique thématique et méthodologique, les méthodes mises au point et appliquées dans une région devant pouvoir être transposables. Ainsi, la Bretagne est considérée dans mes travaux comme une région test où sont élaborées des méthodes dont la reproductibilité est évaluée sur les espaces intertropicaux.

Dans ce travail d'Habilitation à Diriger des Recherches, sont présentés successivement :

- Le contexte général de mes recherches sur les changements d'occupation et d'usage des sols. Le cadre conceptuel de ces recherches est posé dans sa globalité afin de définir leur « périmètre » scientifique. L'approche que j'ai privilégiée dans l'ensemble de mes travaux de recherche est la fusion d'informations. Elle offre en effet un cadre conceptuel bien adapté aux variations spatio-temporelles complexes qui caractérisent les territoires agricoles car elle permet de prendre en compte l'incertitude à différents niveaux : de la donnée à la production des résultats en passant par le processus de modélisation.
- Les travaux portant sur les changements de l'occupation et de l'usage des sols en contexte agricole par télédétection radar et optique, axe majeur de mes activités de recherche. Outil d'analyse et de suivi privilégié pour l'étude des changements d'occupation et d'usage des sols, la télédétection connaît depuis les années 2000 un formidable développement technologique offrant de nouvelles perspectives et des défis méthodologiques pour cette problématique de recherche. Différentes applications portant d'une part, sur l'exploitation de l'imagerie radar, source d'information spatialisée encore peu utilisée en Géographie et sur l'exploitation conjointe d'images optiques et radar d'autre part, seront exposées et développées.
- Les recherches portant sur la modélisation des changements d'occupation des sols et l'étude de leurs interactions avec la durabilité des territoires agricoles. Sont exposés ici deux études portant sur la modélisation des changements d'occupation et d'usage des sols et leurs impacts sur la dégradation des sols en milieu semi-aride et sur la dégradation de la qualité de l'eau en Bretagne. Encore en phase exploratoire, l'étude de ces interactions pose la question de la durabilité de l'agriculture dans un contexte de changement global. L'étude de l'impact du changement climatique sur les territoires agricoles constitue à ce titre un enjeu majeur pour une meilleure gestion de ces espaces et une première approche analysant ces interactions est exposée à l'échelle du Grand Ouest de la France. Cependant, à fine échelle, l'impact du changement climatique sur les territoires agricoles reste encore peu étudié car, complexe à modéliser, il représente un défi scientifique important pour une meilleure gestion (adaptation, conversion…) de territoires agricoles tributaires de la variable climatique. Cet aspect est présenté dans le cadre de deux programmes de recherche récents dont les principaux objectifs de recherche sont définis à court et moyen terme. Dans un contexte de plus en plus interdisciplinaire, les futurs axes de recherche portant sur l'étude des changements d'occupation des sols en contexte agricole, tant d'un point de vue thématique que méthodologique, sont détaillés.

CHAPITRE 1- POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE

Les recherches menées sur l'étude des changements d'occupation des sols depuis la fin des années 1990 dans le cadre de grands programmes internationaux sont fondamentalement interdisciplinaires (géographie, écologie, biologie, physicien, climatologie, sciences spatiales, économie, politique, droit, sociologie…). Avec le temps et les résultats probants issus de cette collaboration interdisciplinaire, une science à part entière a émergé, le LCS : Land Change Science » (Turner et al., 2007).

Dans ce contexte, les problématiques de recherche identifiées sont les suivantes :

- Dans quelle mesure peut-on identifier des changements passés et actuels d'occupation et d'usage des sols qui ont des impacts importants sur l'environnement, les sociétés et les territoires ?
- Quels sont les outils et méthodes qui permettent au mieux de les identifier, de les caractériser et de les suivre dans le temps à différentes échelles spatiales ?
- Quels sont les facteurs (humains, physiques, économiques, sociaux, politiques,…) qui motivent et favorisent ces changements d'occupation et d'usage des sols ?
- Comment modéliser ces changements afin de bâtir les scénarios prédictifs/prospectifs les plus fiables possibles ?
- Quelle intégration de l'information « changements d'occupation et d'usage des sols » dans d'autres modèles (hydrologiques, climatiques, socio-économiques,…)?
- Quels sont et seront les impacts (humains, environnementaux, économiques, sociaux, politiques,…) de ces changements sur le court et le long terme ?

Mes travaux de recherche tentent de répondre à ces questions, en se focalisant sur l'étude des changements d'occupation et d'usage des sols en contexte agricole. Dans ce chapitre, après avoir défini les termes occupation et usage des sols, le cadre conceptuel général des travaux de recherche menés sur les changements d'occupation et d'usage des sols dans un contexte de changement global est exposé et détaillé afin de positionner le « périmètre d'activité » de mes recherches. L'approche méthodologique privilégiée dans mes recherches est la fusion d'informations incluant des données de télédétection. Parmi les nombreuses règles de fusion existantes, celles qui prennent en compte l'incertain et l'imprécis dans leur formalisme sont exposées et leur intérêt pour l'étude des changements d'occupation des sols est détaillé.

1. Contexte scientifique des recherches portant sur l'étude des changements d'occupation et d'usage des sols

Les termes occupation et usage des sols renvoient à deux définitions distinctes : le terme « occupation des sols » correspond à une description purement physique de l'espace. Il désigne l'occupation physique observée de la surface terrestre (Di Gregorio & Jansen, 1997)

comprenant ainsi les surfaces en végétation (végétation arborée, végétation rase…), les sols nus (surfaces bâties, roches …) et les surfaces en eau (réseau hydrographique, plans d'eau…). Le terme « utilisation des sols » correspond à une gestion anthropique des différents types d'occupation des sols. Deux approches peuvent ainsi être distinguées pour l'utilisation des sols (EUROSTAT, 2001) : la première, fonctionnelle, décrit les surfaces observées selon leur finalité socio-économique (surface agricole, forestière, zone artisanale…). La deuxième, séquentielle, comprend une série d'opérations humaines visant à tirer des produits/bénéfices des ressources du sol comme le labour, l'ensemencement, les traitements phytosanitaires sur les parcelles, les récoltes (Mücher et al., 1993). Dans certains cas, un changement d'usage peut entraîner un changement d'occupation des sols comme par exemple, l'absence prolongée de gestion des prairies peut mener à un enfrichement par la strate arbustive (Rapinel, 2012a). Malgré ces différences sémantiques, les deux termes restent étroitement liés. La production relative à l'occupation du sol constitue souvent la première étape pour établir un état des lieux d'un territoire. L'intégration de données exogènes à cette base autorise ensuite la création de classes d'usage du sol, ce qui explique que dans les nomenclatures et légendes des inventaires d'occupation des sols tels que CORINE Land Cover (1985), les deux types d'informations se retrouvent souvent …L'absence d'une taxinomie universelle de l'occupation et de l'usage des sols représente un verrou majeur pour l'étude des changements d'occupation des sols, rendant la comparaison d'études de cas complexe. Au sein des changements d'occupation et d'usage des sols, il convient de distinguer les « conversions » des « modifications ». Les « conversions » représentent le passage d'une catégorie d'occupation et d'usage des sols à une autre comme par exemple le passage d'une surface en forêt en surface cultivée. Les « modifications » d'occupation des sols comprennent, elles, les changements intervenus au sein même d'une catégorie d'occupation ou d'usage des sols comme par exemple le passage d'un maïs à une céréale lors d'une succession culturale. Les modifications d'occupation et d'usage des sols correspondent ainsi à des changements moins « radicaux » que les conversions d'occupation des sols qui peuvent impacter fortement les territoires. Une conversion peut en effet être irréversible, avec pour conséquences une altération définitive de certaines fonctions, en particulier celles qui sont liées à la biodiversité (Baudry et al., 2003; Hubert-Moy, 2004; Lambin & Geist, 2006; Rapinel, 2012a).

Après plus de 30 années de recherche sur l'étude des changements d'occupation et d'usage des sols, une nouvelle discipline scientifique appelé « Land Change Science (LCS) » s'est peu à peu imposée (Turner et al., 2007). Elle est fondée sur quatre grands thèmes de recherche (**Figure 1**) : 1) l'observation et le suivi des changements d'occupation et d'usage des sols, (2) la compréhension et l'identification des facteurs de changements d'occupation et d'usage des sols, (3) la modélisation des changements d'occupation et d'usage des sols et (4) l'étude de leurs impacts dans un contexte de changement global.

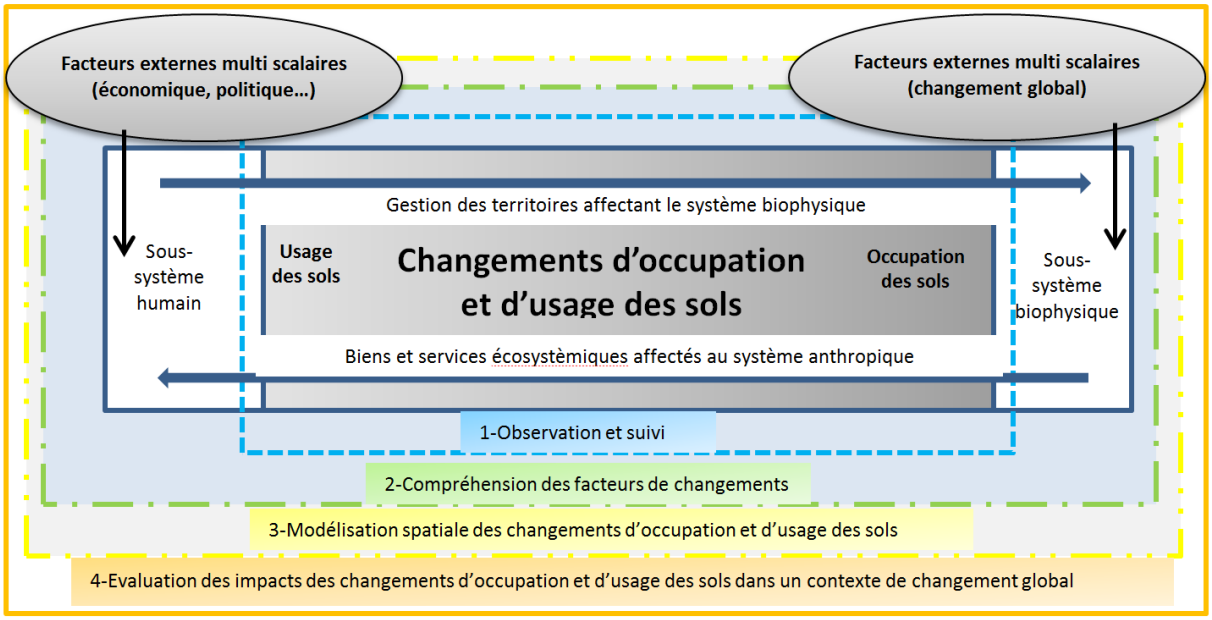


Figure 1- Schéma conceptuel du système « Changements d'occupation et d'usage des sols » (Turner *et al.*, 2007)

L'étude des changements d'occupation et d'usage des sols apparaît ainsi comme un système complexe où les quatre thèmes de recherche sont étroitement imbriqués.

1.1. Identification, caractérisation et suivi des changements d'occupation et d'usage des sols

La télédétection (aéroportée et aérospatiale) a, depuis les années 1980, profondément modifié la capacité d'observation et de suivi des changements d'occupation et d'usage des sols. En plus du nombre de capteurs opérationnels actuellement, la grande diversité de leurs caractéristiques spectrales, spatiales et temporelles permet de suivre ces changements à différentes échelles spatio-temporelles. Ainsi, depuis Landsat-1 en 1972, plus de 400 satellites d'observation de la terre ont été mis en orbite et de nombreux projets de missions sont en cours d'étude pour les 20 prochaines années. Parallèlement à cette évolution, les méthodes de traitement d'images n'ont cessé d'évoluer, en offrant notamment de nouveaux algorithmes permettant de les caractériser, de les détecter et de les suivre (classifications basées sur le pixel, orientées objet, analyses diachroniques, multitemporelles…). Par ailleurs, depuis les années 2000, grâce au développement d'internet et de l'informatique en général, il est possible de télécharger de plus en plus produits de télédétection gratuitement via des plateformes développées par les programmes internationaux ou les différentes agences spatiales.

Plusieurs défis sont à relever pour étudier les changements d'occupation et d'utilisation des sols: Le premier est de définir une taxonomie cohérente des nomenclatures d'occupation et d'utilisation des sols, actuellement en cours d'homogénéisation en Europe via la directive

INSPIRE, un travail considérable restant à faire pour une harmonisation à l'échelle mondiale sur les territoires agricoles (Di Gregorio & Jansen, 2005). Le second est de maintenir des séries d'observation temporelles continues pour optimiser les analyses, et ce à différentes échelles spatiales (locales, régionales et mondiales). Le troisième est lié à l'amélioration croissante des résolutions spatiales, temporelles, spectrales et radiométriques des capteurs depuis les années 2000, car s'ils permettent une meilleure caractérisation de l'occupation et l'usage des sols et donc une plus fine détection des changements, ils nécessitent des développements méthodologiques importants (Lambin & Geist, 2006).

1.2. Etude des facteurs de changements d'occupation et d'usage des sols

L'identification des facteurs de changements représente un enjeu crucial pour une meilleure compréhension des dynamiques spatio-temporelles des changements d'occupation et d'usage des sols. Les changements peuvent être divisés en deux catégories (Lambin et al., 2001) : Les changements liés à des facteurs « directs » qui expliquent comment et pourquoi les écosystèmes sont modifiés par les activités anthropiques. En général, ces facteurs sont identifiés à des échelles locales et relèvent de comportements individuels (acteurs et gestionnaires locaux). Au contraire, les changements dus à des facteurs « indirects » interviennent à des échelles régionales, voire globales. Ils sont issus d'interactions complexes entre les variables sociales, politiques, économiques, démographiques, technologiques, culturelles et biophysiques associées à un territoire. La plupart de ces facteurs sont exogènes et ont un impact plus diffus sur les territoires, ce qui rend leur identification plus difficile à établir.

Les changements d'occupation et d'usage des sols sont ainsi généralement dus à de multiples facteurs qui interagissent entre eux et qui varient dans le temps et l'espace à l'interface Homme/Nature. On peut cependant identifier les facteurs de changements majeurs (Gutman et al., 2004):

- La variabilité naturelle. Les facteurs biophysiques comprenant conjointement le milieu abiotique (climat, sols, topographie…) et biotique (faune, flore…) tendent à définir la capacité naturelle du territoire étudié à connaître des changements d'occupation des sols plus ou moins importants (i.e. zones humides, toundra…).

- Les facteurs démographiques. Ils incluent les phénomènes de migration, d'urbanisation, de main d'œuvre…Le phénomène migratoire est identifié comme étant le facteur provoquant les changements d'occupation et d'usage des sols les plus rapides observés sur les territoires (i.e. l'urbanisation dans les pays en voie de développement…).

- les facteurs institutionnels, économiques et technologiques. Comprenant les institutions politiques, économiques, ils influencent les prises de décision des acteurs locaux et ont des impacts potentiellement très forts sur les écosystèmes (lois environnementales, subventions économiques sur certains produits agricoles, gestion des ressources…).

- Les facteurs culturels. Ils incluent les croyances, les valeurs, les perceptions individuelles… des acteurs et gestionnaires territoriaux. Ces facteurs peuvent avoir un impact

important sur les changements d'occupation des sols, leur prise en compte s'avère nécessaire pour comprendre par exemple les phénomènes de résilience face aux changements.

- La globalisation. La globalisation en elle-même n'étant pas à proprement dite un facteur de changement, elle intervient indirectement sur les autres facteurs de changement. Elle peut alors amplifier ou atténuer certains facteurs de changement en supprimant certaines barrières institutionnelles ou régionales. Par exemple, certaines organisations internationales comme les Nations-Unis peuvent contribuer à atténuer certains changements d'occupation des sols sur des espaces spécifiques (mangroves, forêts primaires…) en les classant « patrimoine de l'humanité ».

L'analyse des changements d'occupation et d'usage des sols doit ainsi combiner tous ces facteurs. Néanmoins, elle reste dans la plupart des cas incomplète et imprécise, car il est difficile de discriminer l'ensemble des facteurs de changement (socio-économiques, politiques, biophysiques…) sur un territoire donné (manque de données, de connaissances, etc.). Malgré tout, des recherches montrent qu'à une échelle globale voire régionale, les dynamiques d'occupation des sols apparaissent bien reliées aux variables démographiques, économiques et technologiques (Turner et al., 2003). Ces relations ne sont plus valides aux échelles locales auxquelles d'autres facteurs interviennent et interagissent entre eux différemment selon les territoires considérés (Corgne, 2004a; Steffan-Dewenter et al., 2007; Reenberg, 2011).

Pour une meilleure identification des facteurs de changements, la communauté scientifique du « Land Use Science » tente ainsi depuis peu (Millennium Ecosystem Assessment, 2005) d'analyser de manière plus « intégrée » le système « Changements d'occupation des sols » (**cf.**Figure 1). En effet, pour identifier les facteurs motivant les changements d'occupation des sols, les variables biophysiques, comme la pédologie, le climat, la topographie, l'hydrologie… sont généralement uniquement exploitées individuellement et de manière indépendante. Or, pour une meilleure compréhension et identification des facteurs motivant les changements à l'échelle des territoires (Ash et al., 2009), ces variables biophysiques peuvent être considérées comme un « sous-système biophysique ». Ce dernier est alors défini comme un service éco-systémique ayant des interactions complexes avec le « sous-système humain » (économie, politique, aménagement….). L'étude de ces interactions doit permettre une meilleure identification des facteurs de changements à différents niveaux scalaires (locaux, régionaux et globaux).

1.3. Modélisation des changements d'occupation et d'usage des sols

La modélisation des changements d'occupation et d'usage des sols est une problématique de recherche fortement étudiée par la communauté scientifique depuis une vingtaine d'années (Agarwal et al., 2002). Il existe encore aujourd'hui, sur cet axe de recherche, une forte confusion sémantique entres les termes « modélisation » et « simulation » qui nuit à la compréhension générale de cet axe. C'est pourquoi il apparaît nécessaire de différencier clairement les deux termes (Mas et al., 2011; Thériault et al., 2011). La modélisation des changements d'occupation des sols doit ainsi être appréhendée comme un cadre conceptuel général qui permet de dégager des règles de transition (spatialisées ou non) qui sont ensuite intégrées dans des outils de simulation spatialement explicites. Les méthodes utilisées pour modéliser les changements

d'occupation des sols sont nombreuses (Lippe et al., 1985; Sanders, 2001; Houet et al., 2008), elles peuvent reposer sur des approches systémiques ou à dire d'experts, basées sur des approches probabilistes (chaines de Markov), d'intelligence artificielle (réseaux de neurones), statistiques (régressions logistique, analyse multi critères…), ou encore d'analyse spatiale (SIG, géostatistique)…Concernant les outils et modèles de simulation des changements d'occupation et d'usage des sols, ils peuvent être divisés en deux catégories : les automates cellulaires (Langlois & Philipps, 1997; Batty & Xie, 1999; Paegelow et al., 2004; Houet & Gaucherel, 2007; Mas et al., 2011) qui étudient les interrelations spatiales dans un maillage de cellules adjacentes, et d'autre part, les modèles multi-agents qui, en plein développement, apparaissent plus flexibles car basés sur des systèmes orientés-objet (Tissot et al., 2005; Sahli & Moulin, 2006; Vannier, 2011).

On peut donc distinguer deux niveaux de modélisation de changements d'occupation et d'usage des sols (**Figure 2**) :

- Une modélisation dite « empirique » qui intègre les variables (biophysiques et humaines) du territoire étudié et les causes immédiates des changements. Cette modélisation peut être basée sur des procédures spatiales et non spatiales qui déterminent des probabilités de changements.

- Une modélisation « intégrée» qui utilise en plus un outil de simulation spatialement explicite pour distribuer les changements dans l'espace et le temps avec éventuellement un module spatial chargé de reproduire les caractéristiques du paysage. Cette modélisation permet non seulement de spatialiser à court, moyen ou long terme les changements mais également de construire des scénarios permettant d'évaluer l'importance des variables explicatives (biophysique, humain) sur les changements d'occupation et d'usage des sols.

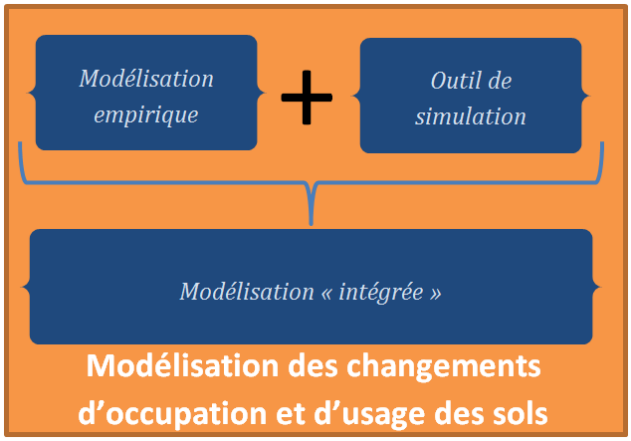


Figure 2- Description des différents niveaux de modélisation des changements d'occupation et d'usage des sols

Ces modèles demeurent complexes à mettre en œuvre, car ils doivent intégrer les multiples variables biophysiques et humaines qui motivent les changements d'occupation et d'usage des sols et si possible spatialiser les résultats pour pouvoir les valider et les intégrer dans d'autres modèles (climatiques, agro-hydrologiques…). Par ailleurs, ils doivent être utiles aux gestionnaires et aménageurs des territoires et apporter des informations fiables pour

optimiser les prises de décision. L'incertitude associée aux résultats doit donc pouvoir être estimée.

1.4. Evaluation des impacts des changements d'occupation et d'usage des sols dans un contexte de changement global

L'évaluation de l'impact des changements d'occupation et d'usage des sols dans un contexte de changement global peut être considérée comme la phase « ultime » du processus de modélisation des changements d'occupation et d'utilisation des sols. La communauté scientifique a en effet depuis plus de 20 ans, réalisée de très grands progrès sur l'observation, le suivi et la modélisation des changements d'occupation et d'usage des sols que ce soit à l'échelle globale, régionale ou locale. Cependant, il n'existe que très peu de liens permettant d'identifier et comparer les travaux effectués à différentes échelles. C'est pourquoi des projets fédérateurs comme Globe (Ellis, 2012) ont vu le jour afin d'intégrer les recherches effectuées aux échelles globales, régionales et locales et favoriser ainsi les transferts d'échelles entre les différents sites d'études. Concernant l'évaluation des changements d'occupation et d'usage des sols dans un contexte de changement global, de nombreux travaux sont consacrés à des thématiques de durabilité (écosystèmes, économiques, humains…), c'est-à-dire directement ou indirectement, au développement durable (Lüdeke et al., 1999; Kasperson & Kasperson, 2001; Klepeis & Turner Ii, 2001; Goetz et al., 2005; Santilli et al., 2005). On retrouve ainsi des travaux sur les notions de résilience et de vulnérabilité des territoires par rapport aux changements d'occupation des sols et des tentatives de proposition pour un développement plus durable. Les résultats issus de la modélisation sont ici confrontés aux grandes problématiques environnementales (ressource en eau, biodiversité, changement climatique, déforestation, désertification, urbanisation…) afin de proposer des solutions adéquates pour les sociétés. Le défi majeur réside donc à construire une « architecture » multi scalaire (globale, régionale et locale) des modes de gestion d'occupation et d'usage des sols qui permette d'effectuer une analyse de la durabilité des sociétés et des écosystèmes de la planète.

2. Positionnement de mes travaux de recherche dans ce contexte général

Mes activités de recherche couvrent bien évidemment un spectre plus réduit que celles couvertes par le « LCS ». Elles s'inscrivent néanmoins pleinement dans le cadre conceptuel du « LCS » en se focalisant sur l'étude des changements d'occupation et d'usage des sols en territoire agricole. L'échelle privilégiée dans mes travaux de recherche est l'échelle locale où les dynamiques territoriales sont analysées dans le cadre de programmes internationaux et pluri disciplinaires.

2.1. La nécessaire prise en compte de l'incertitude pour l'étude des changements d'occupation des sols en contexte agricole

La modernisation de l'agriculture depuis la fin de la seconde guerre mondiale (intrants, pratiques agricoles, recherche agronomique, matériel, capital…) a permis une forte augmentation, quoique inégalement répartie, de sa productivité afin de répondre à la demande alimentaire mondiale (Bonny, 2011). Cependant, cette modernisation a généralement évolué vers une agriculture intensive, c'est-à-dire « une agriculture qui utilise davantage de facteurs de production » (Ministère de l'agriculture, 1993) engendrant des nuisances importantes sur l'environnement (dégradation de la qualité de l'eau, baisse de la biodiversité, érosion des sols…) et la gestion des territoires (spéculation sur les produits, conflits d'usage…). Ainsi, depuis plusieurs décennies, de nombreux chercheurs, acteurs politiques…demandent un changement de paradigme du système agricole actuel (Chevassus-au-Louis & Griffon, 2007; Bonny, 2011; Griffon, 2013) offrant des pratiques agricoles plus respectueuses de l'environnement tout en restant aussi productive pour faire face aux défis démographiques du 21ème siècle. A l'échelle mondiale, les surfaces agricoles couvrent près de 35% des terres émergées avec une progression de près de 12% entre 1961 à 2009 (Ministère de l'agriculture, 2012). Cependant, l'augmentation des terres arables tend à stagner et d'ici 2050, l'essentiel de l'augmentation de la production agricole devrait provenir d'une amélioration de la productivité sur les terres actuellement exploitées avec, notamment, l'utilisation de plus en plus importante de l'irrigation. L'agriculture représente ainsi l'activité anthropique la plus utilisatrice d'eau douce, l'agriculture pluviale (« l'eau verte » apportée par la pluie et contenue dans le sol) mobilisant environ 5600 km^3 et l'agriculture irriguée (« l'eau bleue », provenant des cours d'eau et nappes souterraines) 2700 km^3, soit 70% des eaux captées pour les divers usages (Richard & Benoit, 2012). La gestion de cette ressource représente ainsi un enjeu majeur pour la sécurité alimentaire mondiale dans un contexte de changement global (climatique, démographique, énergétique, économique…) qui pose de nombreux défis : comment assurer la sécurité alimentaire mondiale avec plus de 2 milliards d'habitants prévus en 2050 ? Comment répondre aux besoins en eau des pays émergents en forte croissance économique, industrielle et agricole (Inde, Chine, Brésil…) ? Et ceci dans un contexte où depuis peu, l'offre n'est plus structurellement supérieure à la demande provoquant une forte volatilité des prix (Richard & Benoit, 2012), et où le changement global provoque une forte incertitude sur la durabilité du système agricole actuel…

Dans ce contexte incertain et en mutation, une fine connaissance des variations spatio-temporelles de l'utilisation et de l'occupation des sols constitue un élément-clé pour la communauté scientifique du « LCS » (Turner et al., 2007) et acteurs du monde agricole. Pour cela, les scientifiques peuvent se reposer sur la masse de plus en plus importante de données spatialisées liée au très fort développement de la géomatique et de l'informatique en général. Ce fort développement technologique s'accompagne également de nouvelles perspectives de recherche sur l'exploitation et le traitement de l'information. Elle pose également de nouvelles difficultés de gestion et de traçabilité des contenus informationnels qui font l'objet aujourd'hui de nombreuses recherches et débats (organisation des bases de données, mise aux normes internationales des métadonnées, gestion et utilisation des « mémoires environnementales »…). Il est maintenant reconnu que les informations spatialisées (issues de la télédétection, SIG,

contrôles terrain,…) sont rarement, voire jamais totalement exactes (Heuvelink et Burrough, 2002). On trouvera toujours des divergences significatives entre la réalité et sa représentation, car la réalité est incorporée dans un type de format de donnée rigide où sont au mieux estimées les propriétés des unités spatiales. Plusieurs éléments incertains sont à prendre en compte dans une donnée spatialisée : la localisation géographique, la précision de l'attribut, sa cohérence logique. Or ces données spatiales sont de plus en plus intégrées dans les processus de modélisation d'occupation et d'usage des sols. La connaissance sur leur précision informative, leur impact sur les modèles et leurs résultats devient ainsi un défi important et fait l'objet de nombreux travaux de recherche (Agumya et Hunter, 2002 ; Bachmann et Allgöwer, 2002). Les méthodes utilisées pour estimer l'incertitude et sa propagation sont généralement d'ordre statistiques et géostatistiques (Bachmann et Allgöwer, 2002 ; Goovaerts, 2002) et s'appliquent aussi bien à des problèmes de classification d'images satellitaires qu'à des modélisations complexes d'évolution d'occupation du sol. Différents niveaux d'analyse sont appliqués et sont présentés de façons schématiques et simplifiées sur la **Figure 3.** Concernant les données d'entrée, plusieurs solutions existent pour estimer l'incertitude. La plus simple consiste à ne prendre en compte que les données les plus fiables possibles afin de minimiser la propagation des erreurs. La deuxième consiste à pondérer chaque donnée d'entrée en fonction de sa fiabilité, mesurée au préalable par des modèles statistiques. Le modèle peut être également entaché d'incertitude étroitement liée à son paramétrage. La fiabilité dépend donc du modèle, mais aussi du modélisateur et de son niveau de complexité. Associée aux caractéristiques propres du modèle, la propagation de l'incertitude des données d'entrée peut aussi être mesurée par diverses simulations d'ordre statistique (Bachmann et Allgöwer, 2002). Enfin, concernant les résultats produits, la mesure de leur incertitude dépend des données d'entrée et du modèle utilisé. Leur estimation devient problématique et ne peut être mesurée qu'avec une confrontation avec la réalité.

Mesurer l'incertitude et surtout ses conséquences dans un processus de modélisation requiert des méthodes d'analyse lourdes et parfois compliquées à mettre en place. C'est pourquoi ce genre d'analyse reste rare en géographie. Par ailleurs, si ces analyses permettent de quantifier et de mesurer l'impact de la propagation de l'incertitude sur les prises de décision, elles ne l'intègrent pas dans le processus de modélisation même. Or cette gestion de l'incertitude s'avère parfois indispensable dans certains cas, comme celui de l'étude des changements d'occupation et d'usage des sols en milieu agricole, où le caractère même du phénomène est incertain.

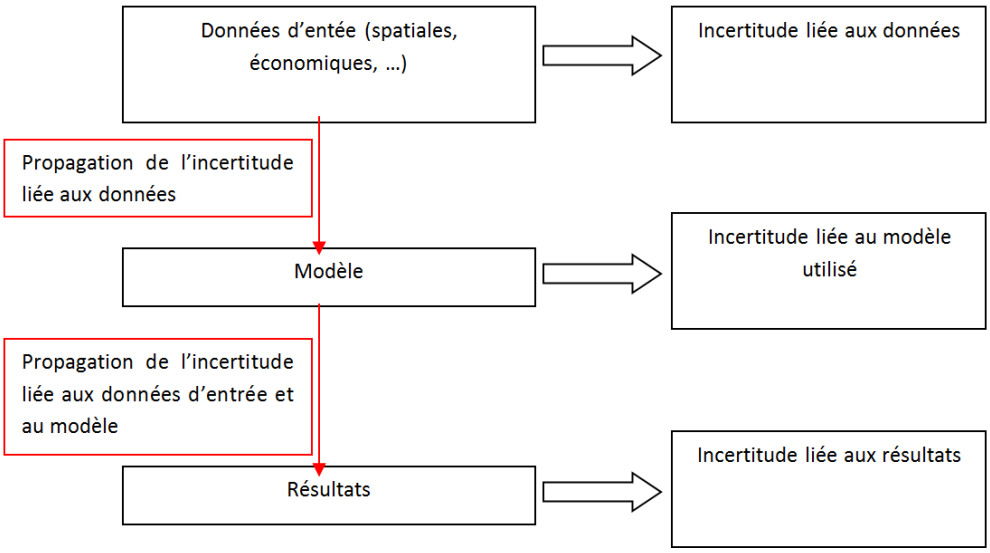


Figure 3- Prise en compte de l'incertitude dans un processus de modélisation d'un phénomène (Corgne, 2004)

Une solution possible consiste alors à utiliser des modèles intégrant l'incertitude dans leur infrastructure. C'est le cas des règles de fusion utilisées pour le traitement de l'information incertaine qui, de par leur architecture, sont capables de gérer l'incertitude et l'imprécision à différents niveaux du processus de modélisation. Dans ce chapitre, nous présenterons dans un premier temps le cadre théorique de la fusion qui peut être adaptée à l'étude des changements d'occupation et d'usage des sols. Une typologie de la fusion d'informations permettra de présenter deux approches de fusion intégrant l'incertitude et l'imprécision dans des processus de modélisation des changements : la théorie des Croyances de Dempster-Shafer et la théorie des Possibilités.

2.2. Une approche privilégiée : la fusion d'informations

Les règles de fusion d'information ont pour objectif général d'améliorer la connaissance d'un objet ou d'un phénomène observé en combinant différentes sources d'information qui peuvent être des images satellitaires, des données issues de campagne terrain, des expertises, des données statistiques… (Bloch, 1996). Le développement de modèles de fusion d'informations intégrant les notions d'incertitude et d'imprécision représente encore aujourd'hui une problématique de recherche en plein essor tant d'un point de vue théorique, que méthodologique et applicatif. Ainsi, si dans un premier temps, la fusion s'est développée dans le domaine militaire (Appriou, 1991), les règles de fusion sont depuis une dizaine d'années largement utilisées et appliquées dans des disciplines telles que les sciences environnementales, sciences sociales…(Simone et al., 2002; Tacnet et al., 2009; Zhang, 2010; Peijun et al., 2013). L'information est généralement divisée en deux types (Rouchouze, 1994): l'information numérique et l'information symbolique. L'information numérique comprend l'ensemble de l'information qui s'exprime sous forme de nombre comme les bandes spectrales d'une image satellitaires en niveau de gris, de modèles numériques de terrain… L'information dite

symbolique comprend elle, tout type d'information sous forme de symboles, de propositions, de règles d'association…elle est plus difficile à intégrer dans un processus de fusion d'informations. La fusion d'information repose sur une bonne prise en compte des imperfections de l'information afin d'obtenir la prise de décision la plus fiable possible. Deux aspects sont donc à intégrer : l'indépendance et la fiabilité des sources d'information. L'indépendance est souvent requise en fusion d'information, ceci dit, il est rare de rencontrer une indépendance statistique totale entre les sources d'information…c'est pourquoi, en fusion, on parle d'indépendance cognitive qui est moins restrictive. L'imperfection ou la fiabilité des sources est plus compliquée à estimer. Celle-ci peut correspondre à la fiabilité de la source à donner une information sûre et à la fiabilité de la source à donner une information (Martin, 2005a).

Afin d'énumérer les imperfections inhérentes à la plupart des informations spatialisées, prenons l'exemple suivant (adapté de (Djiknavorian, 2008)). Si on analyse le coefficient de rétrodiffusion d'une image Radar sur une parcelle en sol nu, on peut ainsi obtenir différents types d'information représentant le niveau de fiabilité de l'information (**Tableau 1**) :

Tableau 1- Différents types d'imperfection associés à une information

Information	Type d'imperfection
Le coefficient de rétrodiffusion est de -15 dB	Information parfaite
Le coefficient de rétrodiffusion se situe entre -10 et -20 dB	Information imprécise
Le coefficient de rétrodiffusion est probablement de -15 dB	Information confuse
Le coefficient de rétrodiffusion est autour de -15 dB	Information floue
La probabilité d'avoir un coefficient de rétrodiffusion de -15 dB est 60%	Information probabiliste
Le coefficient de rétrodiffusion est de -15 dB sur les parcelles de sol nu et sur la parcelle adjacente	Information non spécifique
Le coefficient de rétrodiffusion était de -15 dB en Janvier	Ignorance partielle
Je n'ai aucune idée du coefficient de rétrodiffusion	Ignorance totale

Les imperfections inhérentes à chaque source d'information apparaissent donc nombreuses : l'incertitude et l'imprécision associées aux sources d'information génèrent du conflit voire du paradoxe dans un processus de fusion (Bloch, 2003; Martin, 2005b; Smarandache & Dezert, 2009).

L'incertitude : elle caractérise le degré de conformité à la réalité d'une information. Une information incertaine constitue donc une connaissance partielle de la réalité, ce qui implique que pour mesurer l'incertitude, il est nécessaire de connaitre la réalité. Elle correspond donc à de l'ignorance partielle ou totale de la connaissance qui peut être objective (liée à l'information) ou subjective (liée à l'opinion de l'expert sur la réalité). Elle peut correspondre également à une mesure probabiliste et non spécifique. L'incertitude en fusion fait l'objet de nombreux travaux de recherche comme le montrent les développements menés sur les approches probabilistes (Bayes, 1763) ou sur la théorie des Croyances (Shafer, 1976; Yager et al., 1994).

L'imprécision : elle caractérise le contenu de l'information. Relative à l'information, elle mesure un défaut quantitatif de connaissance. On distingue l'imprécision floue et non floue. - Exemple 1: la parcelle mesure entre 2 et 3 hectares (la taille de la parcelle appartient à l'intervalle [2 ; 3], l'imprécis est ici non flou ; - Exemple 2 : les rendements seront environ de 80 quintaux à l'hectare (les rendements se situent autour de 80 q/ha de façon imprécise floue).

L'imprécision peut correspondre également à de l'information confuse. L'étude de l'imprécision a connu un fort développement avec la théorie des ensembles flous, puis la théorie des possibilités (Zadeh, 1978).

Malgré ces différences sémantiques, de fortes confusions existent encore entre les termes incertitude et imprécision. En effet, elles restent liées, la principale cause de l'incertitude d'une information provenant souvent de l'imprécision de l'information. De même, une incertitude peut induire l'imprécision.

Paradoxe : il caractérise un très fort niveau conflictuel entre les sources d'information, rendant inopérantes certaines règles de fusion de données (Zadeh, 1979; Corgne et al., 2004; Dezert et al., 2012). Il caractérise l'aspect contradictoire de deux sources d'information. Les origines du conflit proviennent de trois situations (Martin, 2005b) : les sources ne sont pas fiables (l'information est erronée et peut conduire à une ambigüité) ; le cadre de discernement, qui définit l'ensemble des classes étudiées, n'intègre pas l'objet étudié ; les sources d'information observent des phénomènes différents, la combinaison d'informations n'est pas pertinente. Deux sources d'informations peuvent en effet soutenir deux hypothèses totalement différentes. Ainsi, un pixel peut être classé en prairie à partir d'un capteur radar et le même pixel en maïs avec une image optique. La gestion de l'aspect paradoxal en fusion de l'information fait également l'objet de nombreuses recherches et a donné naissance au raisonnement plausible et paradoxal (Dezert, 2003; Smarandache & Dezert, 2009).

Si la théorie des probabilités ne permet de traiter que de l'information de type probabiliste, certaines théories peuvent prendre en compte différents niveaux d'imperfection. Ainsi, la théorie des ensembles flous permet de prendre en compte l'imprécision et le flou associés à une information. Cependant, un modèle qui permettrait la prise en compte de toutes les imperfections de l'information n'est pas encore disponible même si de nombreux travaux tentent d'unifier l'ensemble des théories dans un cadre mathématique (Smets, 1990; Smarandache & Dezert, 2009). La **Figure 4** expose un exemple des principales théories développées pour modéliser l'information sur les sols nus agricoles. Trois grandes méthodes de fusion d'information peuvent être appliquées: la fusion basée sur les probabilités, les approches floues et le raisonnement paradoxal. Dans le cadre de la modélisation probabiliste, on retrouve les approches bayésiennes et la théorie des croyances de Dempster-Shafer qui peut être considérée comme une généralisation de l'approche bayésienne. Concernant les approches floues, la théorie des possibilités et des ensembles flous sont les plus connues. Enfin, le raisonnement paradoxal développé par Dezert et Smarandache depuis 2003 apparait adapté lorsque les sources d'information sont conflictuelles. D'autres approches peuvent être considérées comme des méthodes de fusion mais elles sont associées à des traitements spécifiques tels que les classifications (Support Vector Machine, les réseaux de neurones, les réseaux bayésiens), les filtres de Kalman (association des données) et n'intègrent pas l'incertitude dans leur formalisme, elles ne seront donc pas présentées ici.

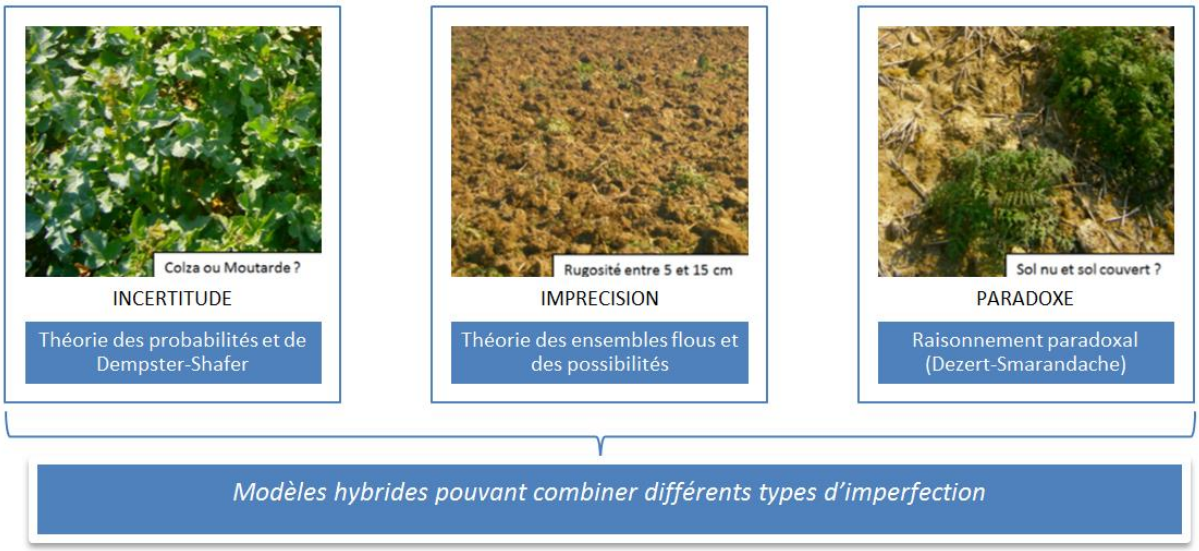


Figure 4- Les règles de fusion utilisées en fonction du type d'information

2.2.1. Architecture générale de la fusion d'information

Une architecture générale structure la fusion d'informations (Bloch, 2003; Martin, 2005a). Elle peut être divisée en quatre étapes : (1) la modélisation, (2) l'estimation, (3) la combinaison, (4) la décision (**Figure 5**). Ce type d'architecture est également appelé « modèle de type expert », l'expert étant une personne ou un groupe de personnes intervenant sur le type de modélisation à privilégier, le choix de la règle de combinaison et la prise de décision.

La modélisation : elle consiste à choisir le formalisme qui va représenter les informations à fusionner. Etape déterminante pour la suite du processus, elle est basée sur la connaissance de l'expert sur une problématique donnée et sur le type d'information disponible.

L'estimation : dépendante de la modélisation, et non systématique, elle consiste à estimer les distributions des informations à fusionner à travers des analyses statistiques et/ou géostatistiques par exemple.

La combinaison : au centre d'un processus de fusion, cette opération consiste à choisir un opérateur adapté au formalisme de la modélisation. Les propriétés des différentes règles de combinaison d'information sont l'associativité, la commutativité, l'idempotence et l'adaptabilité, qui, très souples, permettent de conserver la nature de l'information.

La décision : dernière étape du processus de fusion, le choix du critère de décision se fait en fonction du formalisme étudié et « à dire d'expert », c'est-à-dire selon les connaissances de l'opérateur sur la problématique étudiée. De multiples critères peuvent être définis afin de permettre une optimisation de la prise de décision.

L'expertise apparaît fondamentale dans un processus de fusion d'informations puisque l'opérateur choisit le formalisme à adopter pour étudier une problématique environnementale, comme par exemple les règles de combinaison à appliquer et le type de règle de décision à adopter.

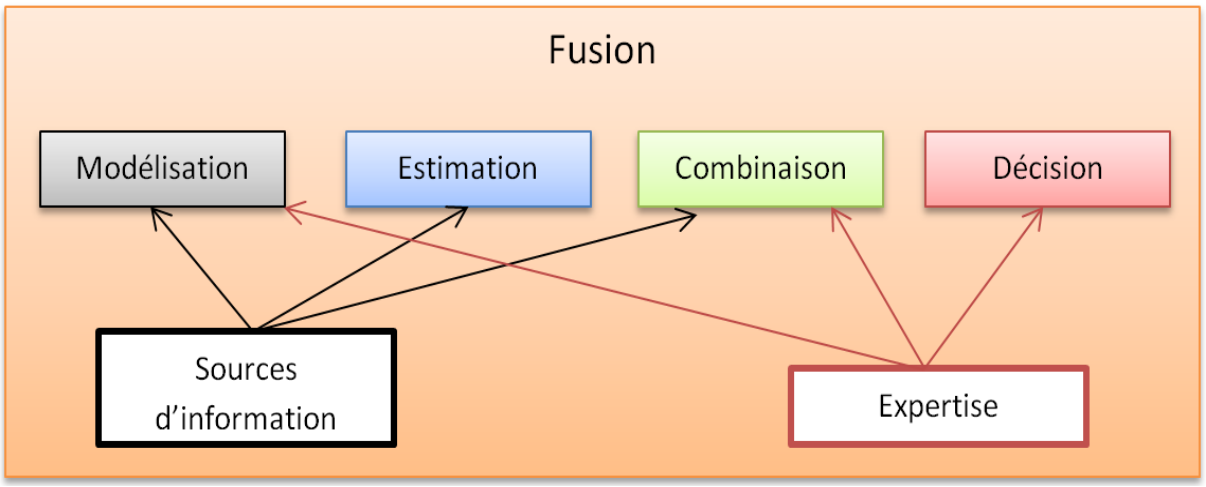


Figure 5- Représentation générale d'un processus de fusion d'informations (d'après Martin, 2005b)

2.2.2. Niveaux de fusion

Trois niveaux de fusion peuvent être distingués :

La fusion de données ou fusion de bas niveau qui correspond à la fusion d'informations provenant directement de capteurs satellitaires par exemple (i.e. fusion d'images multi spectrales avec la bande panchromatique).

La fusion d'indicateurs ou fusion de moyen niveau qui peut correspondre à la combinaison de paramètres de texture, d'un indice de végétation, de variables biophysiques, paramètres polarimétriques… provenant d'une image satellitaire.

La fusion de décisions ou fusion de haut niveau qui correspond à la fusion d'informations de bas et moyen niveau avec des décisions.

La **Figure 6** illustre les différents niveaux de fusion que nous pouvons rencontrer dans un processus de fusion appliqué à la caractérisation de l'occupation des sols. On y retrouve ainsi l'étape de sélection et transformation des données brutes qui sont généralement indispensables pour la plupart des applications. Avec ces trois niveaux, données, indicateurs et décisions, il est donc possible de fusionner des données pour obtenir des indicateurs (détection de contours par exemple) ou des décisions dans le cadre de classifications d'images satellitaires. La fusion d'indicateurs permet de créer de nouveaux indicateurs ou optimiser une décision et enfin, la fusion de décision, appelée « de haut niveau » permet de synthétiser cette information pour une décision optimale. Cette figure permet de voir également les différentes possibilités de fusion sur plusieurs niveaux comme la fusion de données et d'indicateurs entre eux pour produire de nouveaux indicateurs et optimiser les décisions ou la fusion des trois niveaux conjointement pour la prise de décision.

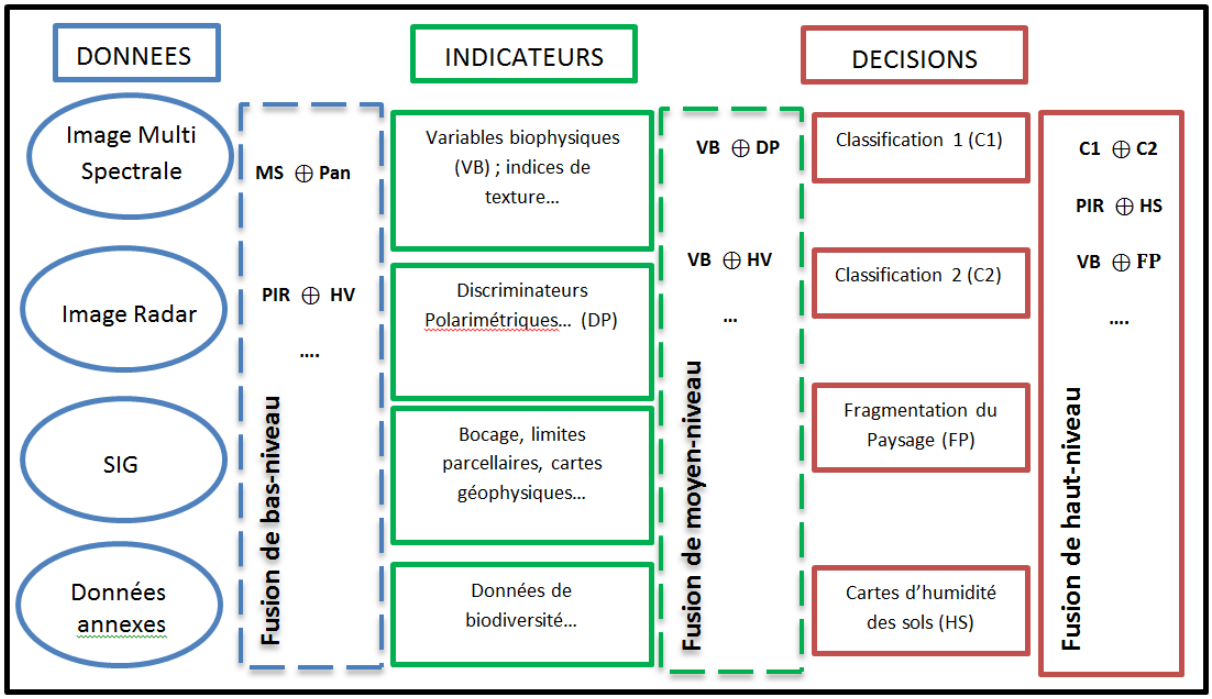


Figure 6- Représentation des différents niveaux de fusion d'information sur une problématique environnementale

2.2.3. Règles de fusion

Les trois règles de fusion principales que sont la théorie des Croyances de Dempster-Shafer (DST), la théorie des possibilités ou des ensembles flous et la théorie du raisonnement plausible et paradoxal de Dezert-Smarandache (DSmT) sont synthétisées dans le **Tableau 2.** Elles sont toutes construites autour des quatre composantes qui composent un processus de fusion d'information :

(1) la modélisation où l'on retrouve pour la DST et la DSmT la définition d'un cadre de discernement avec une union des hypothèses pour la DST et en plus de l'union, une intersection de ces dernières pour la DSmT. Cette intersection permet de prendre en compte l'aspect paradoxal de l'hypothèse étudiée (i.e. une parcelle en sol nu à peu couvert qui correspond à du sol nu ET du sol couvert). Pour la théorie des ensembles flous introduite par (Zadeh, 1978), puis développée par (Dubois & Prade, 1985) qui donnera la théorie des Possibilités, la modélisation permet une modélisation très souple de l'imprécision et/ou l'incertitude. Elle est basée sur la définition de fonctions d'appartenance sur des classes d'occupation des sols par exemple bien distinctes.

Tableau 2- Caractéristiques générales des trois principales règles de fusion d'information

	Dempster-Shafer	Dezert-Smarandache	Ensemble flous
Modélisation	**-Cadre de discernement** Θ $D_i = \{d_1, d_2, d_3, \ldots\ldots\ldots, d_N\}$ **-Fonctions de masse** m(Ø) = 0 et Σ m (A) = 1 où A $\subseteq \Theta$ **-Fonction de croyance** $Cr(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B)$ **-Fonction de Plausibilité** $PL(A) = \sum_{A \cap B \neq \emptyset} m(B)$ $Cr(A) \leq Ic(A) \leq Pl(A)$	**-Cadre de discernement** Θ Θ = {A, B} D^{Θ} = {Ø, A, B, A $\cup$ B, A $\cap$ B} et $\lvert D^{\Theta} \rvert = 5$ **-Fonctions de masse** m(Ø) = 0 et Σ m (A) = 1 où A $\subseteq \Theta$ **-Fonction de croyance** $Cr(A) = \sum_{B \in D^{\Theta}, B \subseteq A} m(B)$ **-Fonction de Plausibilité** $Pl(A) = \sum_{B \in D^{\Theta}, B \cap A \neq 0} m(B)$	**-Soit un sous ensemble A de X caractérisé par la fonction d'appartenance** μ_A**:** $f^a : X \rightarrow [0,1]$ $h(A) = sup\{\mu_A(x) \mid x \in X\}$ $supp(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) > 0\}$ $noy(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) = 1\}$ $\alpha - coupe(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) \geq \alpha\}$
Estimation	« Expertise », Modèles de transfert de masse, méthodes multi-critères, fonctions d'appartenance floues…	« Expertise », « Proportional Conflict Redistribution rule (PCR), méthodes multi-critères…	« Expertise » Modèles statistiques (fonction sigmoïde, tangeante hyperbolique, gaussienne, exponentielle…)
Combinaison	$m(C) \equiv [m_1 \oplus m_2](C) = \frac{\sum_{A \cap B = C} m_1(A) m_2(B)}{1 - \sum_{A \cap B = \phi} m_1(A) m_2(B)}$	$\forall C \in D^{\Theta}$, $m(C) = [m_1 \oplus m_2](C)$ $= \sum_{A, B \in D^{\Theta}, A \cap B = C} m_1(A) m_2(B)$	**-Opérateurs de ZAdeh** $\min(\mu_A(x), \mu_B(x))$ $\max(\mu_A(x), \mu_B(x))$ **-Opérateurs probabilistes** $\mu_A(x) \times \mu_B(x)$ $\mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \times \mu_B(x)$…
Décision	le maximum de crédibilité ; le maximum de plausibilité ; les règles basées sur l'intervalle de confiance; la probabilité pignistique et la décision par maximum de vraisemblance	le maximum de crédibilité ; le maximum de plausibilité ; les règles basées sur l'intervalle de confiance; la probabilité pignistique généralisée	Maximum de degré d'appartenance
Références	(Appriou, 1991; Saaty, 1977; Shafer, 1976; Smets, 1990)	(Dezert, 2003; Smarandache and Dezert, 2009)	(Bouchon-Meunier et al., 1998; Dubois and Prade, 1985; Zadeh, 1978)

(2) L'estimation des sources d'information demeure un enjeu fondamental et fait toujours l'objet de recherches spécifiques. Elle consiste donc à associer une « mesure de croyance » aux sources d'information à combiner. Pour la DST et la DSmT, de nombreuses méthodes ont été développées (Saaty, 1977; Smets, 1990; Appriou, 1999) comme les méthodes multicritères, les modèles de transfert de masse pour la DST et les PCR (Smarandache & Dezert, 2009) pour la DSmT. Les modèles statistiques sont le plus souvent utilisées pour les ensembles flous, cependant pour chaque théorie, on peut combiner plusieurs méthodes selon la problématique étudiée.

(3) La combinaison des sources d'information est la règle d'inférence utilisée pour fusionner les sources d'information. Si la règle de DST est une règle générique qui combine à peu près toutes les sources d'information, elle présente des résultats incohérents lors de forts conflits entre les sources d'information. La DSmT apparaît dans ce cas comme la règle de combinaison la plus fiable. Pour les ensembles flous, de nombreuses règles existent dépendant également du niveau de conflit entre les sources (Dubois & Prade, 2004). On peut distinguer ici les opérateurs de Zadeh, les opérateurs probabilistes… Ces règles de fusion reposent finalement sur la conjonction des sources d'information (c'est-à-dire, avec un « ET » logique donnant une combinaison stricte de l'information) ; la disjonction de ces dernières (c'est-à-dire

un « OU » logique impliquant une combinaison de l'information plus large) et des combinaisons de compromis basés sur des intervalles de confiance (combinaison intermédiaire).

(4) la prise de décision reste délicate et là également de nombreuses règles de décision existent. Pour la DST et DSmT, la crédibilité peut être définie comme une décision « pessimiste ou à minima» et la plausibilité comme une décision « optimiste ou a maxima ». La probabilité pignistique, mesure intermédiaire entre les deux, apparaît généralement être un bon compromis. L'intérêt majeur de ces règles de décision repose sur le fait que la décision prise n'est pas binaire, elle permet ainsi d'estimer la fiabilité de notre choix et de mesurer son incertitude.

2.3. Problématiques et axes de recherche majeurs

Mes travaux s'inscrivent dans les quatre grands thèmes de recherche identifiés par la communauté scientifique du « Land Use Science», c'est-à-dire (**Figure 7**) : (1) l'observation et le suivi des changements d'occupation des sols, (2) l'identification des facteurs de changements, (3) la modélisation des changements d'occupation des sols et (4) l'évaluation de l'impact de ces changements sur l'environnement et les sociétés.

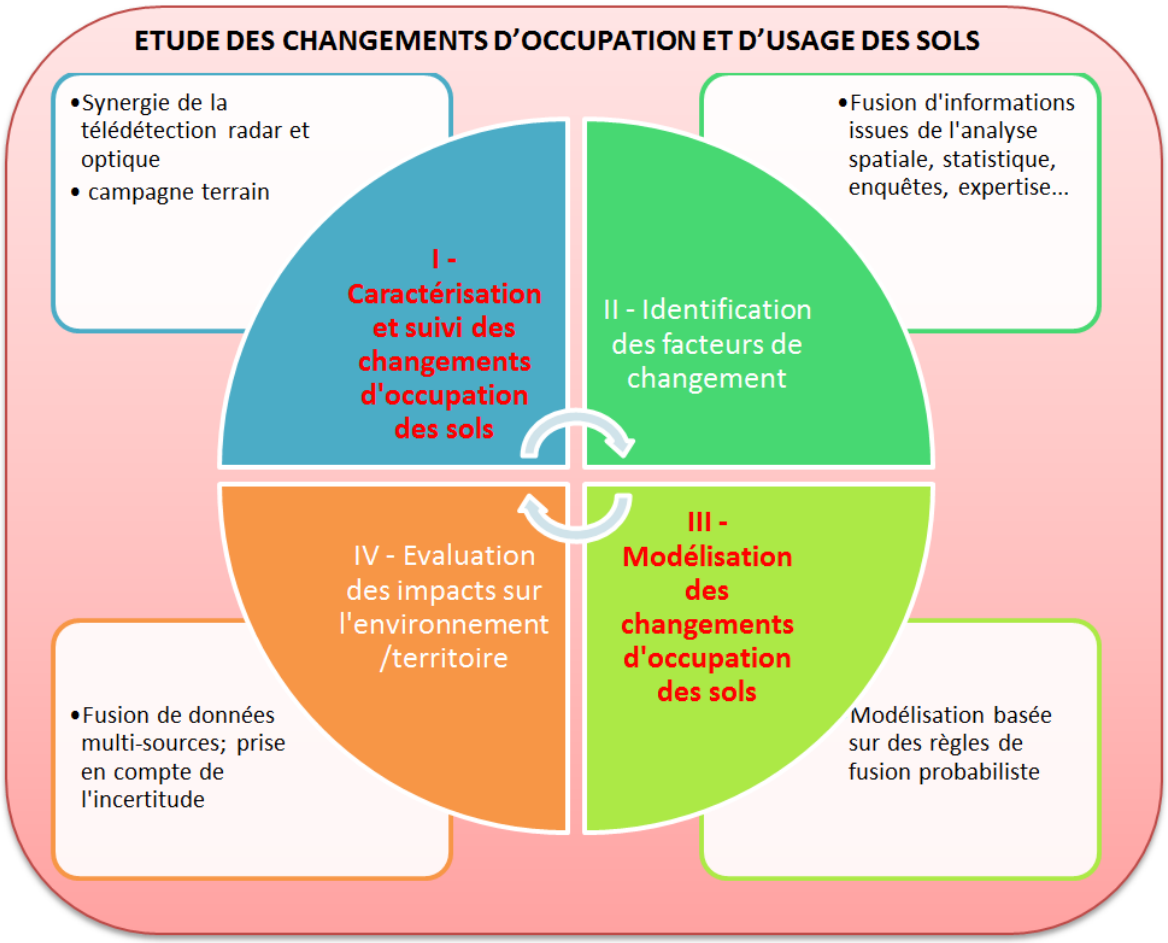


Figure 7- Positionnement de mes recherches et méthodologies privilégiées pour l'étude des changements d'occupation et d'usage des sols sur les territoires agricoles.

Pour étudier les changements d'occupation et d'utilisation des sols, j'ai choisi de privilégier la télédétection à haute et très haute résolution spatiale, l'approche méthodologique développée étant basée sur la fusion d'information à partir de règles de combinaison « floue ou incertaine ». Cette approche se justifie par le caractère incertain et aléatoire des changements d'occupation des sols étudiés en contexte agricole caractérisé par de multiples facteurs de changements (d'ordre économique, climatique, environnemental…). Cette approche permet ainsi dans le cadre de mes recherches d'évaluer : (1) la synergie de la télédétection optique et radar pour une plus fine caractérisation de l'occupation et usage des sols, (2) les méthodes de détection des changements pour une meilleure identification des facteurs de changement, (3) les modèles portant sur l'étude des changements d'occupation des sols pour une meilleure compréhension des territoires étudiés, (4) les scénarios prédictifs (à court et moyen terme) et leurs interactions avec l'environnement...

Les terrains d'étude sur lesquels portent mes recherches sont caractérisés par des forts conflits d'usage ou/et une forte pression anthropique sur les ressources qui impactent plus ou moins fortement l'environnement. Ils sont analysés et modélisés comme des systèmes complexes à l'interface Nature/Société à travers des approches généralement fortement interdisciplinaires et s'inscrivent dans des programmes de recherche nationaux et internationaux. Ainsi, mes travaux de recherche sont menés sur des territoires agricoles en Bretagne (Zone Atelier Armorique, bassin versants…) mais aussi des territoires situés dans des secteurs agricoles de pays de la zone intertropicale (Afrique de l'Ouest, Argentine, Inde du sud…). Les sites bretons, fortement calibrés et instrumentés grâce à des programmes pluridisciplinaires, servent ainsi de « sites expérimentaux », les méthodes mises au point dans la région Bretagne devant pouvoir être transposables en milieu intertropical.

Parmi les programmes interdisciplinaires développés en Bretagne, on peut citer ici le programme CLIMASTER, PSDR GO (2008 – 2012), « Changement climatique, systèmes agricoles, ressources naturelles et développement territorial coordonné par P. Mérot (UMR 1069 SAS, INRA) regroupant de nombreuses équipes de recherche (CNRS, INRA, IRSTEA, Universités…) ainsi que de nombreux acteurs et gestionnaires locaux (Chambre d'Agriculture, collectivités territoriales…). Le programme de recherche Pour et Sur le Développement Régional dans le Grand Ouest (PSDR GO) a été initié par l'INRA et le CEMAGREF, en partenariat avec les Régions : Basse-Normandie, Bretagne, Pays de la Loire et Poitou-Charentes. Ses objectifs visaient à analyser dans le cadre du Changement Climatique, les processus de développement territorial et plus particulièrement le rôle et à la place des activités agricoles et agroalimentaires du Grand Ouest de La France ; à apporter une contribution opérationnelle au développement territorial à travers la fourniture d'outils et méthodes pour ses acteurs, dans une démarche de co-construction. Responsable du Volet VR2 « Changements climatiques et changements des pratiques agricoles avec A. Jouannon (INRA) ». L'organisation de ce VR2 consistait à 1) observer par télédétection des pratiques agricoles, 2) évaluer les changements de pratiques en cours dans les exploitations agricoles, 3) modéliser les jours agronomiquement disponibles et 4) faire une synthèse des résultats obtenus par les trois approches à l'échelle du Grand Ouest.

La participation à plusieurs volets de recherche de programmes de l'ANR (Biodiversité, Systerra) comme le projet « BIODIVAGRIM » : Conservation de la biodiversité dans les agro-

écosystèmes : une modélisation spatialement explicite des paysages (Coordination : V. Bretagnolle ; UPR 1934 CNRS), le projet « ACASSYA» : Accompagner l'évolution agro-écologique des systèmes d'élevage dans les bassins versants côtiers (Coordination : C. Gascuel ; UMR 1069 SAS, INRA) ou le projet DIVA 3-AGRICONNECT ; Continuités écologiques dans les paysages agricoles (coordination : F. BUREL ; ECOBIO UMR 6553, CNRS) concerne également des territoires agricoles bretons. L'étude des changements d'occupation et d'usage des sols représente ici une source d'information clé pour chacun de ces programmes. Ils offrent ainsi la possibilité de développer des méthodologies innovantes de détection et de modélisation des changements observés à fine voire très fine échelle. Par ailleurs, la composante interdisciplinaire de ces programmes offre la possibilité d'analyser ces changements et leurs interactions avec les territoires étudiés (biodiversité, économie, écologie…).

Au niveau international (**Figure 8**), mes recherches s'inscrivent dans le cadre d'un partenariat académique privilégié avec le Canada. Mon statut de professeur associé à l'Université de Sherbrooke (Québec) me permet ainsi de développer des échanges académiques (étudiants, professeur invité, stage doctoral, etc.) et des programmes de recherche (Conseil franco-québécois de coopération universitaire, Agence Spatiale Canadienne…) entre le Québec et l'Université Rennes 2. Mes recherches s'inscrivent également dans le cadre de programmes de recherche internationaux où l'étude des changements d'occupation et d'usage des sols sont analysés dans le contexte du changement global. On peut citer ici le programme : IFCPAR/CEFIPRA – AICHA : Adaptation of Irrigated agriculture to climate CHAnge (2013 – 2015). Programme Bilatéral entre la France et l'Inde (Coordination : L. Ruiz ; INRA et S. Muddu ; Université de Bangalore). Ce programme s'inscrit dans le contexte du changement climatique et d'une agriculture de plus en plus dépendante des eaux souterraines pour l'irrigation où il apparait crucial de développer des méthodes fiables d'évaluation de la durabilité des systèmes de culture actuels et de scénarios alternatifs. Ce projet, qui vient de débuter, vise à développer un modèle intégré (agronomie, hydrologie, économie) permettant de tester des scénarios d'évolution des systèmes agricoles et de politiques de gestion de l'eau, à l'échelle de l'exploitation agricole et à celle du bassin versant, dans le cas d'un bassin versant expérimental dans le Sud de l'Inde. La méthodologie développée combine télédétection, enquêtes de terrain et modélisation inverse, pour acquérir et spatialiser les variables biophysiques pertinentes, les déterminants des systèmes de culture et les facteurs socio-économiques. Un modèle de décision des pratiques agricoles sera développé pour étudier l'adaptabilité des systèmes de culture à des contextes climatiques ou économiques changeants. Responsable du WP3 "AICHA-2D: "Impact of spatial interactions on the sustainability of farming systems under climate change at the watershed scale"; Task 3-2: Land use change, crop variables and soil moisture from remote sensing, mes travaux portent ici sur l'utilisation de données radar polarimétriques pour la caractérisation des pratiques agricoles sur un bassin versant d'agriculture intensive.

Pour l'ensemble de ces programmes de recherche, la caractérisation et le suivi de l'occupation et de l'usage des sols par télédétection représentent un axe de recherche majeur. Source d'information de base à toute étude des changements d'occupation des sols, elle représente sur les territoires agricoles un défi important tant les variations spatiotemporelles sont importantes. Elle fait donc l'objet de travaux de recherche spécifiques visant à améliorer la qualité de cette information spatialisée utilisée ensuite dans les processus de modélisation. Pour cela, la télédétection qui représente l'outil d'analyse privilégié pour cette thématique et

qui connait un développement continu depuis 30 ans (diversification de l'offre satellitaire, amélioration continue des résolutions spatiales, temporelles, radiométriques…), offre de nouvelles perspectives de recherche qui sont évaluées ici dans le cadre de programmes de recherche interdisciplinaires et internationaux. Le deuxième chapitre se focalise ainsi sur les développements méthodologiques et les principaux résultats obtenus dans ce domaine.

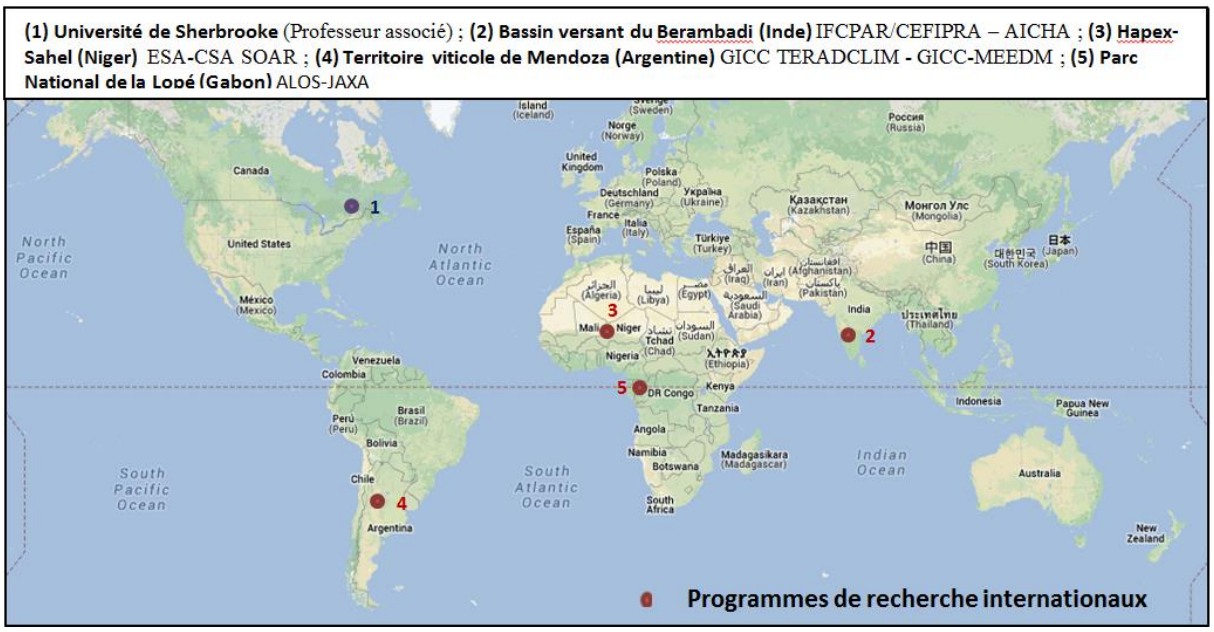


Figure 8- Localisation des programmes de recherche internationaux (depuis 2010)

CHAPITRE 2- ETUDE DES CHANGEMENTS D'OCCUPATION ET D'USAGE DES SOLS PAR TELEDETECTION OPTIQUE ET RADAR

1. La télédétection : une information spatialisée de base pour l'étude des changements d'occupation des sols

Le suivi des changements d'occupation et d'usage des sols est, depuis maintenant plusieurs décennies, généralement effectué à partir de données de télédétection (Hubert-Moy et al., 2001; Turner et al., 2007). Les images à haute résolution de type Landsat TM, SPOT ou radar, d'une précision décamétrique à métrique, permettent ainsi de réaliser des cartographies des successions culturales à l'échelle de la parcelle sur de grands espaces, l'analyse des changements étant produite à l'échelle de territoires agricoles aux tailles variées (site expérimental, bassin versant…). A une échelle infrarégionale, correspondant à des secteurs dont la superficie varie en général d'une dizaine de km² à plusieurs centaines de km², les images permettent d'effectuer, à l'aide de données d'origines diverses (socio-économiques, fonctionnement physique du milieu…) des analyses multi temporelles des changements observés par télédétection. Caractériser l'occupation des sols sur les territoires agricoles à une date donnée et effectuer leur suivi demeurent des objectifs ambitieux. Les dynamiques paysagères sont en effet multiples et complexes car elles sont liées entre autre aux pratiques agricoles et rotations culturales qui dépendent eux même d'autres facteurs (climatique, économique, social, politique…). A titre d'exemple, la **Figure 9** illustre les niveaux scalaires et les facteurs de changement de la couverture hivernale des sols que l'on peut rencontrer sur un bassin versant agricole breton (Corgne, 2004a).

- A l'échelle du bassin versant, les mesures environnementales prises par différentes institutions (la Région, le Département, les syndicats de bassins versants, les associations…) sont les principaux facteurs qui interviennent dans les changements d'occupation des sols. Cependant, des conditions climatiques exceptionnelles (inondation ou sécheresse) peuvent également avoir un impact sur la gestion de la couverture hivernale des sols.

- A l'échelle de l'exploitation, la prise en compte de données socio-économiques (primes, statut et âge de l'exploitant…) et physiques (pédologie, morphologie des parcelles, présence d'éléments bocagers…) doit permettre d'identifier les facteurs ou variables expliquant les changements d'occupation du sol. A ce niveau d'étude, une base de données importante, mise à disposition par les acteurs locaux, est requise afin de pouvoir spatialiser ces différents facteurs.

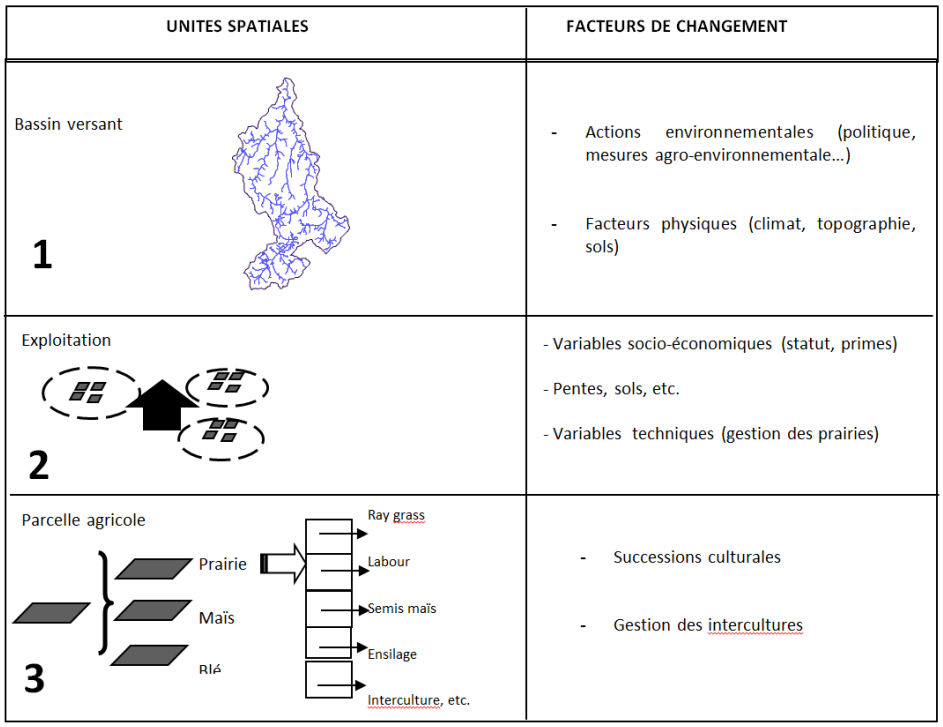
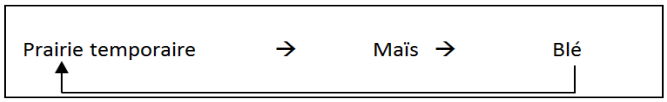


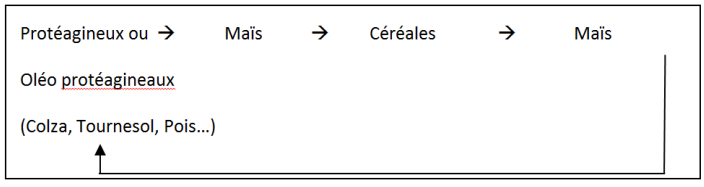
Figure 9- Echelles spatiales et facteurs de changements de l'occupation du sol (Corgne, 2004)

- A l'échelle parcellaire, le suivi des cycles de successions culturales représente le principal facteur explicatif des changements observés. Les différents systèmes de production répertoriés sont à prendre en compte et à mettre en relation avec des itinéraires techniques et des types de rotations culturales. En Bretagne, plusieurs systèmes de production peuvent être identifiés et rattachés à des rotations « type » ; Parmi ceux-ci, deux systèmes de production dominants peuvent être cités :

Les systèmes de production « laitier » où l'on retrouve des cycles de rotation intégrant des céréales et des prairies de type temporaire (les surfaces non accessibles par le cheptel sont généralement exclusivement réservées à la culture) :



Les systèmes de production hors sol (porcs, volailles) intègrent des rotations avec des successions plus complexes comprenant des protéagineux et une part importante de maïs grain :



La prise en compte des échelles temporelles dans la gestion de l'occupation hivernale du sol représente également un enjeu important. Des changements observés peuvent ainsi correspondre à des actions qui s'inscrivent dans le court, le moyen ou le long terme (**Figure 10**). Les projets relatifs à la gestion du paysage tels que des remembrements génèrent par exemple des changements d'occupation hivernale du sol qui ont un impact significatif à long terme sur

de grandes superficies. Au contraire, au niveau des pratiques agricoles, une prairie retournée suivi d'un maïs ne sera que très peu de temps en sol nu. Une échelle intermédiaire concerne la gestion des successions culturales qui peut s'étaler sur une période allant de 5 à 10 ans. La prise en compte de l'aspect temporel est donc indispensable pour la compréhension des changements observés, une identification des différentes échelles de temps permet ainsi de dégager des tendances d'évolution de l'occupation du sol sur le court et le long terme.

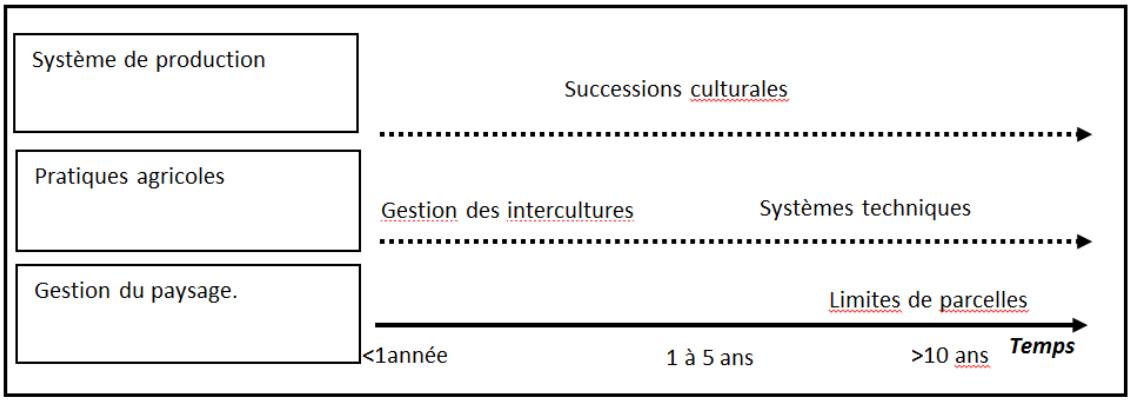


Figure 10- Dynamiques temporelles des changements d'occupation du sol pendant l'hiver (Corgne, 2004)

Si l'offre satellitaire était encore assez réduite dans les années 1990 – 2000 où seuls quelques pays (Europe, Amérique du Nord…) développaient des programmes spatiaux d'observation de la terre (SPOT, Landsat, MODIS, etc.), celle-ci a depuis les années 2000 considérablement augmenté avec notamment l'arrivée sur le marché des pays émergents (Inde, Chine, Brésil, Afrique du Sud…). Ainsi, en 2011, on dénombre près de 120 satellites d'observation de la terre opérationnels (civil et militaire), près de 240 étant programmés pour 2021, soit une augmentation de 30% par rapport aux dernières décennies (Euroconsult, 2012). La **Figure 11** illustre cette tendance avec une nette augmentation des lancements à partir des années 2000.

L'imagerie satellitaire radar, longtemps caractérisée par de faibles résolutions spatiales et une information radiométrique moins riche que l'imagerie optique, était peu ou pas utilisée par les géographes pour l'étude des changements d'occupation et d'usage des sols. Cependant, on constate là aussi un fort développement de ces capteurs depuis les 5 dernières années (**Figure 12**).

Le récent développement des satellites radar depuis les années 2000 s'est accompagné d'une amélioration sensible des capacités d'acquisition de ces capteurs. Quatre types de données radar peuvent ainsi être identifiées :

- L'altimétrie radar (télémétrie)
- L'interférométrie radar (modélisation de la surface, MNT)
- L'imagerie radar (intensité du signal rétrodiffusé)
- La polarimétrie radar (intensité du signal rétrodiffusé et polarisation)

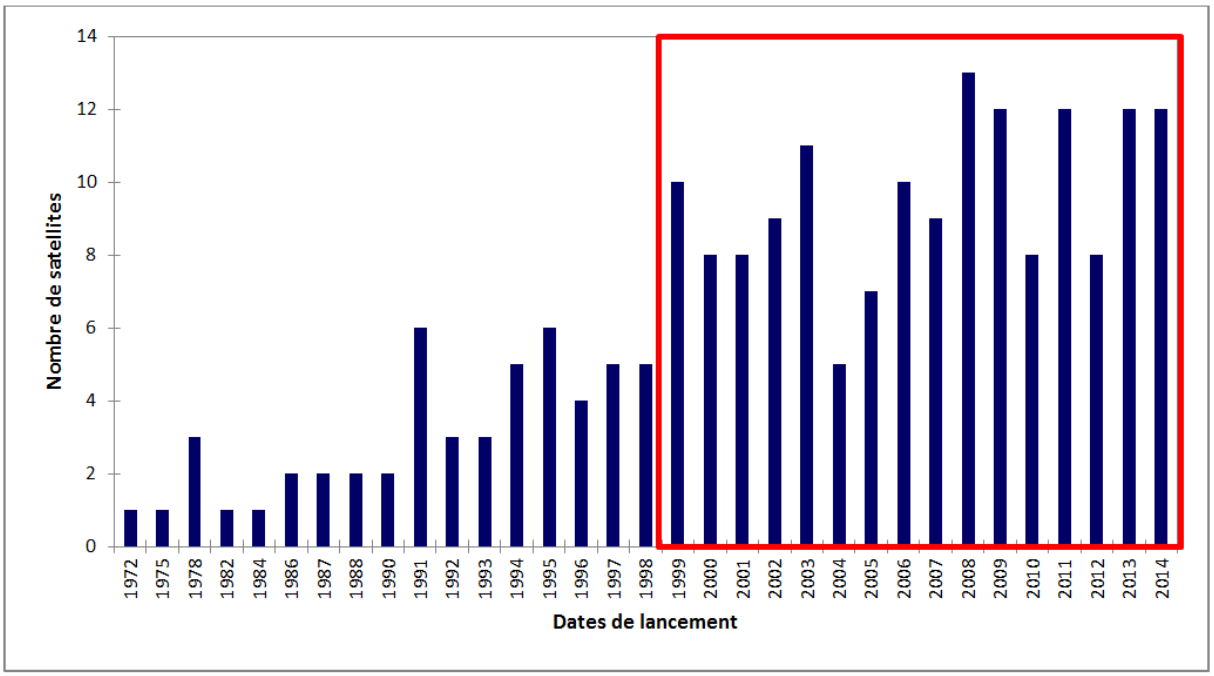


Figure 11- Nombre de satellites civil d'observation de la terre lancés depuis 1972 (source : Université de Twente)

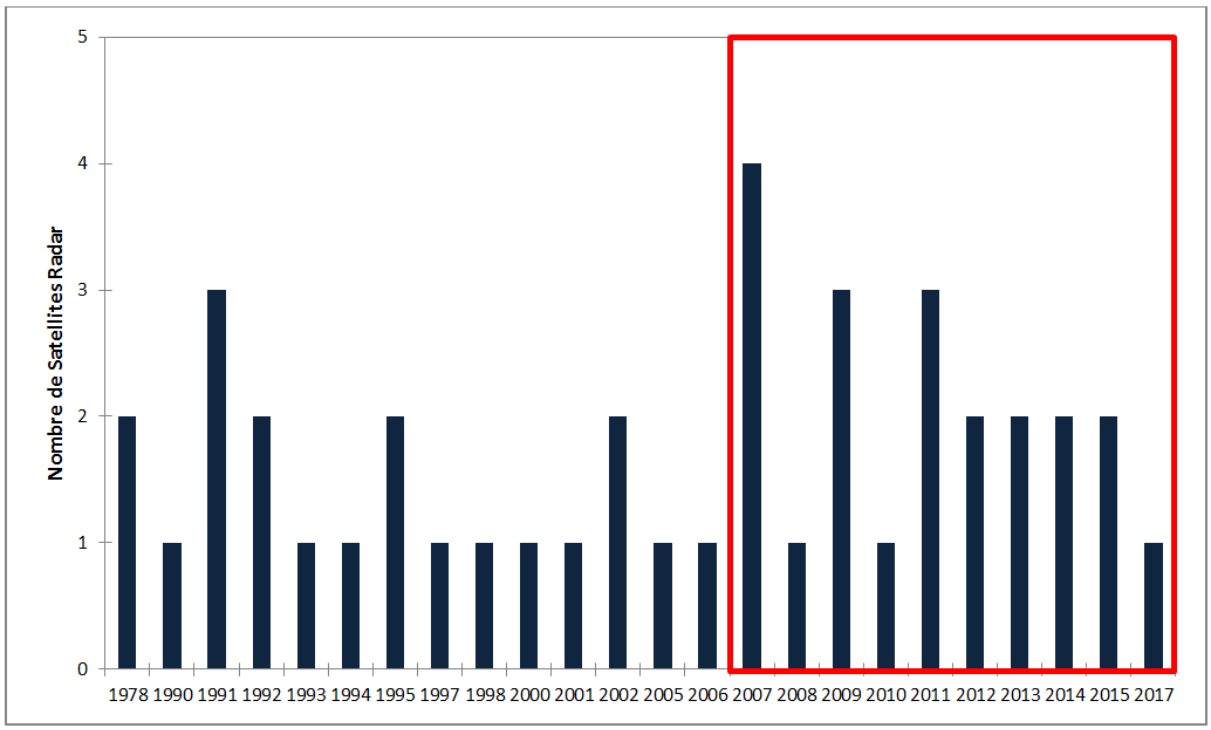


Figure 12- Nombre de satellites civil Radar lancés depuis 1978 (source : Université de Twente)

Pour l'étude des changements d'occupation et d'usage des sols, l'imagerie et la polarimétrie radar à haute résolution spatiale sont les plus utilisées par la communauté du « Land Use Science ». Produisant leur propre source d'énergie (hyperfréquences comprises entre 0.3 et 12 GhZ), la télédétection radar présente l'immense avantage de pouvoir acquérir de l'information de jour comme de nuit quelle que soit la couverture nuageuse. Les agences spatiales nationales (Centre National d'Etudes Spatiales, CNES) et internationales (Agence

Spatiale Européenne, ESA ; Agence Spatiale Canadienne, ASC ; Agence Spatiale Japonnaise, JAXA ; Agence Spatiale Allemande, DLR…) développent ainsi des programmes de recherche ambitieux pour l'évaluation de leurs capteurs dans lesquels mes activités de recherche sont insérées. La combinaison de données radar avec l'imagerie optique offre ainsi de nouvelles perspectives de recherche pour la caractérisation et le suivi des changements d'occupation des sols. Les potentialités de l'imagerie radar sont entre autre évaluées dans le cadre des activités du GIS-BRETEL (Groupement d'Intérêt Scientifique – Bretagne Télédétection) dont le laboratoire LETG Rennes COSTEL est membre. Le GIS BRETEL a pour mission d'exploiter l'imagerie réceptionnée via VIGISAT dans le cadre de programmes de recherche internationaux notamment le programme européen GMES (Global Monitoring for Environnent and Security). Plus précisément, sur la partie continentale, les objectifs définis par le GIS sont les suivants :

- Identification et caractérisation des unités de surface : occupation du sol, usage des sols, pratiques agricoles, trame verte (linéaire bocager, forêt…), trame bleue (surfaces en eau, ripisylve, zones humides…)
- Evaluation de processus : évolution de surfaces inondées, phénologie de la végétation, implantation des intercultures durant la saison hivernale…
- Identification et suivi des successions culturales

L'imagerie radar reste en effet sous exploitée dans les programmes de recherche portant sur les changements d'occupation et d'usage des sols qui généralement utilisent uniquement l'imagerie optique. Cependant, la couverture nuageuse limite fortement la caractérisation et le suivi des changements d'occupation et d'usage des sols. Elle représente ainsi une limite majeure pour caractériser par exemple l'occupation hivernale des sols dans les milieux tempérés ou le type de couverts végétaux durant la saison des pluies dans les milieux intertropicaux. Outre le fait que l'imagerie radar s'affranchit des conditions climatiques, elle présente un intérêt évident pour caractériser les états de surface (rugosité, humidité de surface). La polarimétrie radar, technologie récente développée sur certains capteurs, présente également un fort potentiel pour identifier et suivre les changements d'occupation des sols. Leur combinaison avec l'imagerie optique apparait ainsi comme un défi scientifique majeur pour affiner la caractérisation des changements d'occupation des sols. L'imagerie optique a en effet également connu un très fort développement ces 10 dernières années. La tendance observée va vers une plus haute résolution spatiale et temporelle des capteurs avec le développement de programmes spatiaux ambitieux comme le programme Pléiades et Sentinel du CNES et de l'Agence Spatiale Européenne. La combinaison des deux sources d'information offre ainsi de nouvelles perspectives de recherche visant à une amélioration de la caractérisation et du suivi des changements d'occupation des sols à échelle fine.

2. Evaluation de l'imagerie radar et de sa combinaison avec l'imagerie optique pour la caractérisation de l'occupation et de l'usage des sols

Dans cette partie, nous présentons les bases théoriques de la polarimétrie radar et ses potentialités pour l'observation et le suivi de l'occupation des sols en contexte agricole. Deux exemples d'application portant sur la caractérisation de la couverture hivernale des sols réalisés dans le cadre du GIS BRETEL sont ensuite exposés.

2.1. Utilisation de l'imagerie radar polarimétrique pour la caractérisation de la couverture hivernale des sols en Bretagne

Dans les territoires d'agriculture intensive comme la Bretagne, la caractérisation de la couverture hivernale des sols représente un enjeu environnemental important, notamment sur la qualité de l'eau. En effet, durant cette période d'interculture généralement pluvieuse, la présence ou pas de végétation peut avoir un impact direct sur les transferts de flux polluants (nitrates, pesticides…) provenant des parcelles agricoles vers les cours d'eau (Dabney et al., 2001). Dans ce contexte, la connaissance des variations spatio-temporelles de l'utilisation et de l'occupation des sols constitue un élément-clé dans une démarche de restauration de la qualité de l'eau. La détermination des classes d'occupation des sols en hiver peut être réalisée à partir du niveau de couverture de végétation des parcelles défini par télédétection. Ainsi, à partir d'une image à haute résolution spatiale de type SPOT, on distingue les sols couverts, et les sols nus à peu couverts. Ces deux classes peuvent être déterminées à partir d'un indice de végétation, le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), seuillé à l'aide de contrôles effectués sur le terrain, et validé par un croisement avec des données de télédétection acquises a posteriori (Lambin & Strahler, 1994; Corgne et al., 2002). L'utilisation d'une image du printemps ou de l'été suivant permet de déterminer les sols nus « véritables », c'est-à-dire majoritairement suivis d'un maïs, et de préciser le mode d'occupation des parcelles pendant l'hiver : sols nus précédant un maïs, céréale d'hiver qui à la date de prise de vue est détectée en sol nu grâce à sa faible couverture végétale, intercultures, repousses de végétation spontanées après les récoltes.

Cependant, la caractérisation et le suivi des intercultures restent peu étudiés à partir d'images optiques car la couverture nuageuse est généralement trop importante durant l'hiver pour pouvoir acquérir des images exploitables. Par ailleurs, l'imagerie optique ne permet pas l'identification de certaines pratiques culturales sur les parcelles en sol nu à peu couverts (labours profonds, superficiels, résidus de culture…) où l'absence d'activité chlorophyllienne limite leur extraction (Daughtry, 2001). Les potentialités de la polarimétrie radar pour la caractérisation des sols nus à peu couvert ont déjà été évaluées sur des paysages agricoles ouverts (McNairn et al., 2002) et ont montré leur intérêt pour discriminer certaines pratiques culturales sur les sols nus (labours, résidus de culture…). L'objectif vise ici à évaluer l'apport de la polarimétrie radar pour la caractérisation des sols nus en contexte agricole bocager en Bretagne (Corgne et al., 2012c, 2012d). Plusieurs objectifs spécifiques sont identifiés :

- L'identification des sols nus des sols couverts par la végétation à l'échelle parcellaire
- La caractérisation de la rugosité des sols nus : surface « lisse » ou « rugueuse »
- L'extraction de l'humidité des sols nus

❖ Site d'étude et données

Nous disposons pour cette étude d'une image Radarsat-2 (**Tableau 3**) pleinement polarimétrique acquise le 10 février 2011 sur le bassin versant expérimental du Yar en Bretagne (Vigisat ©). Situé à l'extrême nord-ouest du département des Côtes d'Armor, en limite du département du

Finistère, ce bassin versant littoral d'une superficie de 61,5 km² est à l'origine de plus de 60 % des flux polluants alimentant la Baie de Saint-Michel-en-Grève. L'apport important d'éléments nutritifs des cours d'eau entraîne un phénomène d'eutrophisation sur le littoral, couramment appelé « marées vertes ». A ce titre, il fait l'objet depuis quelques années de nombreuses études de la part de divers organismes de recherche pour tenter de comprendre et d'enrayer le phénomène (CNRS, CEVA, IFREMER, CEMAGREF, INRA). Il a notamment été labellisé en 2001 comme site atelier dans le cadre du programme du PEVS (Programme Environnement, Vie et Sociétés du CNRS). Il fait également depuis les années 1990 de l'objet de programmes de luttes contre les marées vertes (programme « Algues vertes », puis programme « PRO-LITTORAL » depuis décembre 2002) initiés notamment par le Conseil Régional, l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne et les Conseils Généraux afin de réduire le phénomène d'eutrophisation lié au transfert de nitrates vers les cours d'eau et pour lequel des actions sont engagées par le Comité des bassins versants de la Lieue de Grève, la Chambre d'Agriculture et le Comité professionnel agricole. Les programmes d'actions de lutte contre les marées vertes, conjugués avec d'autres programmes visant à la restauration de la qualité de l'eau (PMPOA, Directive Nitrates…) se traduisent par des modifications d'occupation des sols, notamment au travers de changements de modes de production (extensification avec augmentation des prairies, conversion à l'agriculture biologique) et d'une extension de la couverture hivernale des parcelles par des intercultures (La Directive Nitrates, applicable depuis juillet 2001, impose la présence de couverts végétaux pendant l'hiver sur l'ensemble des zones soumises au transfert de nitrates ; des actions visant l'implantation d'intercultures ont été mises en place avec le programme « Algue vertes » et sont développées dans le cadre du programme PRO-LITTORAL). Les organismes à l'initiative de ces programmes et/ou de leur application (Conseil Général, Communauté d'Agglomération de Lannion, Chambre d'agriculture) se sont montrés intéressés par un outil d'évaluation de leurs actions passées et de programmation pour les actions à venir. L'étude des trajectoires spatio-temporelles de l'occupation des sols contribue à répondre à cette attente. Cependant, le site est régulièrement couvert par les nuages, ce qui limite l'acquisition d'images optiques exploitables certaines années. L'imagerie radar apparait donc une alternative pertinente d'autant plus que le site, doté d'une importante base de données spatialisée offre des conditions d'évaluation intéressantes.

Les images radar polarimétrique sont fournies en « Single Look Complex », c'est-à-dire avec deux entiers représentant la partie I (réelle) et Q (Imaginaire) pour chaque polarisation (**Tableau 3**). Ces deux composantes du signal sont reliées de la façon suivante :

$$I = A\cos(\phi)$$

$$Q = A\sin(\phi)$$

$$\phi = \arctan(\frac{Q}{I})$$

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2}$$

- Avec I = partie réelle ou « In phase »
- Avec Q = partie imaginaire ou en « quadrature »
- ϕ = phase
- A = Amplitude

L'angle d'incidence situé autour de 38° est relativement important, ce qui rend le signal rétrodiffusé plus sensible au couvert végétal. La fine résolution spatiale de l'image (inférieure à 5 mètres) apparait bien adaptée à la taille des parcelles (autour de 1 ha en moyenne) du bassin versant du Yar.

Tableau 3- Caractéristiques de l'image Radarsat-2

Capteur	Radarsat-2 (10 février 2011)
Produit	Single Look Complex (SLC)
Type d'acquisition	Polarimétrique
Bande	C (5.4 GhZ)
Polarisations	HH, HV, VH, VV
Angle d'incidence	37.40° - 38.90°
Résolution spatiale	4.7 *4.9 mètres
Direction	Ascendant droit

Associée à cette image, une campagne terrain effectuée le 25 janvier 2011 a permis d'identifier 49 parcelles en sol nu (134 ha) et 74 parcelles couvertes par la végétation (146 ha).

Sur 38 parcelles en sol nu, les informations suivantes ont été collectées :

- Photographie globale et verticale de la parcelle étudiée
- Usage des sols, présence d'une jeune culture (blé…)
- Humidité volumique des sols comprise entre 0 et 5 cm avec un « Time Domain Reflectometer » (TDR)
- Taux de repousses spontanées, pourcentage de résidus de culture
- Caractérisation de la rugosité de surface (lisse ou rugueuse)

Les pratiques agricoles sur les sols nus sont multiples (**Figure 13**) et liées à de nombreux facteurs (économiques, climatiques, environnementaux…). Cependant, d'un point de vue environnemental, il est important de discriminer les sols nus « lisses » avec peu ou pas de végétation (couverture du sol par la végétation inférieure à 10%) des sols nus « rugueux » comprenant des résidus de culture et repousses, les premiers accélérant les transferts de flux polluants vers les cours d'eau.



Figure 13- Différentes pratiques culturales sur les sols nus durant la période hivernale (Bretagne)

- **Méthodologie**

La méthodologie de traitement de l'image Radarsat-2 est illustrée sur la **Figure 14.** Dans un premier temps, un filtre adapté au chatoiement polarimétrique est appliqué (Lee et al., 1999) préservant l'information spatiale et polarimétrique tout en réduisant le bruit de l'image. La matrice de diffusion est ensuite vectorisée pour déterminer la matrice de cohérence T à partir de laquelle sont appliqués trois modèles de décomposition polarimétrique (Touzi, Freeman-

Durden, Cloude-Pottier). Outre les intensités en HH, VV et HV (VH et HV sont supposés réciproques dans le cas des radars mono statiques), les paramètres et discriminateurs polarimétriques sont extraits.

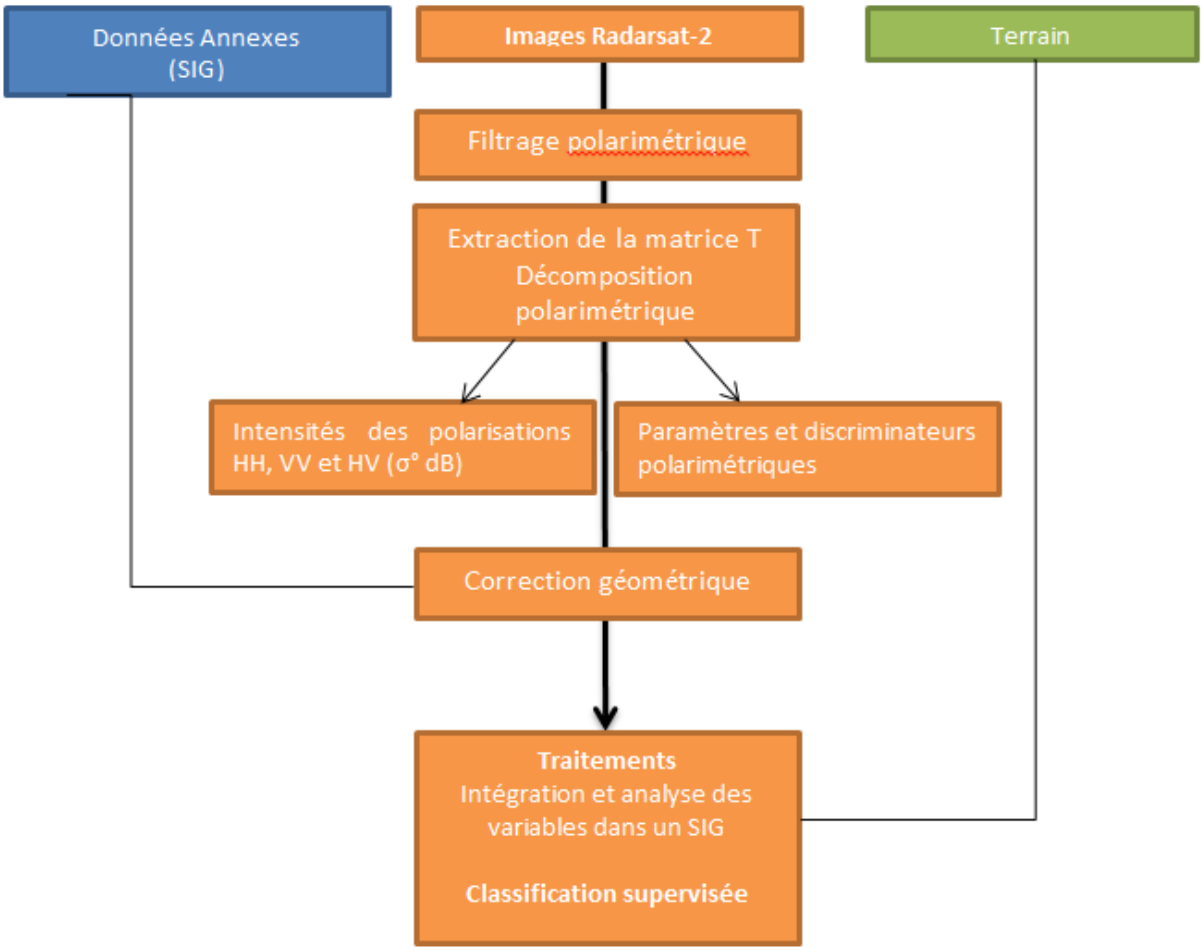


Figure 14- Méthodologie de traitement de l'image polarimétrique Radarsat-2

En tout, ce sont 43 « variables polarimétriques » qui sont extraites afin d'identifier celles qui apportent le plus d'information pour discriminer la couverture hivernale des sols. L'ensemble de ces variables sont corrigées géométriquement à l'aide du parcellaire existant sur le bassin versant et d'un modèle numérique de terrain issu du Shuttle Radar Topography Mission, (SRTM, avec une résolution spatiale de 90 * 90 m.). A ce niveau, il est important de noter que les corrections géométriques des images polarimétriques sont réalisées après l'exploitation de la matrice de cohérence. En effet, lors de la projection au sol des pixels dans un référentiel cartographique, on perd l'information de la phase indispensable pour toute extraction de paramètres polarimétriques. L'ensemble de ces 43 variables sont ensuite intégrées dans un SIG où, à partir des limites parcellaires digitalisées, les images sont transformées en mode vecteur (**Figure 15**). Les données terrain intégrées au SIG permettent une analyse et une discrimination des variables les plus explicatives. Face au nombre important de variables polarimétriques considérées, une Analyse en Composante Principale (ACP) est réalisée afin de supprimer les variables redondantes et identifier celles qui apportent le plus d'informations pour

la caractérisation de la couverture hivernale des sols. Enfin, une classification par arbre de décision (Classification Tree Analysis, CTA) est appliquée. Basée sur une méthode non paramétrique, qui ne requiert donc pas de données ayant une distribution normale (gaussienne), la CTA est un algorithme de classification supervisé bien adapté lorsque peu de classes sont à identifier (Zambon et al., 2006).

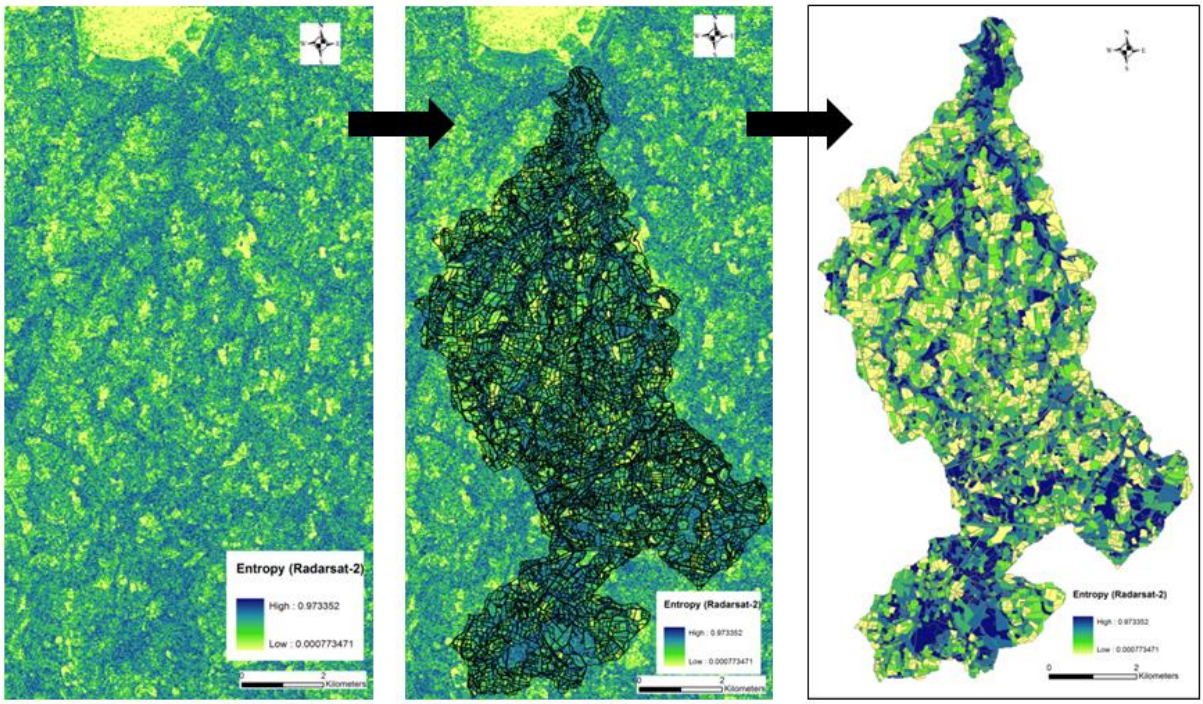


Figure 15- Transformation des variables polarimétriques en mode vecteur

❖ **Résultats**

Les décompositions polarimétriques permettent d'interpréter spatialement les principaux types de mécanisme de diffusion présents sur l'image. A titre d'exemple, les trois mécanismes de diffusion de Freeman-Durden sont combinés à travers une composition colorée où sont associés en bleu, la diffusion double, en vert la diffusion de volume et en rouge la diffusion de surface (**Figure 16**). Cette combinaison offre ainsi une spatialisation intéressante des mécanismes de diffusion prédominants sur le bassin versant du Yar et permet d'interpréter les trois types de diffusion :

- **La diffusion de surface.** Associée à la couleur rouge dans la composition colorée, elle apparait dans cette couleur ou en orange lorsque d'autres mécanismes de diffusions interviennent. Elle correspond généralement à des parcelles en sols nus à peu couverts avec une rugosité plus ou moins importante (labours, résidus de culture, repousses…).
- **La diffusion de volume.** Sensible à la diffusion aléatoire des cibles, la diffusion de volume correspond généralement à de la végétation, associée à la couleur verte,

elle correspond sur la composition colorée aux ripisylves et à la forêt situé au sud du bassin versant.

- **La diffusion double (ou double rebond)** est associée à la couleur bleue dans la composition colorée. Elle correspond ici principalement au linéaire bocager centres urbains, propices à ce type de diffusion.

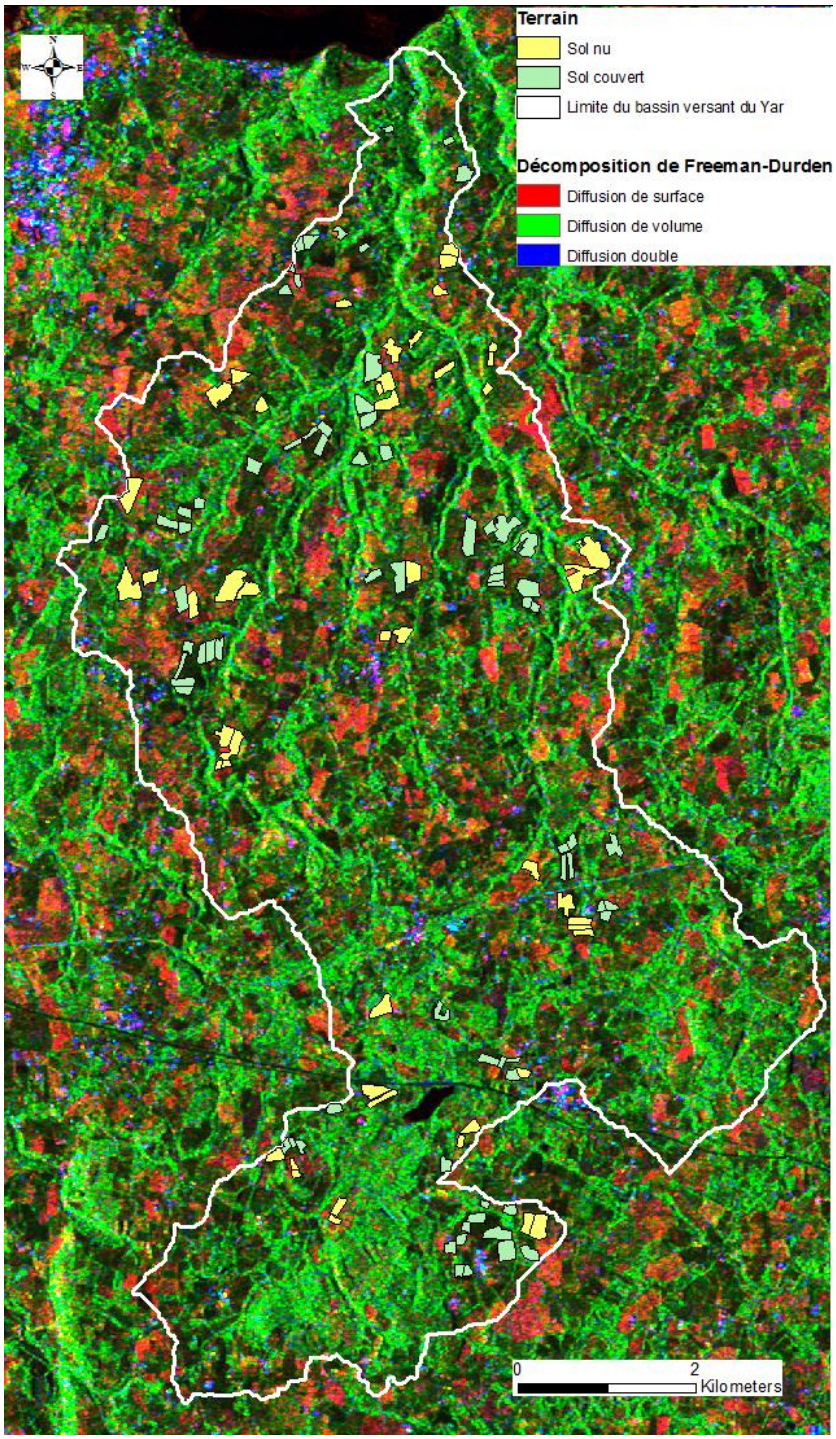


Figure 16- Composition colorée à partir des paramètres polarimétriques de Freeman-Durden (Radarsat-2, 10 février 2011)

Les 43 variables polarimétriques sont analysées en les croisant avec les données terrain à l'échelle parcellaire. Les données terrain sont classées en 2 types d'occupation des sols : « sol

nu (SN)» et en « sol couvert par la végétation (SC)». Une ACP est alors appliquée sur les 43 variables. Dix variables qui expliquent près de 93% de la variance (**Tableau 4** et **Figure 17**) sont extraites. Parmi ces 10 variables, on peut identifier différents types de variables polarimétriques : la variable « VV_dB » qui correspond au σ° en polarisation VV, sensible aux éléments verticaux des objets étudiés ; la diffusion de volume et l'entropie, issues des décompositions polarimétriques indiquant une forte sensibilité aux diffusions aléatoires comme la végétation ; le minimum de puissance reçue et le « pedestal height », paramètres issus de la synthèse polarimétrique indiquant des niveaux d'intensité et de dépolarisation du signal.

Tableau 4- Variables explicatives pour les classes sol nu et sol couvert

Contribution des variables (%)	**F1**	**F2**
Maximum de la composante complètement polarisée	14	0
« Fractional power » ; décrit le pourcentage du signal rétrodiffusé complètement polarisé	11	7
Entropie	12	7
Contribution de la diffusion de volume	4	27
Contribution de la diffusion de surface (rough)	14	1
« Pedestal Height » ; indique le niveau de dépolarisation	9	15
« Touzi Phase » ; calcul la phase de la cible	4	16
« Touzi Anisotropy »	12	5
« VV_dB » ; intensité mesuré dans la polarisation VV, (σ° DB)	15	0
« Minimum de la puissance reçue », caractérise les surfaces lisses avec une diffusion spéculaire	6	22

La variabilité apparaît ainsi bien expliquée avec 92.8% de variance représentée sur les deux premiers axes. L'axe F1 qui explique 67.41% de la variance peut être assimilé au mécanisme de diffusion prédominant, avec pour les valeurs négatives, des valeurs représentant le caractère aléatoire de la diffusion (entropie) et les valeurs positives un mécanisme de diffusion principal (rugosité et VV). L'axe des ordonnées qui explique seulement 25.36% de la variance est plus complexe à analyser, il pourrait cependant représenter le degré de dépolarisation des variables à expliquer avec un fort degré de dépolarisation pour les valeurs positives (volume) et faible degré pour les valeurs négatives.

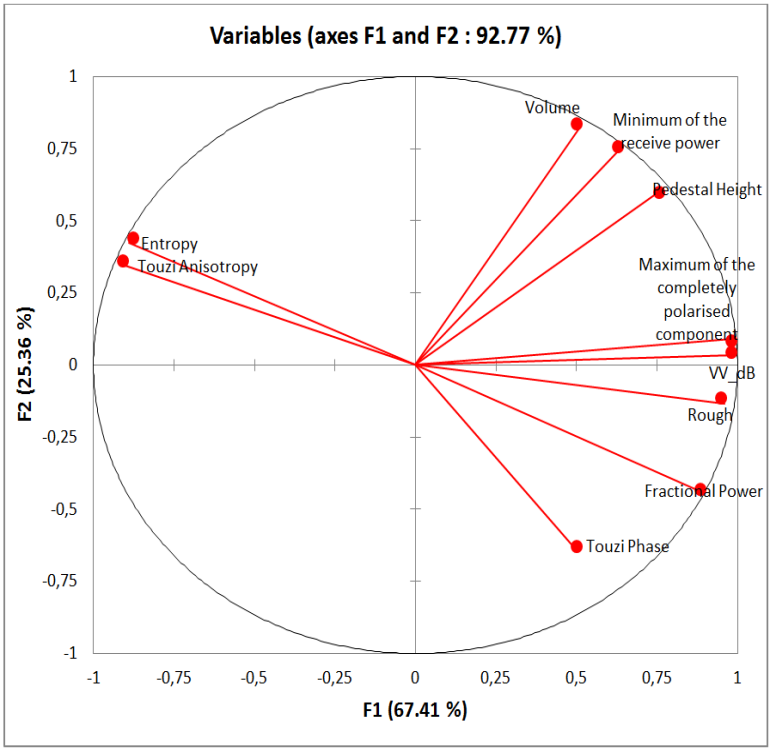


Figure 17- ACP des 9 variables polarimétriques les plus explicatives pour les classes sol nu et sol couvert

Ces variables sont ensuite intégrées dans le processus de classification par Arbre de Décision. Le **Tableau 5** présente la matrice de confusion et montre un taux de classification très satisfaisant avec un coefficient de Kappa de 0.86. A cette époque de l'année (**Tableau 6**), on constate une part importante des sols nus à l'échelle du bassin versant (28% de la surface totale et 46% de la Surface Agricole Utile, SAU). Ces sols nus peuvent cependant correspondre à des jeunes céréales d'hiver qui a cette époque de l'année ne sont que très peu couvrants.

Tableau 5- Matrice de confusion pour la classification de l'image Radarsat-2 du 10 février 2011

KAPPA : 0.86		Validation		
		Sol nu	Sol couvert	Total
Classification	Sol nu	7722	490	8212
	Sol couvert	467	5356	5823
	Total	8189	5846	14035

Tableau 6- Surface et pourcentage de la couverture hivernale des sols à l'échelle du bassin versant du Yar et sa SAU (10 février 2011)

	Surface (Ha)	Bassin versant (%)	SAU (%)
Surfaces en forêt	1857	30%	
Surfaces en eau	17	0%	
Surfaces bâties	557	9%	
Sol nu	1719	28%	46%
Sol couvert	2017	33%	54%

La polarimétrie radar étant sensible aux paramètres de rugosité des espaces étudiés, nous nous sommes focalisés sur la caractérisation des sols nus que nous avons classés en 2 classes :

- Surface lisse, correspondant à des parcelles en sol nu sans aucune végétation ou une jeune culture
- Surface rugueuse, correspondant à des parcelles en sol nu avec résidus de culture, repousses importantes…

Neuf variables issues de l'ACP sont identifiées, expliquant 97.83% de la variance (**Tableau 7** et **Figure 18**). On retrouve des variables comme l'entropie, le minimum de puissance reçue, le « pedestal height » … que l'on avait identifié comme contributive pour la discrimination des sols nus et des sols couverts par la végétation. Elles contribuent à expliquer près de 98% de la variance, elles apparaissent donc pertinentes pour analyser et classifier ces deux classes de sols nus.

Tableau 7- Variables explicatives pour les sols nus avec des surfaces « lisses » et « rugueuses »

Contribution des variables (%)	**F1**	**F2**
Alpha, indique le mécanisme de diffusion moyen ou dominant	14	5
Entropie	13	8
Coefficient de variation, décrit l'hétérogénéité dans le mécanisme de diffusion	11	11
Minimum de la puissance reçue	2	28
« Pedestal Height »	4	24
Maximum de l'intensité diffusée	12	10
Maximum de la composante complètement polarisée	14	7
« Dominant Eigenvalue », identifie la domination d'un mécanisme de diffusion	13	8
Contribution de la diffusion de surface	17	0

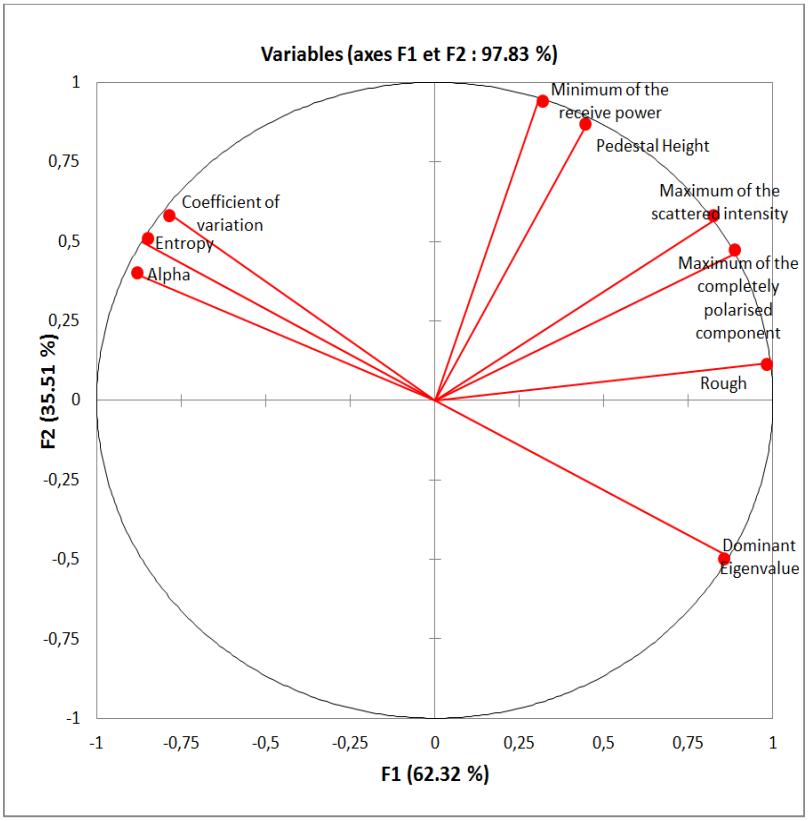


Figure 18- ACP des 9 variables polarimétriques les plus explicatives pour les sols nus avec des surfaces «lisses » et « rugueuses »

L'axe F1, qui explique 63.32% de la variance, exprime les propriétés de diffusion des variables avec pour les valeurs négatives, un haut niveau de diffusion aléatoire et pour les valeurs positives, un seul mécanisme de diffusion prédominant. L'axe F2 (35.51% de la variance expliquée) est moins clair, il peut indiquer toutefois le niveau de dépolarisation du signal (élevé pour les valeurs positives et faible pour les valeurs négatives).

La classification, réalisée avec le même algorithme que précédemment, montre un indice de Kappa de 1, soit 100% de précision. Ce résultat ne peut cependant être considéré comme valide, le manque d'échantillonnage concernant les sols nus « lisses » n'offrent pas les conditions d'une validation statistique significative. Cependant, à l'échelle du bassin versant (**Figure 19** et **Tableau 8**), on note que 29% de la SAU correspond à du sol nu « lisse » indiquant généralement la présence d'une culture semée en automne. Cette classe, peut donc indirectement nous permettre d'identifier les céréales d'hiver sur le bassin versant. Les surfaces rugueuses avec repousses et autres résidus correspondent elles à des sols nus précédant une culture de printemps (maïs, prairie temporaire, autre…).

Tableau 8- Surface et pourcentage des sols nus « lisses » et « rugueux » sur le bassin versant du Yar (10 février 2011)

	Surface (Ha)	Bassin versant (%)	SAU (%)
Sol couvert	2017	33	54
Sol nu, surface « lisse »	1092	18	29
Sol nu, surface « rugueuse »	627	10	17

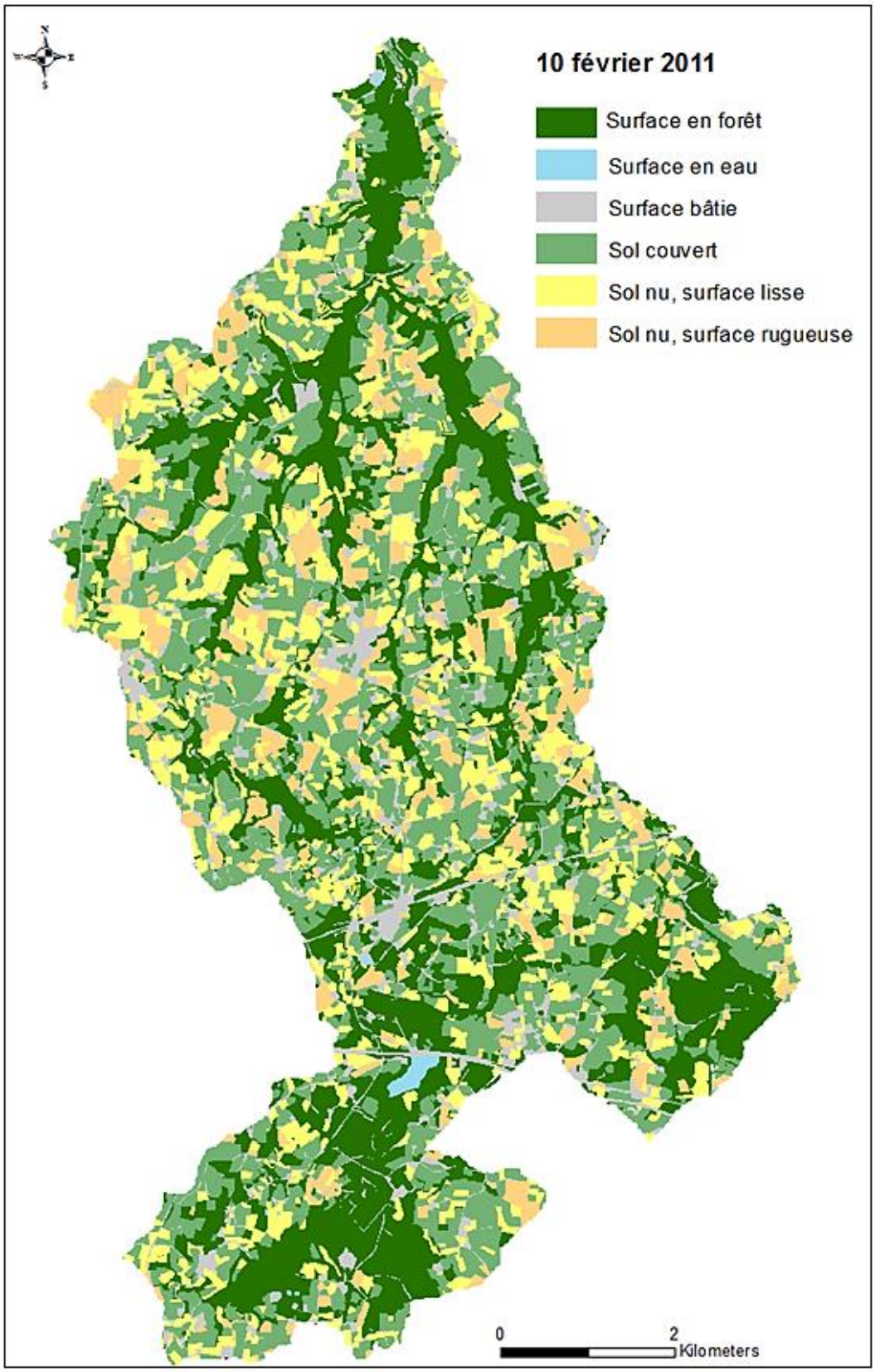


Figure 19- Caractérisation des sols nus sur le bassin versant du Yar (Radarsat-2, 10 février 2011)

D'autres tests ont été effectués pour caractériser les types de résidus de culture sur les parcelles mais aucune relation n'a été trouvée car l'hétérogénéité intra parcellaire constatée sur le terrain est trop importante. Par ailleurs, aucune relation linéaire n'a pu être identifiée entre

l'humidité des sols nus mesurés sur le terrain et les σ° des polarisations HH, HV et VV. Là aussi, l'hétérogénéité intra parcellaire de l'humidité est très importante. Par ailleurs, les différences pédologiques entre le sud et le nord du bassin versant influencent les teneurs en humidité des sols ce qui limite toute corrélation significative.

❖ **Conclusion**

Les résultats montrent les potentialités intéressantes de la polarimétrie radar à haute résolution spatiale sur un territoire agricole bocager caractérisé par un parcellaire agricole très dense et de petite taille. Les paramètres polarimétriques permettent une fine identification des sols nus et des sols couverts ainsi que la caractérisation des sols nus « lisses » et « rugueux », même si un échantillonnage plus dense doit confirmer ce dernier résultat. En revanche, aucune relation n'a été trouvée entre l'humidité des sols et les intensités radar sur les sols nus car l'hétérogénéité intra parcellaire de l'humidité des sols est trop importante.

2.2. Exploitation de la combinaison radar/optique pour la caractérisation de la couverture hivernale des sols en Bretagne

Nous avons vu que la caractérisation de l'occupation hivernale des sols par télédétection radar en mode polarimétrique offrait des résultats intéressants dans un contexte agricole bocager. Sa combinaison avec la télédétection optique, qui permet de calculer des indices de végétation, des densités de couvert (Daughtry, 2001) apparait ainsi prometteur pour lever les ambigüités existantes entre les sols nus et les sol nus avec des repousses et des résidus de culture.

Cependant, la nature même de la végétation en hiver reste très ambigüe. D'un point de vue de l'occupation des sols, nous pouvons ainsi observer un sol nu qui correspond en fait à une jeune culture de céréales et à contrario, nous pouvons avoir un sol couvert par la végétation qui correspond à un sol nu avec des repousses spontanées après une culture maïs. La notion d'incertitude apparait donc intéressante à intégrer dans le processus de classification d'autant plus que ces territoires sont caractérisés par une forte variabilité spatiale et temporelle en hiver. L'objectif de ce travail est double, il vise à :

- mesurer les potentialités de la polarimétrie radar et optique pour extraire les sols nus et les sols couverts sur un territoire agricole bocager à l'échelle parcellaire
- mesurer l'intérêt de la théorie de Dempster-Shafer, règle de fusion d'information prenant en compte l'incertitude dans son processus de modélisation pour caractériser l'occupation hivernale des sols

❖ **Site d'étude**

L'espace d'étude se trouve dans la Zone Atelier Armorique (ZAA), site d'étude interdisciplinaire labélisé par l'INstitut Ecologie et Environnement (INEE) localisé au nord du département de l'Ille et Vilaine (Bretagne). Nous nous focalisons ici sur le site B dominé par un système de production agricole mixte dans un contexte paysager fragmenté (parcelles < à 1

Ha). Couvrant près de 920 ha, il est caractérisé par des dynamiques d'occupation et d'usage des sols complexes et différents modes de gestion de la couverture hivernale des sols.

❖ **Données**

L'image optique provient du satellite ALOS AVNIR acquise le 16 mars 2010 dans quatre bandes spectrales (du bleu au Proche Infra-Rouge) avec une résolution spatiale de 10*10 mètres. L'image Radarsat-2 acquise deux jours plus tard, le 18 mars 2010 est en mode polarimétrique et possède une résolution spatiale proche de 5*5 mètres (**Figure 20**). L'angle d'incidence compris autour de 42° est important, les intensités seront donc plus faibles et plus sensibles au couvert végétal.

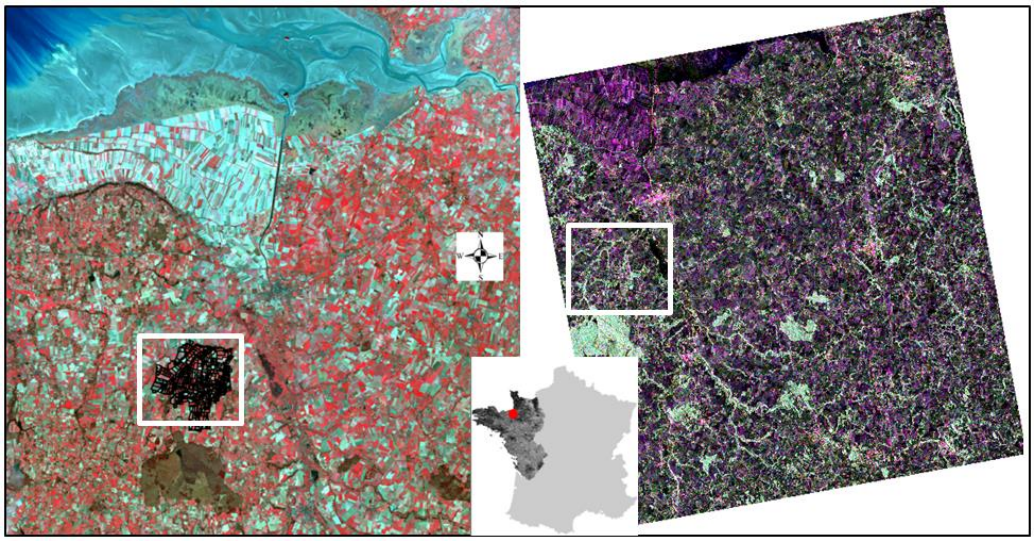


Figure 20- Localisation du site d'étude sur l'image ALOS AVNIR à gauche et Radarsat-2 à droite

Outre les données satellitaires, nous disposons également d'un SIG contenant le suivi de l'occupation et l'usage des sols entre 2000 et 2011 à l'échelle parcellaire. Cependant peu d'informations existent sur l'occupation hivernale des sols, une seule campagne terrain ayant effectuée au mois de mars alors que seuls les différents types d'occupation et d'usage des sols ont été relevés.

❖ **Méthodologie**

La méthodologie est détaillée dans la **Figure 21**. Elle repose sur l'extraction d'indicateurs issus des images optique et radar. Concernant l'image optique, celle-ci est corrigée radiométriquement à l'aide du modèle ATCOR2 afin de passer des comptes numériques à des pourcentages de réflectance et extraire deux variables biophysiques : le Fapar (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) et le LAI (Leaf Area Index). Concernant l'image radar, la même méthodologie basée sur l'extraction de paramètres et discriminateurs polarimétriques est appliquée. Les facteurs les plus discriminants pour les classes « sol couvert » et « sol nu » sont déterminés à partir d'une ACP réalisée à partir de l'échantillonnage terrain. Chaque source d'information est ensuite estimée à travers des fonctions floues de type sigmoïde puis intégrée dans la règle d'inférence de Dempster-Shafer (**Figure 22**). Nous nous situons donc ici dans de la fusion de moyen niveau, puisque nous fusionnons des indicateurs

entre eux. Les résultats en sortie sont évalués à l'aide d'un indice de Kappa et les cartes représentant l'incertitude sont analysées.

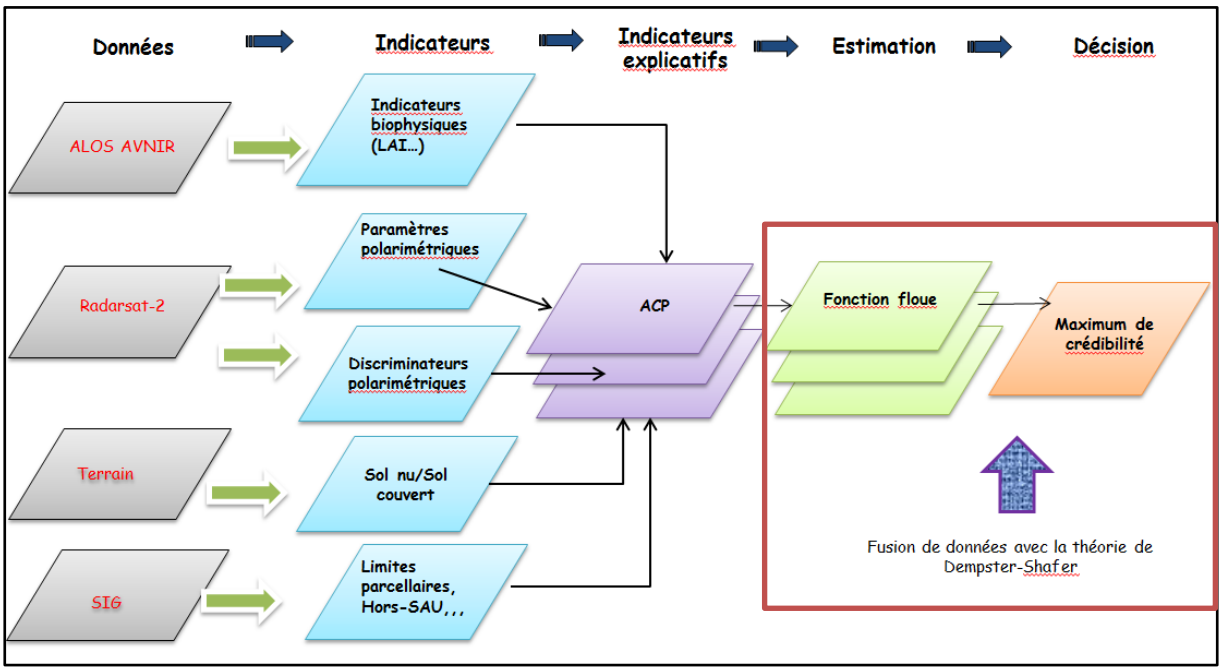


Figure 21- Méthodologie de classification par fusion de données radar et optiques : application à la couverture hivernale des sols sur la ZA Armorique

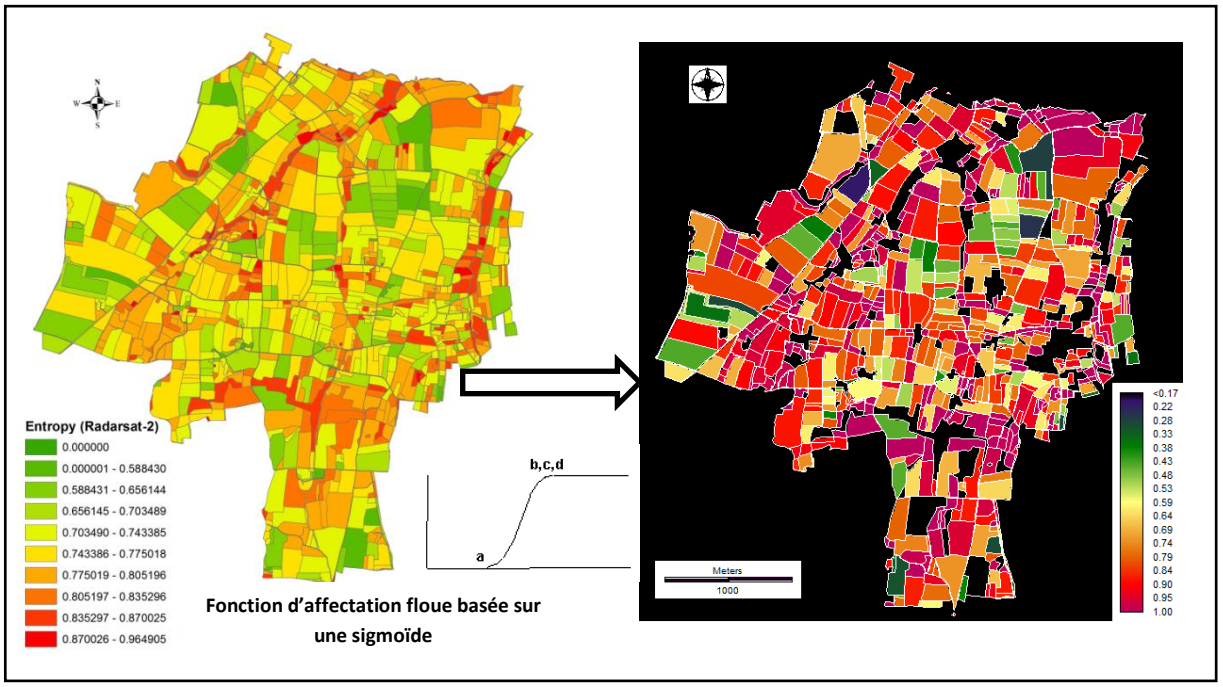


Figure 22- Affectation floue des fonctions de masse pour la variable « Entropie »

Les incertitudes peuvent être mesurées à partir de deux approches : On peut se baser sur le calcul de la différence entre les mesures de plausibilité et de croyance sur chaque hypothèse du cadre de discernement (**Figure 23**). Ainsi, si la différence est importante, alors l'incertitude est forte, au contraire, elle est faible si la différence entre les deux mesures est réduite ou nulle. On

peut également estimer l'incertitude en calculant la différence entre les mesures de croyance de chaque hypothèse (sol nu et sol couvert pour cet exemple). Dans ce cas, c'est le contraire, plus la différence est grande, plus l'incertitude est faible et plus la différence est faible, plus l'incertitude est forte.

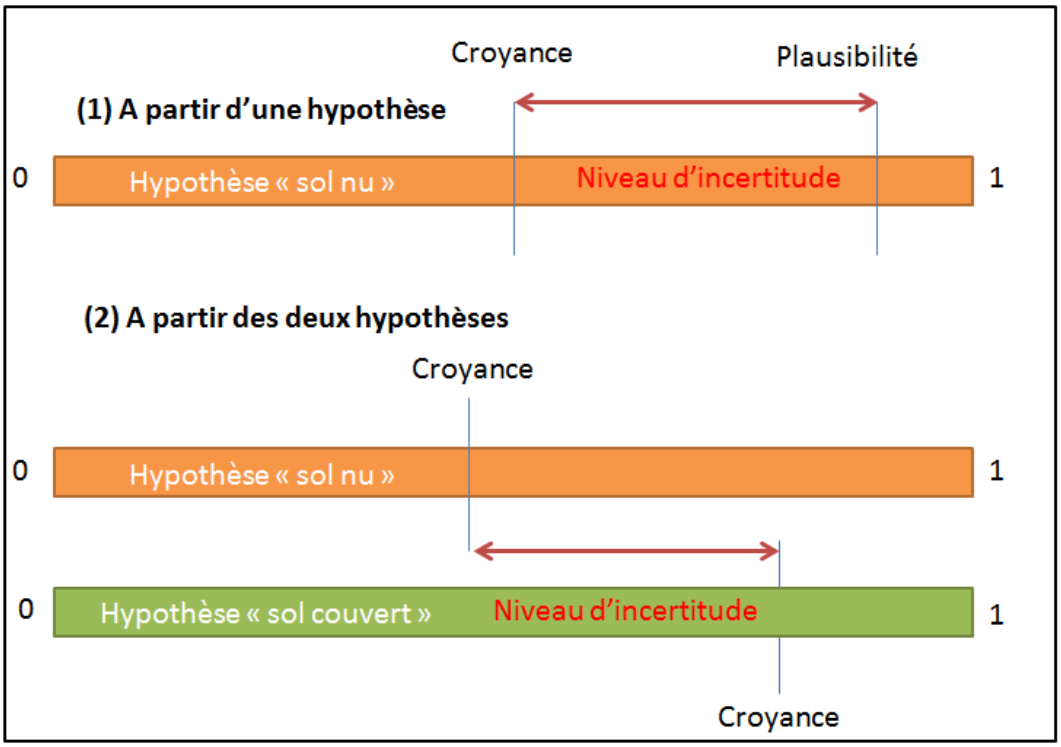


Figure 23- Mesures d'incertitude dans le cadre de la théorie de Dempster-Shafer

A partir de ces incertitudes, on peut ainsi construire des cartes de « véracité » associant un niveau de confiance pour chaque classe d'occupation des sols.

❖ **Résultats**

Les résultats se focalisent ici sur trois points : (1) Les sorties du modèle de fusion, (2) la classification de la couverture hivernale des sols et (3) les mesures d'incertitude.

1) Les sorties du modèle de fusion

Avec la théorie de Dempster-Shafer, de nombreux résultats issus de la fusion d'informations peuvent être analysés selon le type de prise de décision choisie. La mesure de croyance ou de crédibilité est ici analysée, elle permet de mesurer la croyance *a minima* dans une hypothèse. Les niveaux de croyance sont spatialisés à l'échelle parcellaire pour les deux hypothèses « sol nu » et « sol couvert » sur l'ensemble du site B (**Figure 24**).

Les valeurs de croyance comprises entre 0 et 1 expriment le niveau de confiance que l'hypothèse se produise, on remarque ainsi que pour l'hypothèse « sol nu », peu de parcelles sont caractérisées par une très forte croyance qu'elle se réalise. Le **Tableau 9** montre ainsi que seulement 12.6% des parcelles du site d'étude soit 14.3% de la surface totale ont une croyance comprise entre 0.8-1 pour l'hypothèse « sol nu ». En revanche, près de 52% des parcelles ont une très forte croyance d'être en « sol couvert » par la végétation. Par ailleurs, les valeurs de croyance comprise entre 0.4 et 0.6 sont également intéressantes à analyser car elles expriment une incertitude face au choix à effectuer entre les deux hypothèses. Pour l'hypothèse « sol nu », 15.8% des parcelles sont concernées par ces valeurs, mais elles ne représentent seulement que 12.1% de la surface, ce qui indique que ces mesures de croyance concernent plutôt des petites parcelles agricoles (< 1ha). Pour l'hypothèse « sol couvert », 10.7% des parcelles soit 12.8% de la surface ont une valeur de croyance entre 0.4 et 0.6, caractérisant des parcelles de taille plus importante.

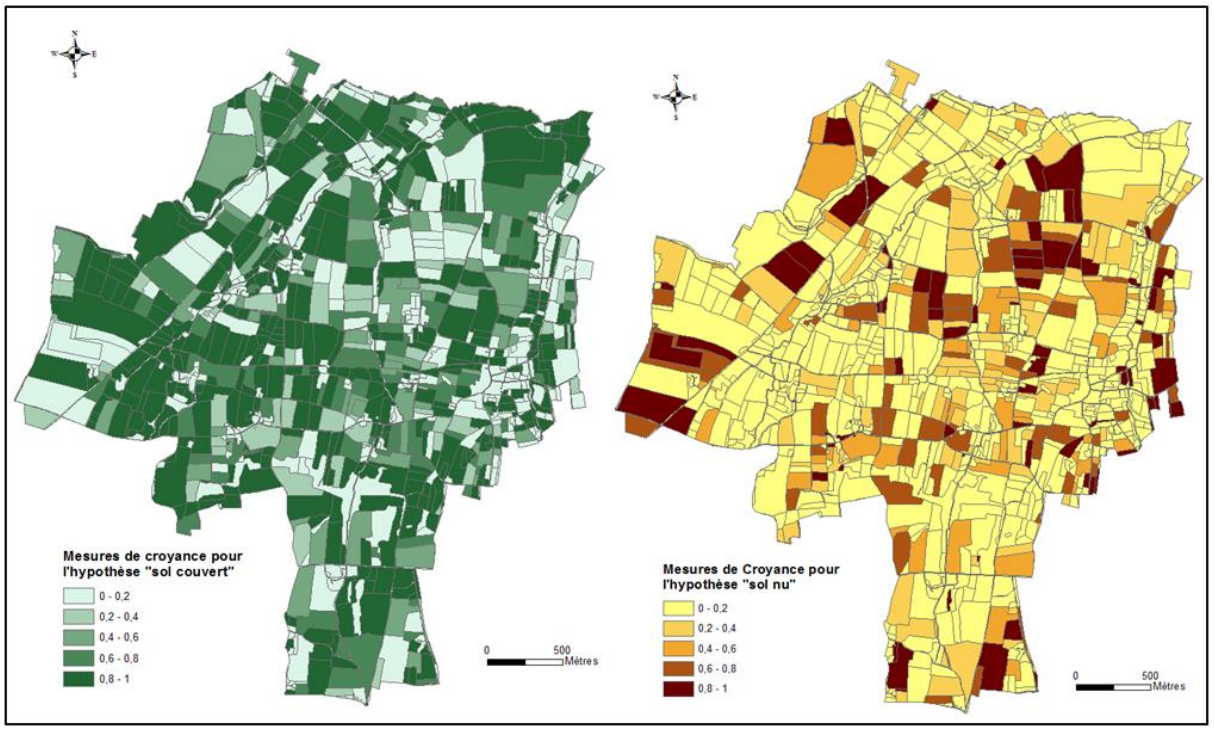


Figure 24- Cartes de croyance pour les hypothèses « sol nu » et « sol couvert »

Tableau 9- Mesures de croyance pour les hypothèses « sol nu » et « sol couvert »

	Sol nu		Sol couvert	
Croyance	**Fields (%)**	**Area (%)**	**Fields (%)**	**Area (%)**
0 -0.2	39.5	41.8	10.5	13.0
0.2-0.4	19.0	19.6	10.7	9.1
0.4-0.6	15.8	12.1	10.7	12.8
0.6-0.8	13.0	12.2	16.4	15.1
0.8-1	12.6	14.3	51.8	50.1

2) La classification de la couverture hivernale

La classification de la couverture hivernale des sols est effectuée en calculant le maximum de croyance entre les deux hypothèses. Elle offre de très bons résultats puisque l'on atteint un indice de kappa proche de 0.9. L'analyse de la matrice de confusion (**Tableau 10**) montre par ailleurs une très bonne discrimination l'hypothèse « sol couvert ». La combinaison des variables biophysiques avec les variables polarimétriques dans le processus de fusion d'information par la règle de Dempster-Shafer apporte ainsi une amélioration très intéressante pour cette classe. Concernant la classe sol nu, celle-ci est caractérisé par des erreurs de sous-estimation et concernent des parcelles en sol nu avec des repousses qui à cette époque de l'année couvrent de façon hétérogène certaines parcelles agricoles.

Tableau 10- Matrice de confusion pour la classification de la couverture hivernale des sols (mars 2010)

		Validation		
KAPPA : 0.89		Sol nu	Sol couvert	Total
Carte	Sol nu	7807	0	7807
	Sol couvert	1200	14580	15780
	Total	9007	14580	23587

3) Les mesures d'incertitude

Les mesures d'incertitude issues de la différence entre les mesures de croyance pour les deux hypothèses (« sol nu » et « sol couvert ») sont associées à la classification (**Figure 25**). Elles permettent ainsi de spatialiser les classes d'occupation des sols concernées par une forte incertitude. Ces incertitudes pour les deux hypothèses étudiées concernent surtout les grandes parcelles agricoles (> à 1Ha) où l'hétérogénéité intra-parcellaire est parfois très forte à cette période de l'année. On retrouve ainsi sur des parcelles en sol nu, des parties recouvertes par des repousses spontanées qui rendent incertaines le choix d'une classe (**Tableau 11**). Pour l'hypothèse « sol nu », 17.4% des parcelles, soit 19.2% de la surface étudiée est caractérisée par une forte incertitude, en revanche, seul 4.5% des parcelles le sont pour l'hypothèse « sol couvert ». Pour cette hypothèse, la variable du LAI représente une source d'information privilégiée pour une bonne identification de cette classe.

❖ **Conclusion**

La polarimétrie radar permet d'extraire des paramètres de diffusion discriminants sur les sols nus (rugosité, intensités du signal, dépolarisation…) bien adaptés à la caractérisation hivernale des sols. L'imagerie optique apporte elle, à travers le calcul d'indices de végétation et de variables biophysiques (LAI, Fapar…), une information de premier ordre sur l'identification des sols couverts par la végétation. La fusion d'informations issues d'image optique et radar pour la caractérisation de la couverture hivernale des sols apparait ainsi prometteuse pour l'identification des sols nus et des sols couverts en hiver. Cependant, leur caractérisation à l'échelle parcellaire reste complexe car la période hivernale en Bretagne correspond à une période de transition entre deux cultures annuelles. Ainsi, on observe des parcelles laissées en sol nu après la récolte (céréales ou maïs) avec une présence hétérogène de végétation liée à des repousses spontanées. On note également des intercultures de type CIPAN qui au mois de mars sont nécrosées et couvrent que faiblement les sols. Ainsi leur identification même reste floue et complexe, la prise en compte de l'incertitude dans le processus de classification et dans l'interprétation des résultats offre alors une modélisation plus réaliste de la problématique étudiée et un outil d'aide à la décision pertinent pour les acteurs locaux.

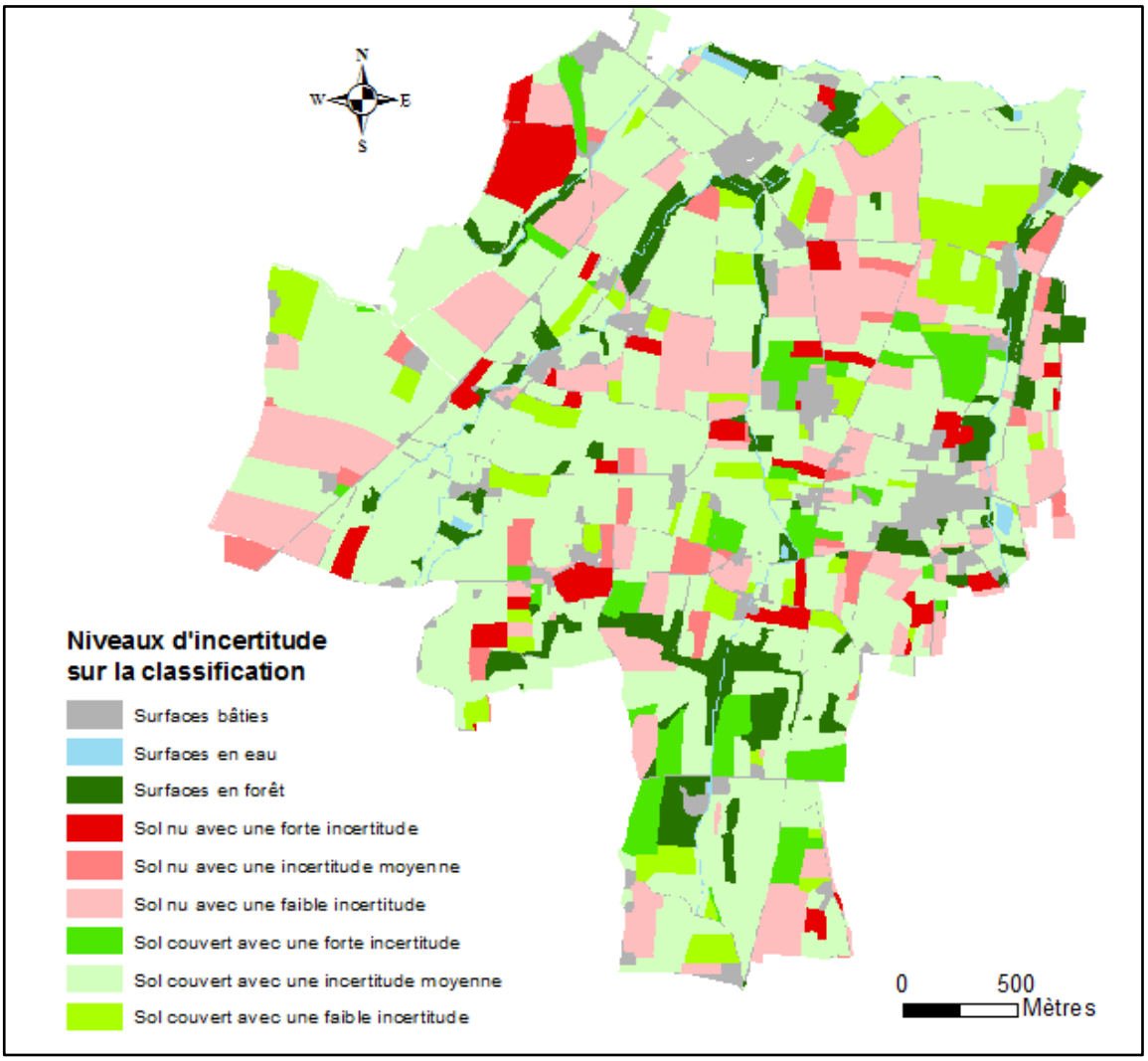


Figure 25- Spatialisation de l'incertitude associée aux hypothèses « sol nu » et « sol couvert »

Tableau 11- Quantification de l'incertitude pour les hypothèses « sol nu » et « sol couvert »

Incertitude	Parcelles (%)	Surface (%)
Sol nu avec une forte incertitude	17.4	19.2
Sol nu avec une incertitude moyenne	17.9	12.0
Sol nu avec une faible incertitude	64.7	68.8
Sol couvert avec une forte incertitude	5.4	7.9
Sol couvert avec une incertitude moyenne	8.9	11.1
Sol couvert avec une faible incertitude	85.6	81.0

3. Evaluation des séries multi temporelles radar pour l'étude des changements d'occupation des sols

Depuis une dizaine d'années, l'offre satellitaire radar a connu un très fort développement accompagnée d'avancées technologiques majeures en termes de résolution spatiale, radiométrique et temporelle. De nouvelles perspectives de recherche sont ainsi offertes pour l'étude des territoires agricoles. L'imagerie radar est en effet la seule technologie spatiale qui garantisse une acquisition régulière de scènes satellitaires de jour comme de nuit en s'affranchissant des conditions atmosphériques. De nouveaux axes de recherche font ainsi l'objet de méthodologies innovantes dans la communauté du « Land Change Science », où l'imagerie optique est combinée à l'imagerie radar pour par exemple caractériser l'évolution des états de surface des parcelles agricoles (pratiques agricoles, types de labours…), suivre la phénologie des cultures (début de croissance, floraison, fin de croissance, récolte…), identifier les intercultures, caractériser le linéaire bocager, les linéaments hydrogéologiques…

Parmi les différents travaux menés sur l'évaluation des séries temporelles radar pour la caractérisation et le suivi des changements d'occupation des sols, trois applications sur des territoires agricoles variés sont présentées : (1) la caractérisation de l'usage des sols en contexte agricole bocager à partir d'une série d'images radar à très haute résolution spatiale ; (2) la caractérisation des zones humides à partir d'une série d'images radar Dual-Pol à très haute résolution spatiale et (3) le suivi de l'évolution de l'occupation des sols en milieu semi-aride (Niger) à partir d'images radar multi sources.

3.1. Etude des changements intra-annuels de l'occupation de sols en contexte agricole intensif et bocager

- **Site d'étude et données**

Quatre images Radarsat-2 en mode Ultra-fin sont évaluées pour caractériser l'occupation des sols durant l'été 2011 (**Tableau 12**) sur le bassin versant expérimental du Yar (Partie 2.2). Ce sont des images d'intensité acquises dans la bande C, généralement bien adaptées pour les applications agricoles (McNairn et al., 2002; Baghdadi et al., 2009). Le mode Ultra-fin de Radarsart-2 possède la meilleure résolution spatiale disponible par télédétection radar en bande C. Ces données apparaissent ainsi particulièrement bien adaptées pour des paysages agricoles fragmentés pour lesquelles la taille moyenne des parcelles est inférieure à 1 ha. A cette échelle spatiale, les images ne sont disponibles qu'en polarisation sélective unique (HH ou VV). Les

images d'intensité sont ici en polarisation VV, c'est-à-dire en polarisation verticale en émission et réception, polarisation généralement plus sensible aux éléments verticaux des surfaces.

Tableau 12- Caractéristiques des images Radarsat-2 SLC (Rossignol, 2011)

Satellite : Radarsat-2 Produit SLC U22	27-mai-11	20-juin-11	07-août-11	31-août-11
Longueurs d'onde	bande C : 3.75 à 7.5 cm			
Centre de fréquence	5.405 GHz			
Polarisation	"VV"			
Largeur de la fauchée	20 km.			
Angle d'incidence	45.5°-46.5°			
Résolution approximative	2*2 m.			
Orbite	Ascendante			

Parallèlement à l'acquisition des images, des relevés de terrains (100 – 120 parcelles) ont été effectués durant l'été 2011 (mai – août 2011), Les relevés d'occupation et d'usage des sols distinguent :

1) **L'occupation et l'usage des sols à l'échelle parcellaire**
   - Les différentes céréales (maïs, blé, orge, luzerne…)
   - Les sols nus
   - La végétation arborée (boisements)
   - Les prairies (fauchées, pâturées)
   - Les surfaces en eau
2) **Les modes de gestion et pratiques culturales**
   - Fauche, pâture sur les prairies
   - Type de labour, semis…
3) **Les états de surface sur certaines parcelles**
   - Rugosité sur les sols nus
   - Humidité volumique des sols (relevés à partir d'un TDR)
   - Hauteur de la végétation, taux de couverture…

La méthodologie de traitement est exposée dans la **Figure 26.** Elle consiste dans un premier temps à corriger géométriquement chaque image Radarsat-2 à partir de la base SIG existante sur le site et à les géoréférencer dans un référentiel commun : le Lambert 2 étendu. La réduction du chatoiement ou « speckle » en anglais, peut être considéré comme un prétraitement radiométrique systématique en imagerie radar. Provoqué par l'interférence aléatoire du signal rétrodiffusé vers le capteur, elle provient de la diffusion multiple qui se produit dans chaque pixel de l'image. Inhérente à toute image radar, elle se manifeste par une texture hétérogène qui nuit à son exploitation. De nombreux filtres visant à réduire ce chatoiement existent, le filtre Lee (Lee et al., 1994) qui permet une réduction du « bruit » tout en préservant l'information spatiale et radiométrique de l'image est appliqué. Chaque image en intensité est ensuite transformée en coefficient de rétrodiffusion (σ°) avec la formule suivante :

- $\sigma° = 10 * \log_{10}(CN)$
- Avec σ° (coefficient de rétrodiffusion en dB et CN, compte numérique en intensité)

La transformation logarithmique en base 10 permet de compresser la grande gamme des valeurs en intensité dans une échelle d'analyse exploitable, comprises généralement entre -50 et 20 dB.

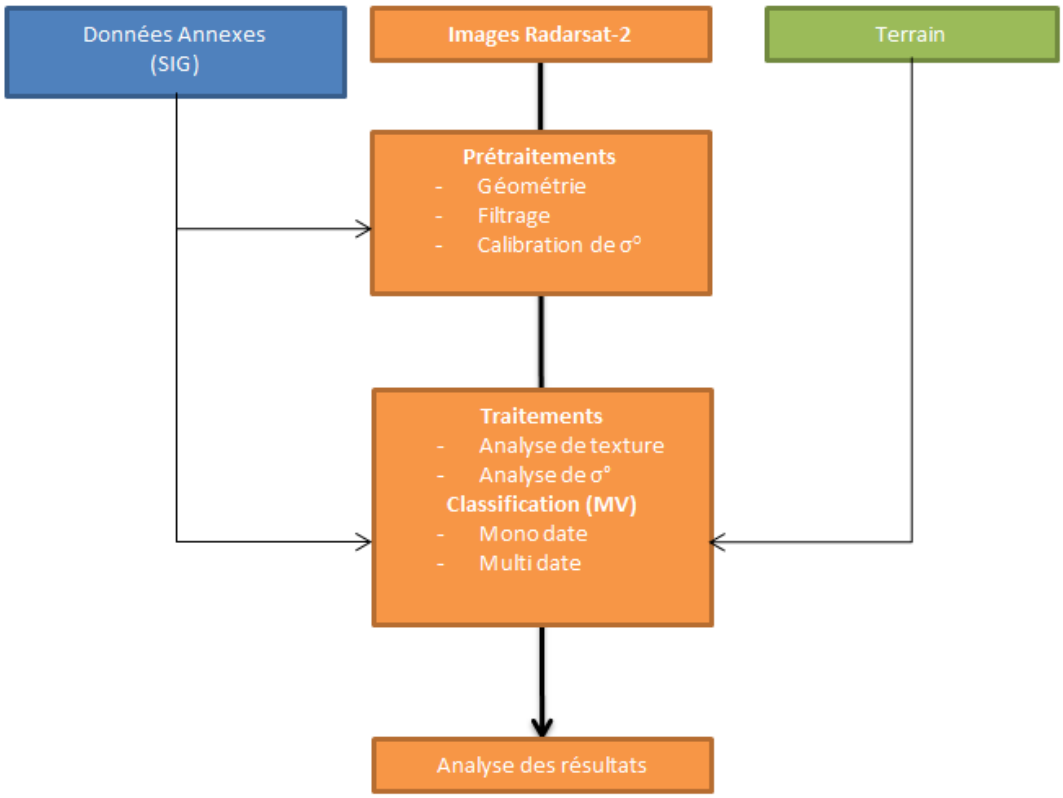


Figure 26- Méthodologie de traitements des images Radarsat-2 pour la caractérisation de l'occupation des sols sur le bassin versant du Yar (2011)

Deux types de traitement sont effectués à l'échelle parcellaire : des analyses de texture (homogénéité et corrélation) et des analyses de σ° pour chaque date. Les images sont confrontées aux données terrain et classifiées avec l'algorithme du Maximum de Vraisemblance (MV).

❖ **Résultats**

- Des σ° très proches entre les différentes cultures

Les σ° associés aux céréales, au maïs et aux prairies ont des profils temporels relativement proches (**Figure 27**) avec des valeurs maximales relevées le 20 juin (entre-12 dB et -11 dB). Il apparait donc difficile sur une date de classifier ces différents types d'occupation des sols. En revanche, les surfaces en eau caractérisées par une surface spéculaire ont un profil rectiligne avec des σ° très faibles (autour de -13.5 dB). Les forêts ont également une courbe assez homogène avec un petit pic au mois de juin, les σ° sont ici compris entre -11 et -10 dB. Ces valeurs relativement importantes pour la forêt sont notamment liées au fort angle d'incidence des images (46°) qui rend le signal rétrodiffusé sensible à la végétation. Cet angle d'incidence a tendance par ailleurs à lisser les différents types de diffusions liées à la rugosité de surface notamment, ce qui explique les faibles écarts d'intensité entre les cultures.

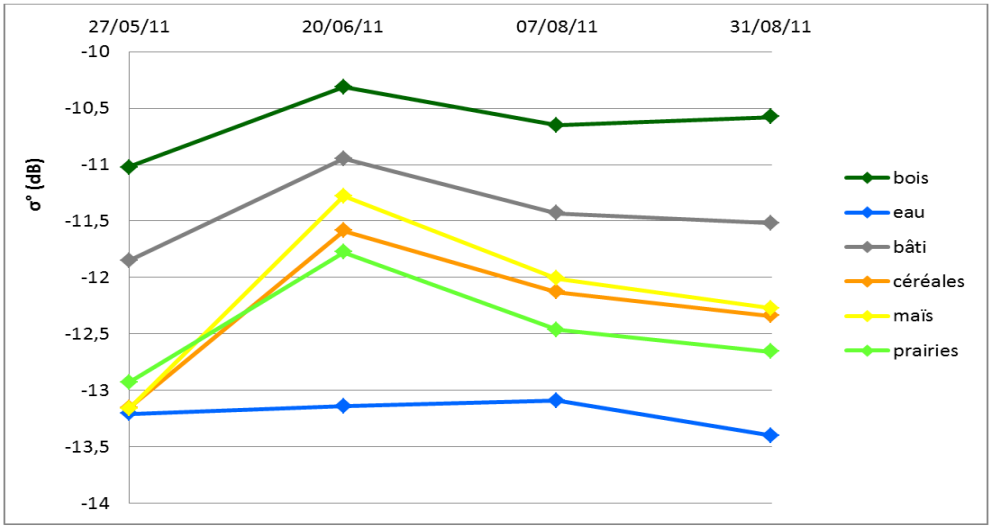


Figure 27- Evolution moyenne des σ° pour 6 classes d'occupation des sols entre mai et aout 2011 (Rossignol, 2011)

- Des profils temporels reliés aux pratiques culturales

Les pratiques culturales peuvent indirectement être extraites à partir des profils temporels de certains types d'usage des sols (**Figure 28**). Ainsi, concernant les céréales, trois espèces dominent sur le bassin versant du Yar : l'avoine, l'orge et le blé (majoritaire). On remarque ainsi qu'au mois de mai, les σ° du blé sont beaucoup plus faibles que les σ° d'avoine car ces derniers sont semés avant et sont plus développés avec une densité de végétation importante. Les parcelles d'avoine en mai ont donc une plus forte interaction avec le signal émis en bande C et en polarisation VV, sensible aux structures verticales de la végétation. La courbe de l'avoine tend ensuite à baisser du fait de la récolte en juillet et de l'absence de végétation en aout (résidus de culture). Pour le blé, la courbe connait un pic en juin où le blé présente son développement maximum et une légère baisse en août après la récolte. Malgré ces différences temporelles, la différenciation entre les différents types de céréales n'a pu aboutir car le nombre de parcelles en avoine et en orge sont trop peu représentés sur le bassin versant étudié. L'analyse statistique n'est donc pas significative. Cependant, de récents travaux sur la Beauce à partir d'une série de 8 images Radarsat-1 prises durant la période végétative (mars-octobre)

ont montré que l'on pouvait caractériser les différentes céréales entre elles grâce à leurs signatures temporelles (Dallon, 2013).

Pour le maïs, deux pratiques culturales sont ici analysées : le maïs classique et le maïs sous bâche. Les valeurs de σ° pour chaque pratique culturale sont quasiment identiques et ne permettent donc pas de les discriminer. On note cependant des valeurs de σ° très faibles en mai quand le maïs vient d'être semé (réflexion spéculaire) et maximales au mois de juin avec un taux de couverture par la végétation beaucoup plus important (réflexion diffuse). Pour les prairies en revanche, les modes de gestion (pâture, fauche…) semblent difficiles à discriminer, les σ° étant très proches quels que soient les modes de gestion. Les modes de gestion des prairies restent complexes à identifier, car ces dernières requièrent un suivi temporel particulièrement élevé. La combinaison optique/radar apparait pour leur caractérisation particulièrement recommandée. De récents travaux effectués au LETG Rennes Costel (Dusseux et al., 2011, 2012), ont ainsi montré que l'utilisation combinée de l'imagerie optique et radar fournit plus d'information pour caractériser les modes de gestion des prairies.

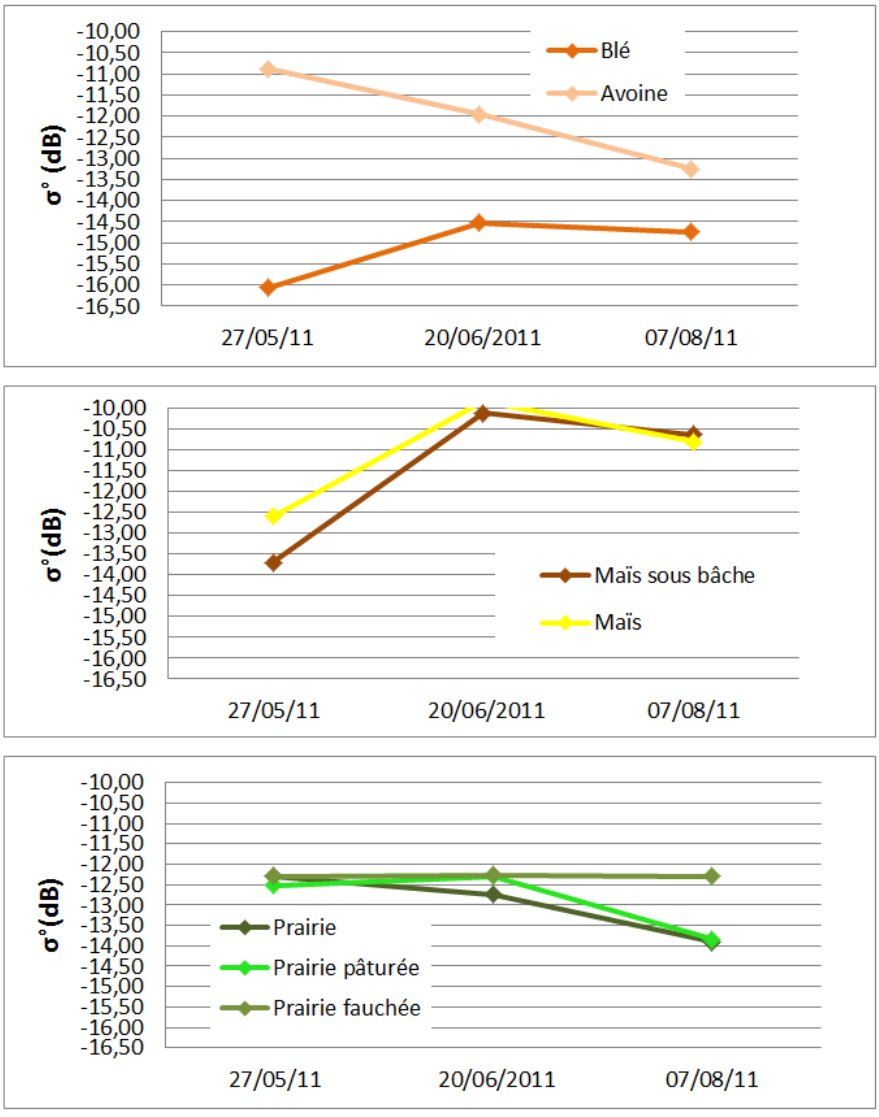


Figure 28- Evolution temporelle des σ° en fonction de différents types d'occupation et d'usage des sols

- L'apport du multi-temporel pour la classification de l'occupation des sols

Les classifications sont effectuées à partir des σ° et des deux indices de texture (Homogénéité et corrélation). Les classifications mono-dates ne sont pas satisfaisantes avec un indice de Kappa (K) de 0.01 pour le 27 mai 2011, 0.54 pour le 20 juin et 0.6 pour le 7 aout 2011 (**Figure 29**). L'image du mois d'aout apparait ainsi la plus « pertinente » pour la classification de ce territoire agricole. Cependant, lorsque l'on intègre les profils temporels dans le processus de classification, on obtient un indice de Kappa proche de 0.9 (0.87) ce qui permet de valider la classification. La série de quatre images Radarsat-2 en mode Ultrafin apparait ainsi particulièrement intéressante pour classifier les principaux types d'occupation des sols à l'échelle parcellaire sur un territoire agricole fragmenté. En revanche, si la résolution spatiale apparait très bien adaptée, la résolution temporelle apparait trop faible pour caractériser les modes de gestion des prairies, ou discriminer différentes pratiques culturales sur les maïs. La fréquence d'acquisition d'images optiques/radar sur ces territoires caractérisés par de fortes variations spatiotemporelles représente donc un défi majeur pour une fine identification et suivi

de l'évolution de l'occupation des sols. Cet aspect fait l'objet d'ambitieux programmes de recherche interdisciplinaires qui seront détaillés dans le chapitre 3.

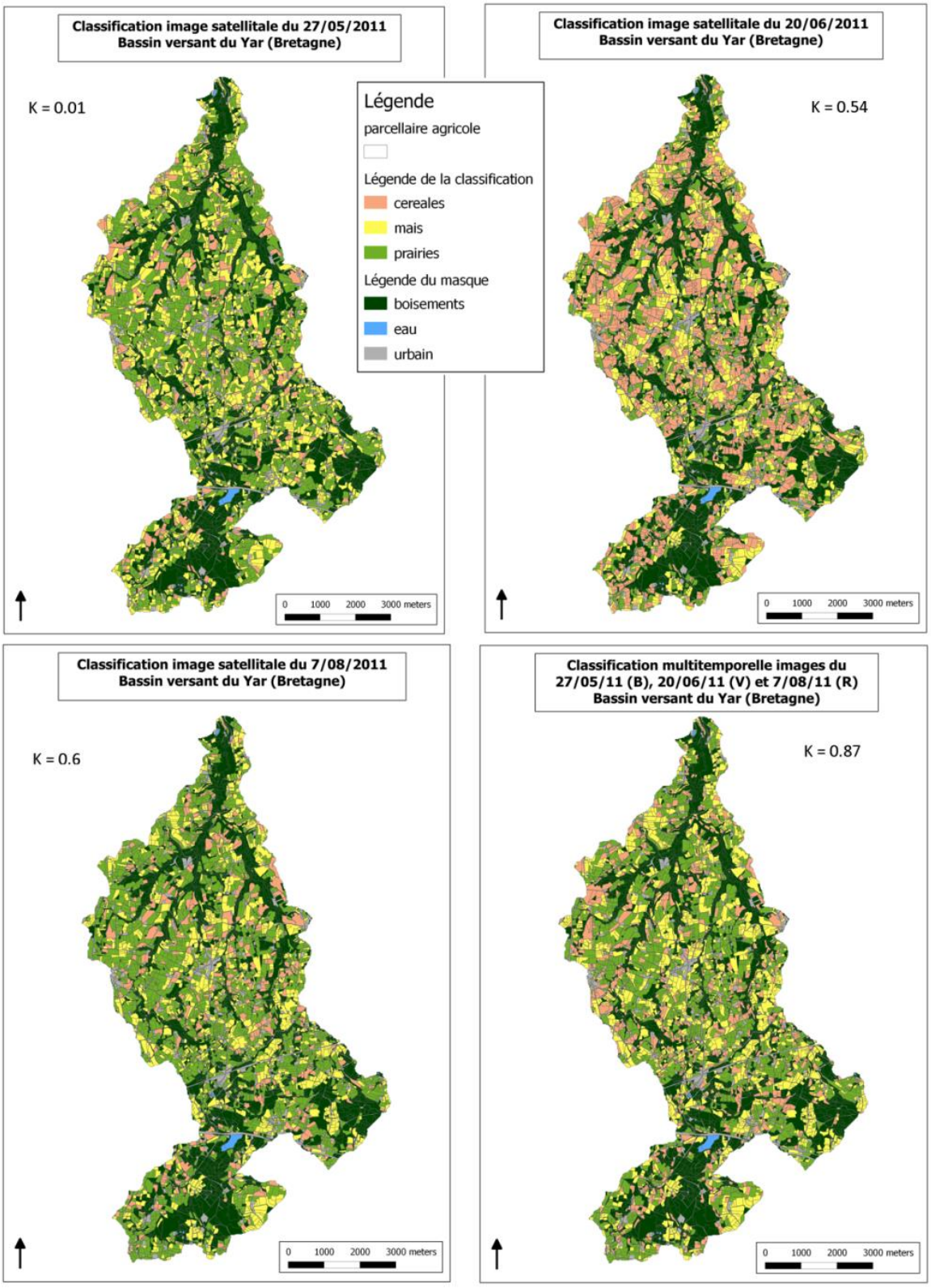


Figure 29- Classifications supervisées à partir d'images radar (Rossignol, 2011)

3.2. Etude des changements intra annuels des changements d'occupation des sols au sein d'une zone humide

La télédétection est là aussi l'outil privilégié pour inventorier les zones humides (Hubert-Moy et al., 2004). Elle permet en effet d'identifier et de spatialiser les principaux critères d'identification des zones humides qui correspondent à : la présence des surfaces en eau, des sols humides et, plus récemment, de la végétation hygrophile grâce notamment à l'amélioration des données de télédétection en terme de résolution spatiale et temporelle.

- **Site d'étude**

Dans le cadre du programme Programme ESA-CSA SOAR portant sur l' «Evaluation of RADARSAT-2 quad-pol data for functional assessment of wetlands», l'identification et le suivi des surfaces en eau dans les zones humides de la ZA Armorique ont été effectués à partir d'une série d'images radar pleinement polarimétrique issus du capteur Radarsat-2 (Pottier et al., 2012). Les résultats ont montré que l'entropie était la variable polarimétrique la plus pertinente pour étudier la dynamique spatiotemporelle de ces objets. Cependant, caractériser la végétation présente au sein des zones humides nécessite des données THRS acquises quotidiennement qui restent encore peu évaluées sur cette thématique. Les travaux exposés ici sont les résultats préliminaires d'un projet de thèse financé par la région Bretagne et le CNES dans le cadre du programme DIVA 3-AGRICONNECT ; Continuités écologiques dans les paysages agricoles.

Ce projet vise entre autre à l'évaluer une série de données multi temporelles radar pour la cartographie des principaux types de végétation présents à l'intérieur des zones humides (Betbeder et al., 2013, 2014b, 2014c). L'espace d'étude est le marais de Sougéal localisé dans la ZA Armorique présentée dans la partie 2.2 (**Figure 30**) caractérisé par des niveaux d'inondation variables tout le long de l'année. L'évolution spatio-temporelle du niveau d'eau sur le marais est fortement lié au climat, cependant la mise en place de deux ouvrages retenant l'eau de crue du Couesnon au nord et au sud du marais communal permet une gestion des niveaux d'eau et un maintien de plusieurs usages dans le marais (réserve pour les oiseaux d'eau, reproduction du brochet, pâturage…). Le marais communal de Sougéal est ainsi essentiellement composé de végétation herbacée basse dont les communautés végétales se structurent selon les niveaux et les durées d'inondations conditionnés par la gestion hydraulique et la topographie du site (Rapinel, 2012a). On distingue ainsi les prairies avec des communautés de végétation hydrophytes telles qu'*Eleocharis palustris*, *Ranunculus peltatus*…qui se développent au sein des canaux en eau tout au long de l'année. Sur la partie la plus inondée (supérieure à 3 mois par an), on retrouve les prairies hygrophiles (*Glyceria fluitans*, etc.), enfin, pour les surfaces inondées moins de 3 mois par an qui sont majoritaires sur le marais, les prairies méso-hygrophiles (*Alopecurus geniculatus*).

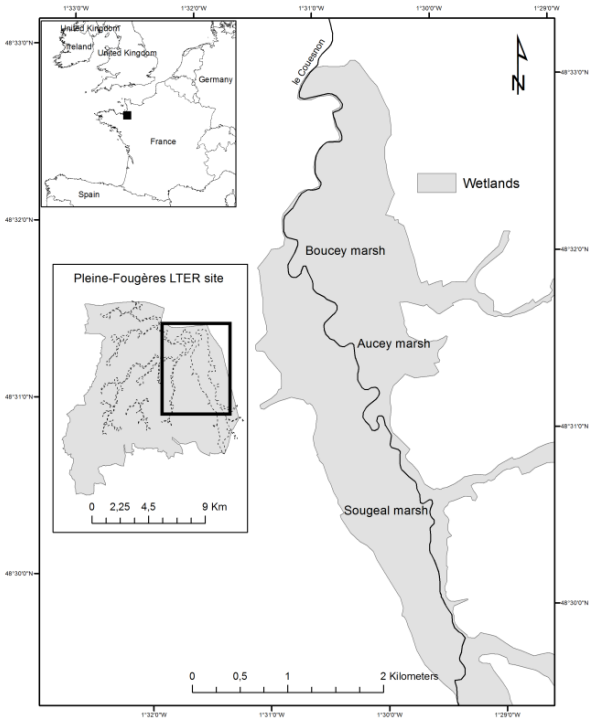


Figure 30- Localisation du marais de Sougéal (Betbeder et al., 2013)

❖ **Données**

Une série de six images TerraSar-X en dual-polarisation (bande X ; 9.65 GhZ) est acquise en 2012 (Agence Spatiale Allemande ; DLR) à une résolution spatiale de 1.5*1.5 mètres en polarisation HH et VV avec un angle d'incidence moyen de 37° **(Tableau 13).** Parallèlement à ces acquisitions, des campagnes de terrain sont effectuées pour caractériser l'occupation des sols à l'intérieur du marais afin de calibrer et valider les classifications produites. Six classes d'occupation des sols sont étudiées : (1) les surfaces boisées présentes sur le bourrelet alluvial du Couesnon ; les surfaces en eau : (2) étang et (3) canaux ; (4) les prairies inondées hygrophiles (*Glyceria fluitans*), (5) les prairies méso-hygrophiles (*Alopecurus geniculatus*) et (6) les prairies à plantes hydrophytes (*Eleocharis palustris*).

Tableau 13- Série temporelle TerraSar-X sur le marais de Sougéal (2012)

Résolution spatiale	2*2 mètres
Polarisation	Dual (HH/VV)
Angle d'incidence	37° (Ascendant droit)
Dates	04/19/2012 06/30/2012 07/12/2012 08/03/2012 09-15-2012 10-18-2012

❖ **Méthodologie**

Sur la série d'images, deux types d'informations sont extraites après les prétraitements géométriques et radiométriques : les coefficients de rétrodiffusion (σ°) pour les polarisations HH et VV et l'entropie de Shannon issue la matrice de covariance C2 (Cloude & Pottier, 1996). L'entropie, qui peut être considérée comme une mesure d'hétérogénéité des mécanismes de diffusion d'un objet géographique, apparaît être un indicateur intéressant pour suivre l'évolution spatio-temporelle de l'occupation des sols dans la zone humide où le niveau d'inondation conditionne le développement et le type de végétation. Chaque variable multi temporelle (entropie, σ° de HH et VV) est ensuite intégrée dans un processus de classification supervisée de type Support Vector Machines (SVM). Cet algorithme de classification supervisé offre la possibilité d'insérer des données multi temporelles et de les exploiter dans un espace projeté où la séparabilité des classes est optimale (Berndt & Clifford, 1994). Les classifications sont réalisées avec différents noyaux (linéaire, polynomial, gaussien,…) afin d'évaluer leurs performances pour la caractérisation des zones humides.

❖ **Résultats**

D'un point de vue multi temporel, les courbes d'évolution de l'occupation des sols de σ° de HH et VV apparaissent relativement similaires (**Figure 31**). Ainsi les valeurs de σ° de HH et VV sont très faibles pour la classe « étang » (entre -20 et 25 dB) sur la période étudiée car la diffusion est ici spéculaire et peu de signal est rétrodiffusé vers le capteur. Les autres classes d'occupation des sols ont des profils temporels plus complexes avec une variabilité temporelle plus marquée. Ainsi les surfaces en eau de type mare et canaux connaissent des σ° très faible au mois d'Avril où la diffusion spéculaire domine, puis avec le développement de la végétation de type *Eleocharis palustris* durant l'été, l'interaction entre signal et cible est plus importante (diffusion double) et les σ° tendent à augmenter. Cependant, les profils temporels entre les différents types d'occupation des sols au sein de la zone humide restent relativement similaires pour les polarisations HH et VV, leur discrimination nécessite l'exploitation d'autres paramètres comme l'entropie de Shannon issue de la décomposition polarimétrique de la matrice de diffusion.

Sur la **Figure 32**, on remarque la aussi que les valeurs d'entropie les plus faibles concernent la classe « étang » où un type de diffusion domine (diffusion spéculaire). A l'inverse, l'entropie est beaucoup plus importante pour les surfaces boisées caractérisées par plusieurs mécanismes de diffusion, dont la diffusion double et de volume. Concernant la caractérisation des prairies, les profils temporels des prairies à plantes hydrophytes et des prairies hygrophiles et méso-hygrophiles apparaissent clairement liés au développement phénologique des plantes et au niveau d'inondation du marais. L'entropie apparait ainsi être une source d'information intéressante pour leur classification.

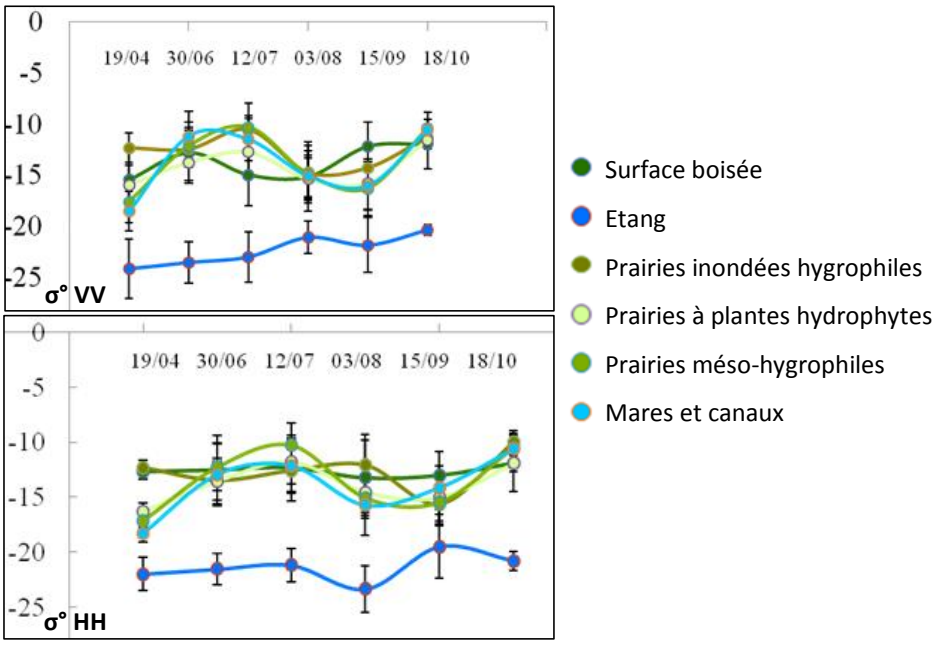


Figure 31- Suivi multi temporel de l'occupation des sols au sein de la zone humide de Sougéal avec les polarisations HH et VV (Betbeder et al., 2013)

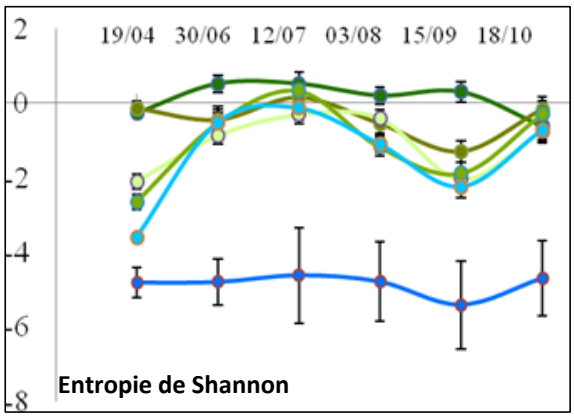


Figure 32- Suivi multitemporel de l'occupation des sols sur le marais de Sougéal avec l'entropie de Shannon (Betbeder et al., 2013)

Les indices de Kappa des classifications supervisées réalisées sur le marais de Sougéal à partir de la série d'images TerraSar-X en 2012 sont exposés dans le **Tableau 14**. Il présente ainsi les indices de Kappa associés aux trois variables radar étudiées (entropie et σ° HH, VV) et intégrées dans trois noyaux au sein de l'algorithme de classification SVM (linéaire, polynomial et gaussien). L'entropie apparait ainsi comme la variable temporelle la plus discriminante pour la classification de la zone humide de Sougéal et le SVM avec un noyau gaussien, l'algorithme de classification le plus approprié. La polarisation HH apparait plus pertinent pour la caractérisation des sols de la zone humide que la polarisation VV cependant, quel que soit le noyau choisit, les indices de Kappa restent inférieurs à 0.65, ce qui ne permet pas une exploitation de ces classifications. L'entropie, sensible aux mécanismes de diffusion aléatoires des objets étudiés apparait ainsi comme une variable polarimétrique intéressante pour le suivi et la caractérisation de l'occupation des sols au sein des zones humides.

Tableau 14- Indices de Kappa des classifications multi-temporelles sur le marais de Sougéal en 2012 (Betbeder et al., 2013)

	SVM (Noyau Linéaire)	SVM (Noyau polynomial)	SVM (Noyau gaussien)
Entropie	0,73	0,75	**0,85**
σ° HH	0,47	0,43	**0,65**
σ°VV	0,31	0,33	**0,49**

❖ **Conclusion**

Une série d'images radar à très haute résolution spatiale en mode partiellement polarimétrique offre ainsi des perspectives de classification d'occupation des sols intéressantes sur des territoires aux dynamiques spatiales complexes comme les zones humides. L'apport de la polarimétrie même partielle (dual-pol) à très haute résolution spatiale apparait dans cet exemple très clairement et permet une fine caractérisation de la végétation au sein des zones humides. Cependant, les algorithmes de classification intégrant des séries d'images à très haute résolution spatiale sont toujours en phase d'évaluation et les résultats diffèrent encore beaucoup selon le type d'algorithme utilisé. Leur développement et leur amélioration représentent un enjeu majeur pour la caractérisation et suivi de l'occupation des sols à partir de données radar. Ainsi, pour le futur proche, la résolution temporelle des capteurs radar continuera de s'améliorer : le capteur TerraSar-X sera mis en constellation avec le satellite Paz en 2014 et offrira une résolution temporelle accrue, d'autres programmes comme « Sentinel » de l'Agence Spatiale Européenne (2015) ou « Radarsat constellation » de l'Agence Spatiale Canadienne (2018) sont en cours de développement.

3.3. Etude des changements inter annuels des changements d'occupation des sols en milieu semi-aride

Dans le cadre du programme de recherche canadien Data For Research Use (DRU), « Development of signs of desertification by radar remote sensing in West Africa » financé par l'Agence Spatiale Canadienne et coordonné par R. Magagi (Université de Sherbrooke), les potentialités d'une série multi temporelle radar pour l'identification d'indicateurs de désertification sont évaluées en milieu semi-aride (Daouda, 2012). Le territoire étudié correspond au degré carré de Niamey (site des projets Hapex-Sahel, 1991-1994 et AMMA-CATCH, 2001) au Niger, caractérisé par une explosion démographique depuis les années 1980 et une dégradation continue des écosystèmes (déforestation, dégradation de la qualité des sols, de l'eau…). Une série d'image radar multi sources est ici évaluée durant la saison des pluies (mai à septembre) pour le suivi de l'occupation des sols entre 1993 et 2009. Nous présentons ici uniquement l'évolution des changements détectés à partir de méthodes post classifications sur deux types d'occupation des sols : les sols nus et les sols couverts par la végétation (Daouda et al., 2011). A cette époque de l'année, les surfaces en sol nu sont la conséquence d'une pratique culturale spécifique (semis, sarclage…) ou d'un sol impropre à l'agriculture (latérite, sable, etc.). Leur évolution spatiotemporelle durant la saison des pluies offre ainsi un indicateur de dégradation des sols intéressant pour une meilleure compréhension et gestion du territoire.

❖ **Site d'étude et données**

Le site d'étude est localisé dans le degré carré de Niamey au sud-ouest du Niger (**Figure 33**) et est caractérisé par un climat semi-aride, la saison sèche dure environ 8 mois (octobre à avril-mai) suivie par une courte saison des pluies (mai-juin à septembre). Le cumul annuel des précipitations y est très variable selon les années (entre 400 et 700 mm) et se concentre presqu'exclusivement durant la saison des pluies. La durée et l'intensité des précipitations durant la saison des pluies constitue le principal élément affectant la distribution spatio-temporelle de la végétation.

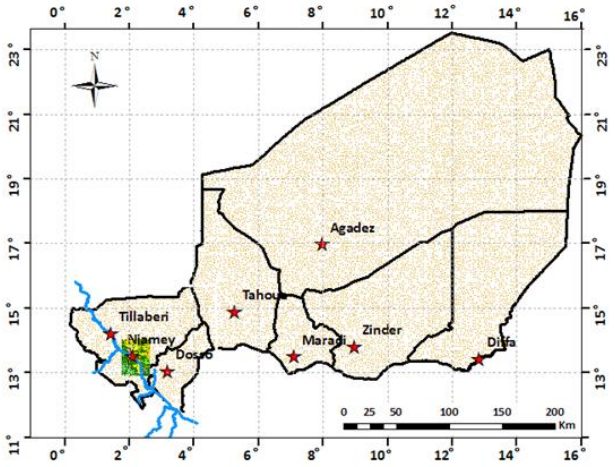


Figure 33- Localisation du site d'étude au Niger (Daouda, 2012)

L'espace d'étude s'intègre dans un ensemble géographique constitué essentiellement de plateaux cuirassés où se développent des formations ligneuses organisées en structures originales appelées « brousses tigrées ». Elles se présentent ainsi comme une alternance de bandes de sol nu et de ligneux denses particulièrement typiques des milieux sahéliens puisqu'elles résultent de la contraction de la végétation face à des contraintes extérieures comme notamment la sécheresse (Ambouta et al., 1996). L'agriculture dans ce contexte est essentiellement une agriculture de subsistance caractérisée par un faible développement technique et de faibles rendements. Toutefois, l'espace d'étude subit une évolution marquée depuis plusieurs décennies, passant progressivement d'une utilisation pastorale extensive dominante à une utilisation agro-pastorale, voire nettement agricole orientée vers l'agriculture vivrière à base de mil et de niébé (D'Herbes et al., 1995). Ainsi, dans cette région du sud-ouest du Niger, la très forte augmentation des surfaces cultivées afin de répondre à la forte croissance démographique annuelle (environ 4 %) se traduit depuis 1950, par un changement important du paysage : les surfaces cultivées ou laissées en jachère courte sont ainsi passées de 12 % à 63 % entre 1950 et 1992 et la durée moyenne des jachères a diminué de 15-20 ans en 1950 à 3-4 ans en 1995 (Favreau et al., 2009). Par ailleurs, la plupart des jachères s'étendent partiellement sur les parcelles agricoles, avec des parties cultivées et des parties laissées plus ou moins longtemps sans cultures (**Figure 34**). La délimitation floue des surfaces cultivées associée à la présence d'une importante couverture nuageuse durant la saison des pluies (qui correspond à la période de mise en culture) rend donc très complexe l'identification des cultures par télédétection sur ce territoire (D'Herbes et al., 1995). La télédétection radar qui s'affranchit des conditions nuageuses et qui est sensible aux paramètres de surface comme la rugosité apparait ainsi une

alternative intéressante pour étudier les changements d'occupation des sols durant cette période. Elle offre la possibilité d'analyser à fine échelle l'évolution des changements majeurs survenus sur un territoire où l'information spatiale est rare. L'analyse de ces changements apparait être ainsi un facteur clé pour une meilleure gestion et exploitation des ressources dans un contexte de changement global rendant ces espaces particulièrement vulnérable aux sécheresses.

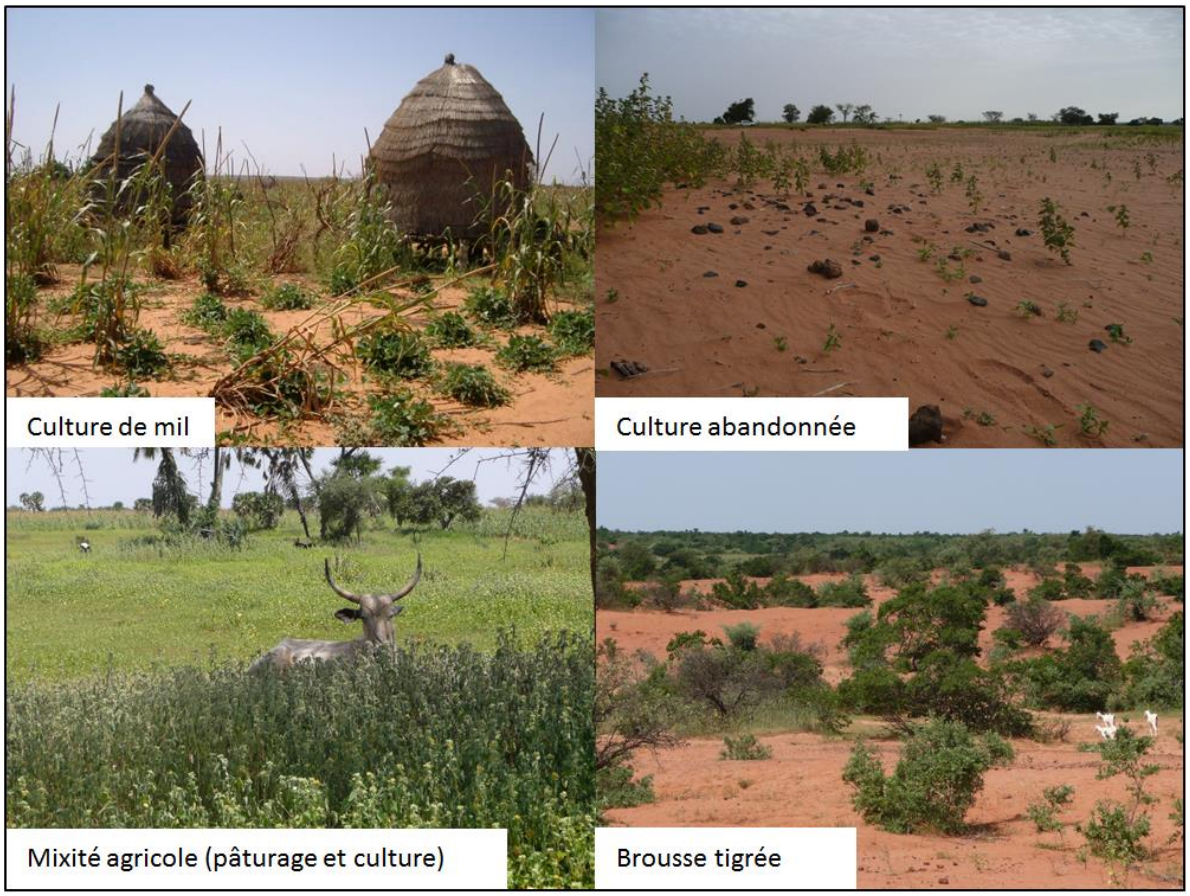


Figure 34- Occupation du sol sur le site d'étude au Niger (Octobre 2010)

- **Méthodologie**

Onze images radar prises durant la saison des pluies entre 1993 et 2009 sont analysées. Ce sont des images multi-sources (ERS, Radarsat-1 et Envisat) caractérisés par différents angles d'incidences et différentes polarisations afin d'évaluer les configurations d'acquisition optimales pour la discrimination des sols couverts par la végétation et les sols nus. La méthodologie appliquée vise dans un premier temps à effectuer les prétraitements des images radar (**Figure 35**), c'est-à-dire les corrections géométriques et radiométriques ainsi qu'une réduction du chatoiement des images à l'aide du filtre de Lee (7*7). Le type de classification retenu est de type orientée-objet car la résolution spatiale des images (12.5*12.5 m.) est suffisamment fine et surtout cette méthode permet de réduire l'influence du chatoiement dans le processus de classification (Jukka & Aristide, 1998). Pour cela, en plus des images de coefficients de rétrodiffusion, l'information texturale est exploitée pour chaque image. L'approche retenue est la matrice de cooccurrence des niveaux de gris qui permet une

exploitation optimale de l'information texturale (Anys & He, 1995). Deux paramètres statistiques, la moyenne et la corrélation ont été retenus sur les 14 paramètres que proposent (Haralick et al., 1973) en raison de leurs faibles corrélations avec les autres. La segmentation de l'image est ensuite effectuée à partir du calcul de trois paramètres de segmentation : le facteur d'échelle (100), les valeurs de forme (0.3) et de compacité (0.7) estimées sur les trois images (σ°, moyenne et corrélation). La classification des objets est réalisée à partir des données terrain et une approche de type floue. Celle-ci apparaît particulièrement bien adaptée à notre site d'étude caractérisé par des classes d'occupation et d'utilisation du sol aux limites sémantiques et spatiales floues. Chaque image classifiée est ensuite évaluée et validée à travers le calcul d'un indice de Kappa.

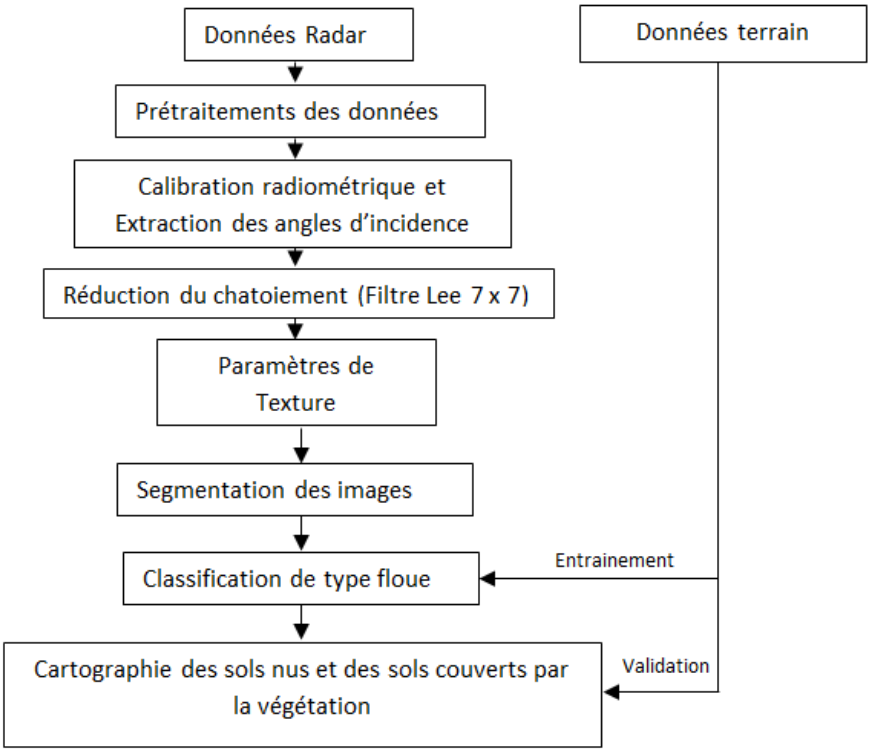


Figure 35- Méthodologie de classification orientée objet des images radar

❖ **Résultats**

Durant la saison des pluies, on constate que les images radar avec des angles d'incidence relativement élevés (entre 33° et 39°) offrent une meilleure discrimination des classes de sol nu et de sol couvert par la végétation. En revanche, on ne note pas de différences notables entre les différentes polarisations (HH et VV). Les sols nus présentent les coefficients de rétrodiffusion les plus faibles avec des moyennes variant entre -20 et -13 dB. En revanche, les sols couverts par la végétation ont des moyennes plus élevées liées notamment à la diffusion multiple et en double rebond que l'on constate sur les cultures de mil et les rizières le long du fleuve Niger. Les indices de Kappa sont satisfaisants, pour l'ensemble des classifications orientées-objet entre 1993 et 2009, ils dépassent ainsi les 0.85. Le croisement des classifications produites permet d'analyser quantitativement les changements et d'extraire les occurrences de sol nu (**Tableau 15**).

Tableau 15- Occurrences de sol nu durant la saison des pluies (Daouda, 2012)

Occurrences de sol nu	Pourcentage (%)	Superficie (ha)
Aucun sol nu : Couvert végétal permanent	31	135060
1 Sol nu sur 11 dates	16	69708
2 Sols nus sur 11 dates	12	52281
3 Sols nus sur 11 dates	9	39211
4 Sols nus sur 11 dates	8	34854
5 Sols nus sur 11 dates	7	30498
6 Sols nus sur 11 dates	6	26141
7 Sols nus sur 11 dates	4	17427
8 Sols nus sur 11 dates	3	13070
9 Sols nus sur 11 dates	2	8714
10 Sols nus sur 11 dates	1	4357
11 Sols nus permanents	1	4357
Total	**100**	**435678**

On note ainsi que 31% de la surface étudiée est caractérisée par un sol couvert par la végétation sur la période étudiée (1993 – 2009). Cette végétation permanente correspond essentiellement à de la brousse tigrée présente sur la partie sud de l'espace d'étude qui a presque totalement disparu au nord de Niamey. La « brousse tigrée » qui fournit en bois de chauffe une grande partie de la population de Niamey en constante augmentation apparait ainsi en forte régression dans la périphérie de Niamey (**Figure 36**).

La végétation permanente durant la saison des pluies correspond également à certains types de cultures irriguées que l'on retrouve le long du fleuve Niger (rizières, maraichage essentiellement) et dans certains talwegs. Cependant, l'essentiel de l'espace d'étude (68 %) est caractérisé par des changements d'occupation et d'usage des sols qui concernent essentiellement le nord de l'espace d'étude et la rive droite du fleuve Niger dont les sols sableux sont plus propices à l'agriculture. Ces espaces sont dédiés à une activité agricole assez intensive avec des temps de jachère très court entre les cultures de mil et de niébé et sont donc caractérisés par une forte variabilité inter saisonnière et interannuelle. Concernant les occurrences de sol nu, on note que près de 7% de la surface étudiée est caractérisé par des occurrences de sol nu supérieures ou égales à 8. Ces fortes occurrences de sol nu sont localisées dans la partie nord de l'espace d'étude caractérisé par une plus forte pression anthropique sur le milieu. Elles correspondent principalement à des parcelles agricoles surexploitées qui sont devenus impropres à l'agriculture et sans aucune végétation. L'intensification de la culture du mil en

particulier se fait alors au détriment du couvert végétal comme la brousse tigrée ou les jachères et provoque un encroûtement du sol (Leblanc et al., 2008).

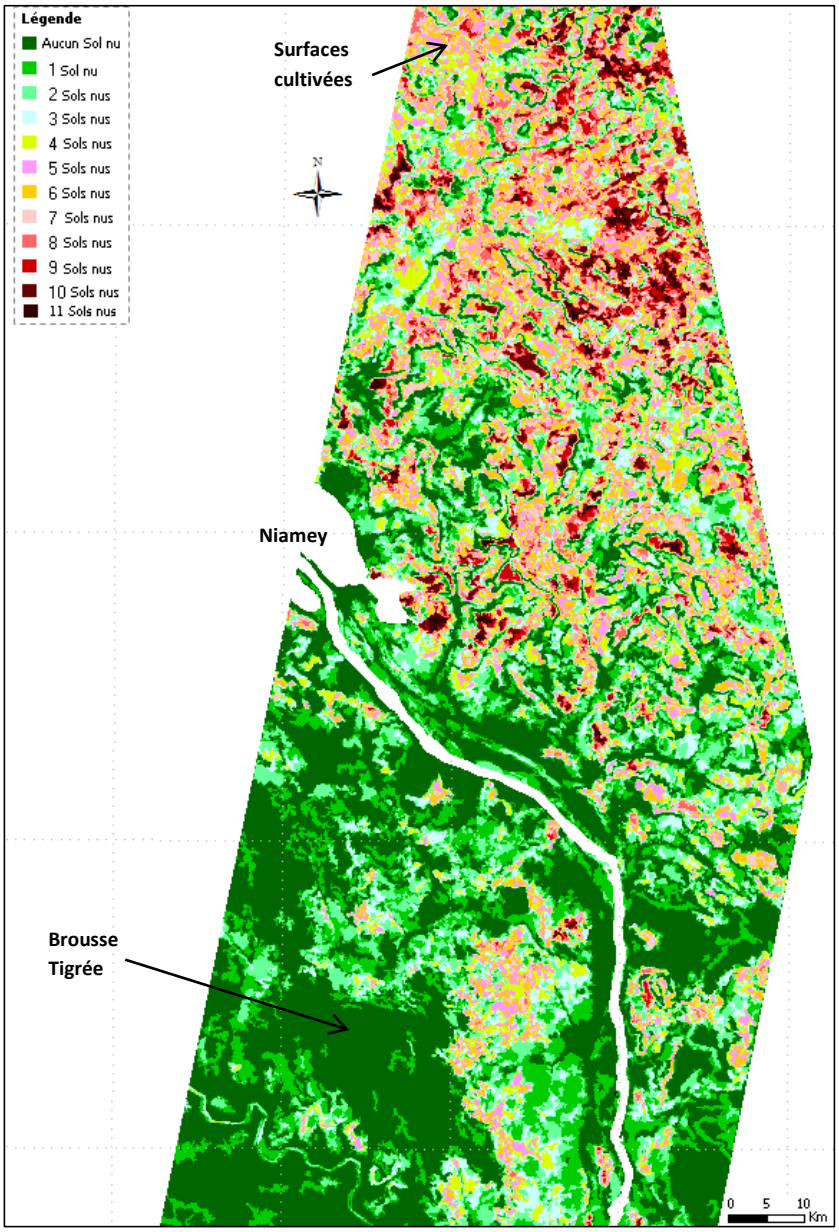


Figure 36- Occurrences des sols nus durant la saison des pluies (Daouda, 2012)

❖ Conclusion

Une série d'images radar multi sources a permis d'étudier l'évolution spatio-temporelle de l'occupation des sols durant la saison des pluies dans un milieu semi-aride où l'information spatialisée sur les changements d'occupation des sols fait défaut. Or sur cet espace d'étude caractérisé par une très forte pression anthropique sur les ressources naturelles, une fine connaissance des dynamiques spatiotemporelles de changements d'occupation des sols est

nécessaire pour une meilleure gestion du territoire. A ce niveau, l'imagerie radar a permis d'identifier et spatialiser les espaces, qui même durant la saison des pluies, sont peu ou pas recouverts de végétation et qui peuvent devenir impropres à l'agriculture. Dans un contexte de fort accroissement démographique et de changement climatique, cette information représente pour les gestionnaires locaux un outil pertinent pour leurs actions sur le terrain.

CHAPITRE 3- MODELISATION DES CHANGEMENTS D'OCCUPATION DES SOLS ET DURABILITE DES TERRITOIRES AGRICOLES

Mes travaux portant sur la modélisation spatiotemporelle des changements d'occupation et d'usage des sols visent, à partir de la prise en compte de données incomplètes et incertaines, à caractériser l'espace et les dynamiques spatio-temporelles des territoires étudiés. Parmi ceux-ci, les territoires agricoles caractérisés par de forts conflits d'usage et une dégradation de leur environnement sont privilégiés. La modélisation a pour objectif de dégager des règles de transition spatiales permettant (1) une meilleure analyse et compréhension des territoires étudiés et (2) une prédiction à court et moyen terme de ces changements. La modélisation développée dans le cadre de mes recherches repose sur l'intégration de connaissances plus ou moins approfondies des processus d'origine anthropique et biophysique qui produisent des changements d'occupation des sols observés, pour une meilleure compréhension des territoires et de leur évolution. Trois étapes fondamentales composent ainsi mon approche modélisatrice : (1) la détection et le suivi des changements, (2) l'identification des facteurs de changement et (3) leur prédiction à court moyen terme. Les modèles a développer pour cela demeurent complexes à mettre en œuvre, ils doivent en effet intégrer de multiples variables qui font parfois défaut sur certains sites d'étude. La prise en compte de l'incertitude doit donc être fortement intégrée tout au long du processus de modélisation. Les approches privilégiées peuvent être théoriques (approches systémiques ou à dire d'experts (Hubert-Moy et al., 2002; Nédélec et al., 2003; Corgne, 2004b; Houet et al., 2008), basées sur des approches crédibilistes ou de type floues (Corgne et al., 2004, 2012a; Le Hegarat-Mascle et al., 2006) et reposant sur l'analyse spatiale (Corgne et al., 2002, 2010; Corgne, 2005). Les modèles développés dans le cadre de mes recherches combinent généralement ces approches dans les différentes étapes du processus de modélisation des changements d'occupation des sols. Pour la première étape qui consiste à identifier, suivre et caractériser les changements d'occupation des sols sur un territoire, les données de télédétection demeure l'information de base. Sur ces données, différentes méthodes de détection de changements sont appliquées comme les vecteurs de changement, les croisements de classifications ou la fusion d'information. La deuxième étape du processus de modélisation qui consiste à identifier les règles de transitions des changements est réalisée à partir d'analyses spatiales et multicritères basées sur des méthodes statistiques et géostatistiques. La prédiction des changements d'occupation des sols est spatialisée à court et moyen terme à

partir d'approches probabilistes ou floues. L'ensemble du processus de modélisation est bien évidemment connecté au territoire étudié et plus spécifiquement, dans le cadre de mes recherches, à des problématiques environnementales. La prise en compte de la dimension spatiale des territoires étudiés intégrant différentes échelles d'analyse, la dynamique socio-économique et propre à l'environnement représente un enjeu important pour une compréhension intégrée du fonctionnement du géosystème étudié. Elle représente à ce titre, une information de base pour tout processus de modélisation intégré d'un territoire agricole (i.e. modélisation hydrologique, agro-hydrologique, climatique, des cultures…). Mes travaux de recherche s'insèrent ainsi dans différents programmes de recherche interdisciplinaires nationaux et internationaux (Projet AICHA/CEFIPRA, ANR ACCASSYA-SYSTERA, GEPMO, ORFEO/Pléiades…) visant par exemple à mesurer l'impact des changements d'occupation des sols sur le climat (Programmes TeradClim, Climaster), la dégradation des sols (Programme DRU), la qualité de l'eau (programme, Accassya, GEPMO, Orfeo/Pléiades), la biodiversité (Diva3-Agriconnect)…L'évaluation de la modélisation des changements d'occupation et d'usage des sols est réalisée dans un contexte de changement global et appliquée à des thématiques de durabilité. Les résultats issus de la modélisation sont ici confrontés à trois grandes problématiques environnementales relatifs aux territoires agricoles : (1) la gestion de la ressource en eau, (2) le changement climatique et (3) la dégradation des sols. L'étude de leurs interactions vise en priorité à proposer des solutions adéquates pour les acteurs et gestionnaires locaux des territoires étudiés. Ce troisième chapitre présente ainsi trois études portant sur l'analyse de ces interactions.

1. Modélisation des changements d'occupation et d'usage des sols

1.1. Application à la dégradation des sols en milieu semi-aride

Nous présentons ici les principaux résultats portant sur la modélisation de territoires agricoles en milieu semi-aride (Niger) confrontés à des phénomènes de désertification (programme de recherche canadien Data For Research Use (DRU), « Development of signs of desertification by radar remote sensing in West Africa » ; Chapitre II, Partie 3.3.).

- **Méthodologie**

Le phénomène de désertification est ici appréhendé comme un processus complexe de dégradation des sols d'origine naturelle et/ou anthropique menant à des conditions biotiques de type désertique. À partir des données disponibles sur le site d'étude (Hapex-Sahel) et les indications d'experts du milieu sahélien (chercheurs, gestionnaires et acteurs locaux), un processus de modélisation spatiale de type expert basé sur la règle d'inférence de Dempster-Shafer est développé (Corgne, 2004b; Daouda, 2012).

La méthodologie (**Figure 37**) est basée sur l'analyse d'indices de désertification extraites de données de télédétection et de données exogènes (économiques, physiques…). Le choix des facteurs est effectué à dire d'expert (botaniste, pédologue, hydrologue…) et leur validation

statistique est effectuée avec les données issues de campagnes terrain. A partir de cette expertise, 4 sources d'information sont identifiées parmi les données disponibles : la carte des « occurrences de sols nus » entre 1993 et 2009 réalisée à partir d'images radar (Chapitre 2, partie 3.3), la carte pédologique, la pression anthropique étant intégrée par la carte de localisation des forages qui indique la présence d'une activité agricole, et la carte d'intensité agricole. Les campagnes terrain réalisées en 2009 sur l'espace d'étude dans le cadre d'une approche pluridisciplinaire permettent de définir une nomenclature en trois classes : sol peu dégradé ; sol modérément dégradé et sol très dégradé (Jain & Goel, 2002; Chikhaoui et al., 2007). Celle-ci est basée sur notamment le type de sol, la pente, le taux de couverture végétale qui en saison des pluies ont un impact majeur sur le ruissellement et donc l'érosion des sols (Casenave & Valentin, 1989). Sur les 84 parcelles analysées, 55 soit 65,48 % sont caractérisés par une forte ou très forte vulnérabilité à la dégradation des sols.

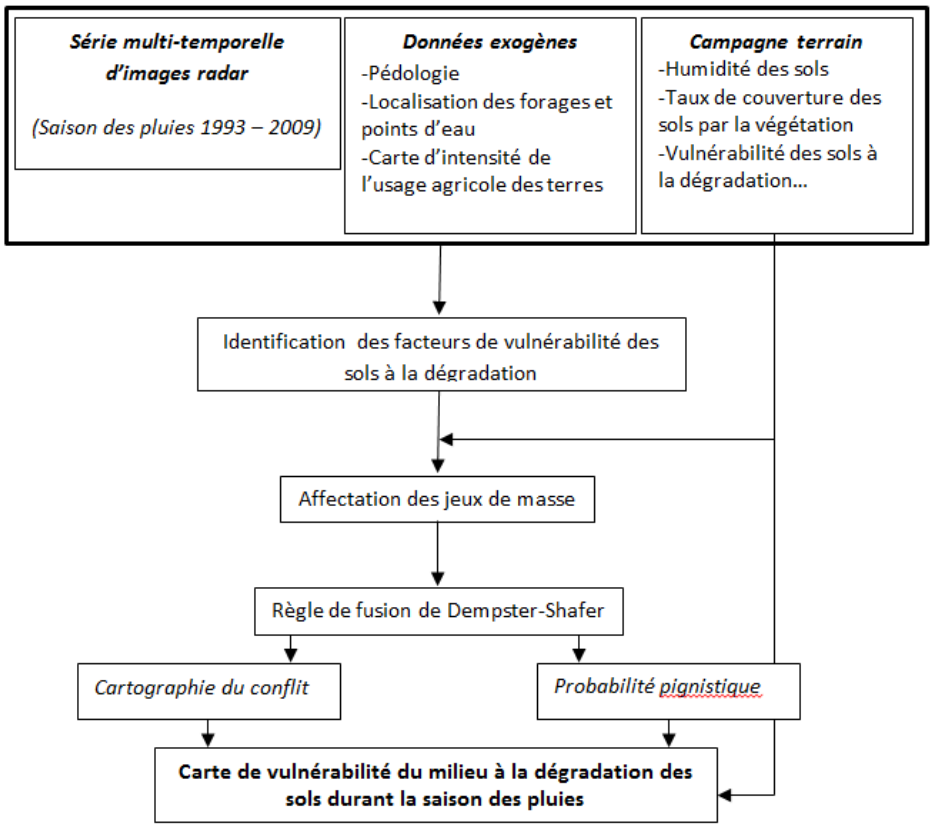


Figure 37- Organigramme méthodologique du processus de modélisation de désertification des sols

Les données issues des campagnes terrain sont analysées et croisées avec les quatre sources d'information considérées comme favorisant la dégradation des sols et donc le phénomène de désertification. L'étude des relations spatiales entre les facteurs accélérant le phénomène de dégradation des sols avec l'échantillonnage terrain montre que certains facteurs apparaissent plus significatifs que d'autres. Les variables correspondant aux occurrences de sols nus et l'intensification agricole sur l'espace d'étude apparaissent ici les plus explicatives. Par exemple la **Figure 38** montre une relation significative entre le nombre d'occurrence de sols nus observés sur la période 1993 – 2009 et les parcelles échantillonnées en deux classes (vulnérable ou non vulnérable à la dégradation des sols). Les parcelles avec de faibles occurrences en sol

nu apparaissent en effet sur les terrains moins vulnérables à la dégradation des sols que les fortes occurrences.

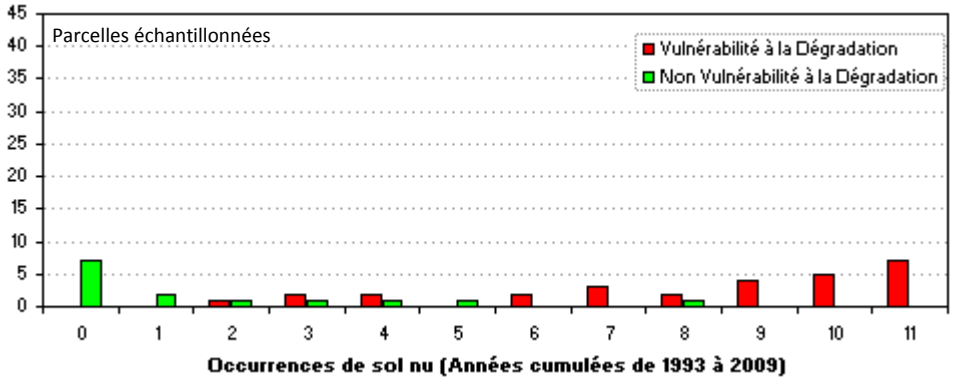


Figure 38- Relations spatiales entre et les occurrences de sol nu (1993-2009) et l'échantillonnage terrain (2009)

Concernant la prise en compte de la pression anthropique sur le milieu, la (**Figure 39**) illustre la pression entre l'intensification agricole de l'espace (%) et les observations terrain. On remarque ainsi que pour une utilisation des terres à des fins agricoles supérieure à 30 %, 89 % des observations terrain présentent une vulnérabilité du milieu à la dégradation des sols. L'espace d'étude est en effet caractérisé par des sols sableux épais plus ou moins lessivés qui doivent pour rester fertile connaitre une longue période de repos (jachère) et des apports réguliers en matière organique (intrants). Sur ces espaces fragiles, une pression agricole modérée suffit ainsi à accélérer les phénomènes de désertification.

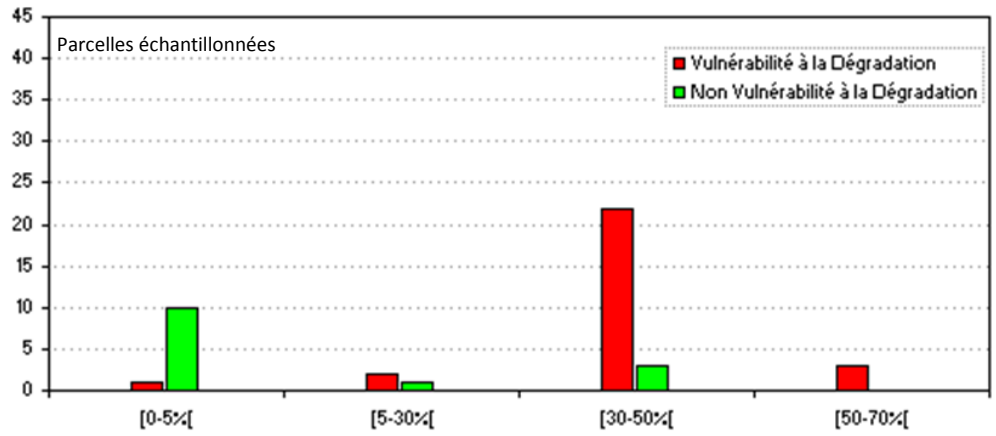


Figure 39- Relations spatiales entre l'intensification agricole et les parcelles échantillonnées sur le terrain (2009)

Pour les deux autres sources d'information (pédologie et localisation des forages), les données sont moins fiables et incomplètes, l'étude des relations entre ces facteurs et les observations terrain sont donc moins significatives. Ces différents aspects sont formalisés à dire d'expert à travers l'affectation des jeux de masse aux trois hypothèses définies dans le cadre de la théorie de Dempster-Shafer (**Tableau 16**) : « Vulnérabilité des sols à la dégradation » et « Non vulnérabilité des sols à la dégradation » et l'union des hypothèses représentant l'incertitude. Les fonctions de masses dont la somme pour chaque source d'information doit être égale à 1 est réalisée à dire d'expert et à partir de l'analyse des facteurs identifiés. Certaines sources d'évidence comme les fortes occurrences de sols nus (10 et 11 sols nus observés sur la période étudiée) sont ainsi caractérisées par une forte croyance en l'hypothèse « Vulnérabilité des sols à la dégradation ». En revanche, lorsque l'espace est caractérisé par aucun sol nu sur la période étudiée, la croyance est forte pour l'hypothèse « non vulnérabilité des sols à la dégradation » (0.85). Pour ces deux exemples, le niveau d'incertitude est faible. Il augmente lorsque la source d'évidence ne permet pas de soutenir clairement les deux hypothèses, par exemple, la source d'évidence représentant les espaces d'intensification agricole comprise entre 70 et 100% est caractérisée par une forte incertitude. Les relevés terrain et l'expertise ne permettent pas en effet d'identifier leur niveau de vulnérabilité sachant que ces espaces sont minoritaires sur l'espace d'étude et qu'ils correspondent généralement des surfaces irriguées proches du fleuve Niger.

L'ensemble de ces fonctions de masse sont ensuite combinées avec la règle de fusion de Dempster-Shafer qui pour chaque hypothèse permet de produire des cartes de « crédibilité » et mesurer les niveaux de conflit entre les sources d'évidence.

Tableau 16- Affectation des fonctions de masse pour chaque hypothèse

Sources d'évidence	Classes	**Vulnérabilité à la Dégradation des Sols**	**Non Vulnérabilité à la Dégradation des Sols**	**Incertitude**
Occurrences de sol nu	0	0,05	0,85	0,10
	1	0,15	0,55	0,30
	2	0,20	0,40	0,40
	3	0,35	0,25	0,40
	4	0,40	0,30	0,30
	5	0,50	0,10	0,40
	6	0,55	0,10	0,35
	7	0,60	0,10	0,30
	8	0,70	0,10	0,20
	9	0,80	0,05	0,15
	10	0,90	0,05	0,05
	11	0,90	0,05	0,05
Distance Points de contrôle au sol-Points d'eau (forages)	1 km	0,50	0,40	0,10
	2 km	0,80	0,10	0,10
	> 2 km	0,20	0,20	0,60
Intensité de l'usage agricole des terres	[0-5 % [	0,30	0,50	0,20
	[5-30 % [	0,30	0,30	0,40
	[30-50 % [	0,70	0,10	0,20
	[50-70 % [	0,60	0,20	0,20
	[70-100 %]	0,10	0,10	0,80
Unités de sol (Pédologie)	Argile	0,20	0,40	0,40
	Sable fin	0,60	0,20	0,20
	Sable grossier	0,80	0,10	0,10
	Sablo-limoneux	0,10	0,10	0,80
	Limono-sableux	0,20	0,30	0,50

La prise de décision est effectuée à partir du maximum de probabilité pignistique entre les hypothèses. Elle est ici privilégiée pour une prise de décision réalisée sur l'intervalle [croyance ; plausibilité] qui constitue un compromis intéressant entre la mesure « pessimiste » de la croyance (degré de confiance) et la mesure «optimiste» de la plausibilité (Smets, 1990; Corgne et al., 2003). Différents résultats sont ici exposés : les probabilités pignistiques pour les hypothèses « Vulnérabilité des sols à la dégradation » et « Non vulnérabilité des sols à la dégradation », les cartes de conflit entre les sources d'évidence et la carte finale de vulnérabilité des sols à la dégradation sur l'espace d'étude (**Figure 40**).

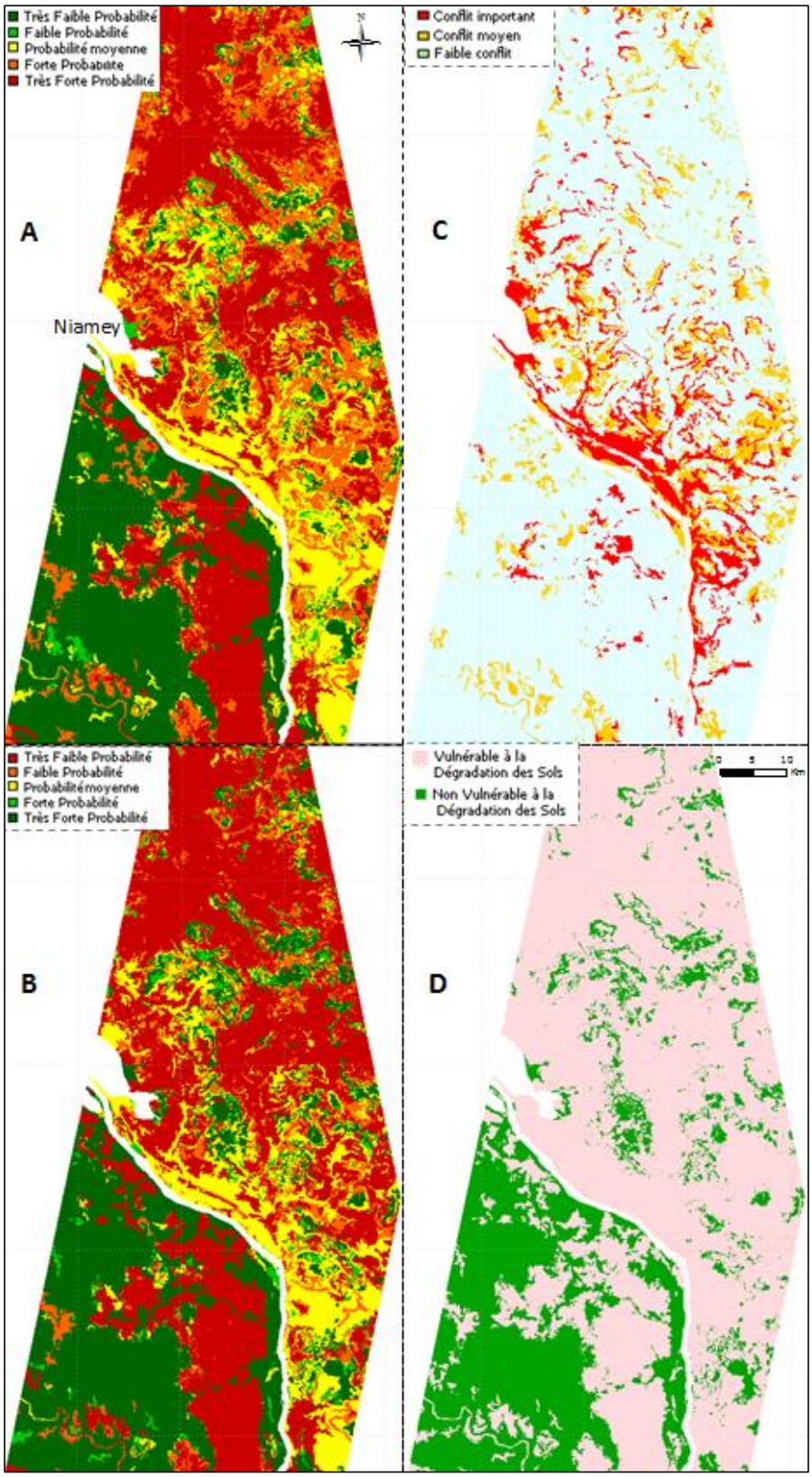


Figure 40- Résultats de la modélisation de la dégradation des sols en milieu semi-aride (Daouda, 2012)

- **Résultats**

Les cartes de probabilité pignistique pour chaque hypothèse sont seuillées en cinq classes (Figure 40 A et B). La carte « A » représente l'hypothèse « Vulnérabilité des sols à la Dégradation (VD) » et « B » l'hypothèse « Non vulnérabilité des sols à la dégradation (NVD) » sur le site d'étude. On remarque ainsi que la partie nord de l'espace d'étude est caractérisée par une très forte probabilité de « vulnérabilité des sols à la dégradation ». Sur cet espace plus propice à l'activité agricole (sols plus fertiles) que le sud, on assiste en effet à une saturation de l'espace agricole qui doit faire face aux besoins croissants d'une population de plus en plus nombreuse en périphérie de Niamey.

Comme le permet la théorie des évidences de Demspter-Shafer, la croyance en une hypothèse ne correspond pas nécessairement au complément de sa négation. Ainsi le **Tableau 17** montre que les très faibles probabilités (0-0.2) pour l'hypothèse « VD » concernent 26% de l'espace d'étude et 45% pour l'hypothèse « NVD ». Concernant l'hypothèse VD, 54% de l'espace d'étude est caractérisé par des probabilités pignistiques supérieures à 0.6, indiquant ainsi sur ces espaces des sols potentiellement fragiles voir même incompatibles avec l'activité agricole. Les fortes probabilités pignistiques pour l'hypothèse NVD comprennent essentiellement les surfaces marécageuses et irriguées proches du fleuve Niger et les espaces en Brousse Tigrée encore préservés au sud de Niamey.

Tableau 17- Probabilités pignistiques pour les hypothèses « Vulnérabilité des sols à la dégradation » et « non Vulnérabilité des sols à la dégradation » (%)

Niveaux des mesures	« Vulnérabilité des sols à la Dégradation (**VD**) » (%)	« Non vulnérabilité des sols à la dégradation (**NVD**) » (%)
[0-0,2[: Très Faible Probabilité	26	45
[0,2-0,4[: Faible Probabilité	2	9
[0,4-0,6[: Probabilité moyenne	18	14
[0,6-0,8[: Forte Probabilité	19	4
[0,8-1] : Très Forte Probabilité	35	28

La théorie de Dempster-Shafer permet également de calculer le conflit entre les différentes sources d'information combinées entre elles. Correspondant au dénominateur dans la règle d'inférence de la théorie des Croyances, elle mesure le niveau de concordance entre les sources d'information fusionnées. Elle permet ainsi d'identifier les espaces caractérisés par une forte incertitude. Ils ne représentent que 10% (**Tableau 18**) de l'espace d'étude (**Figure 40**, carte « C ») et se concentrent surtout dans les koris (cours d'eau temporaires) et le long du fleuve Niger. Ces espaces sont en effet caractérisés par des sols plus riches et moins sensibles à la dégradation que ceux présents sur les plateaux latéritiques, ils sont par cependant exploitées de manière intensive les rendant potentiellement vulnérables.

Tableau 18- Niveaux de conflit entre les sources d'information visant à modéliser la vulnérabilité des sols à la dégradation

Niveaux de conflit	**(%) de l'espace d'étude**
[0-0,2 [: Conflit important	10
[0,2-0,6[: Conflit moyen	10
[0,6-1] : Conflit faible	80

Les conflits dits minoritaires à l'échelle du site d'étude, la prise de décision entre les deux hypothèses peut être réalisée en retenant la valeur maximale entre les probabilités pignistiques (**Figure 40**, carte « D »). Ainsi, 72 % de l'espace d'étude est considéré comme vulnérable à une dégradation des sols (**Tableau 19**). Cette vulnérabilité à une dégradation des sols est localisée principalement sur l'ensemble des parcelles agricoles du nord, le domaine sableux au sud du fleuve Niger et certains plateaux latéritiques cuirassés étant soumis à une pression anthropique importante. Quant au reste de l'espace d'étude (28 %), il est considéré comme non vulnérable à la dégradation des sols et correspond dans l'ensemble aux plateaux latéritiques cuirassés du sud de l'espace d'étude abritant la brousse tigrée qui reste encore préservée.

Tableau 19- Prise de décision entre les hypothèses "Vulnérabilité des sols à la dégradation" et "Non vulnérabilité des sols à la dégradation"

Décision	**(%)**
Vulnérabilité à la Dégradation des Sols	72
Non Vulnérabilité à la Dégradation des Sols	28
Total	100

La validation du processus de modélisation est réalisée avec l'échantillonnage terrain réalisée durant l'année 2009. Le **Tableau 20** présente la matrice de confusion entre les résultats issus du processus de modélisation et les observations terrain. L'indice de Kappa est de 0.84 et permet donc de valider le processus de modélisation développé pour spatialiser les surfaces vulnérables ou pas à la dégradation des sols sur l'espace d'étude.

Tableau 20- Validation du processus de modélisation de la vulnérabilité des sols

	Modélisation	Vulnérabilité à la dégradation des sols	Non vulnérabilité à la dégradation des Sols	Somme
Terrain	Vulnérabilité à la dégradation des sols	**18**	3	21
	Non vulnérabilité à la dégradation des sols	1	**20**	21
	Somme	19	23	**42**
	Indice de Kappa	**0.84**		

- **Conclusion**

Modéliser spatialement les surfaces vulnérables à la dégradation des sols en milieu semi-aride représente un enjeu important pour une meilleure compréhension des territoires. Sur le site d'étude Hapex-Sahel, situé à la périphérie de Niamey au Niger, les pressions anthropiques sur les ressources naturelles (eau, sol, végétation…) sont en effet importantes et l'agriculture même si elle demeure extensive, constitue la principale activité accentuant le phénomène de désertification. Identifier et spatialiser la vulnérabilité des sols à la dégradation représente ainsi une information clé pour les acteurs et gestionnaires locaux. Durant la saison des pluies, les phénomènes d'érosion hydriques et éoliens associés à des pratiques culturales non adaptées (intensification agricole, temps de jachères trop courts…) sont en grande partie responsables de la dégradation des sols. Leur modélisation nécessitait ainsi un suivi des changements d'occupation et d'usage des sols par télédétection radar qui s'affranchit de la couverture

nuageuse très présente durant la saison des pluies. La cartographie des changements d'occupation des sols (ici, les occurrences de sol nu) est par la suite combinée à différents facteurs contribuant à la dégradation des sols (pédologie, niveau d'intensification agricole et présence de forage) dans la règle d'inférence de Dempster-Shafer dans le cadre d'une modélisation à dire d'expert. L'incertitude liée à la problématique et aux sources d'information utilisée a été intégrée tout au long du processus de modélisation et offre ainsi des résultats plus exploitables permettant de cibler par exemple les espaces où la dégradation des sols est fortement probable. Par ailleurs, les valeurs de probabilité pignistique moyenne (autour de 0.5) pour les deux hypothèses étudiées ainsi que la carte des conflits entre les sources d'information permettent d'identifier les espaces de forte incertitude sur le niveau de vulnérabilité des sols. Ces territoires, correspondant souvent à des cours d'eau temporaires ou à des parcelles intensivement exploitées en bordure du fleuve Niger, constituent des espaces clés pour les acteurs locaux. Ils présentent en effet des niveaux de vulnérabilité encore mal connus et doivent ainsi faire l'objet d'un suivi régulier.

1.2. Application à la qualité de l'eau en Bretagne

L'étude dont les résultats sont présentés ci-après s'inscrit dans la continuation des travaux de recherche conduits en Bretagne pour comprendre l'origine de la pollution des captages d'eau brute superficielle par les matières organiques (MO) et définir des actions concrètes pour remédier à cette pollution. Ces études sont réalisées depuis 2003 par le Groupe d'Etude sur la Pollution des Eaux par les Matières Organiques (GEPMO) mis en place à l'initiative de la DRASS de Bretagne et de la Région Bretagne ((Gruau et al., 2004); http://www.bretagne-environnement.org/membres/matiere-organique/). Le GEPMO est constitué de plusieurs laboratoires de recherche (CNRS, INRA-ENSAR, Université Rennes 1 et 2) et de différents acteurs comme la DRASS, la DIREN, la région Bretagne, les chambres d'Agriculture, les syndicats mixtes de Production d'Eau Potable, les associations et Traiteurs d'eau comme Véolia... Il conduit des recherches sur la pollution des captages d'eaux brutes de Bretagne par les MO en trois étapes successives : Réaliser un état des lieux précis de la pollution, en identifier les causes possibles et proposer des mesures concrètes de protection et restauration de la qualité de l'eau sur le paramètre MO. Les captages d'eau brute superficielle de Bretagne connaissent en effet une situation très dégradée du point de vue des MO. Ainsi, selon la DRASS, sur l'ensemble de la Bretagne, 64 prises d'eau superficielles sur 118 sont actuellement concernés par des dépassements de la limite réglementaire en MO (<10 mg/L d'oxydabilité sur eau brute sur plus de 5% du temps), et nécessitent donc la mise en place d'un plan de gestion de la ressource. Les conséquences néfastes liées à la présence de fortes teneurs en MO dans les eaux brutes sont les suivantes (Gruau, 2006):

1. diminution du volume utile des retenues pour l'alimentation en eau potable par sédimentation biogène (des diminutions pouvant aller jusqu'à 50 % ont été enregistrées);
2. modification du transfert de micropolluants: les MO peuvent complexer d'autres molécules organiques comme les pesticides et inhiber leur dégradation. Elles

peuvent également former des complexes solubles ou insolubles avec certains éléments métalliques toxiques;

3. les MO peuvent être associées à la présence d'espèces planctoniques dont certaines produisent des toxines;
4. en ce qui concerne le traitement, la présence de fortes teneurs en MO rend le traitement plus compliqué et plus coûteux. Les MO sont des compétiteurs des produits phytosanitaires sur les charbons actifs qui doivent donc être régénérés plus fréquemment lorsque la teneur en MO des eaux est élevée. Les MO sont des réducteurs et consomment donc une partie du chlore apporté pour désinfecter l'eau, d'où une surconsommation de chlore lorsque les eaux sont riches en MO. La présence de MO accroit les quantités de boues générées pendant le traitement;
5. dans les eaux distribuées, les matières organiques favorisent la formation de trihalométhanes (THM) ou d'acides haloacétiques (AHA) à la toxicité reconnue;
6. elles sont souvent à l'origine de colorations ou de mauvais goûts rebutants pour le consommateur;
7. enfin, les MO résiduelles après traitement peuvent servir de nutriment ou de support aux microorganismes présents dans les réseaux de distribution.

Des études ont montré que la dégradation de la qualité organique des eaux bretonnes était un phénomène récent. Cette dégradation date en effet de la fin des années 1970, et se trouve donc être en coïncidence avec l'intensification des pratiques agricoles en Bretagne, notamment l'élevage intensif, activité grosse productrice de MO (38 millions de tonnes par an, en moyenne) dont l'essentiel est épandu sur les sols. Les activités agricoles peuvent entraîner une pollution des captages d'eau superficielles par les MO, soit à travers les modifications de paysage que ces pratiques génèrent, soit plus directement par les modifications que les pratiques agricoles occasionnent sur le compartiment organique du sol (apport de MO labile; modification des équilibres chimiques en faveur d'une plus grande solubilité de la MO). En confirmation à cette hypothèse d'un rôle possible des activités agricoles dans cette pollution, des molécules organiques spécifiques des déjections animales ont été retrouvées dans les eaux de rivières bretonnes, attestant d'un impact direct des épandages sur la qualité organique des rivières de cette région (Gruau et al., 2004, 2007; Corgne & Gruau, 2006; Jardé et al., 2007).

Les travaux que j'ai réalisés dans le cadre du GEPMO visaient à étudier, à l'échelle des bassins versants, les interactions entre différentes variables paysagères des territoires agricoles et les teneurs de MO dans les eaux superficielles. En effet, malgré les avancées réalisées sur le front de la pollution des captages d'eau brute superficielles de Bretagne par les MO, plusieurs zones d'ombre demeurent, notamment par rapport au rôle exact des épandages et rotations culturales au sein des zones contributives sur les apports de MO aux rivières, ou à celui de la ripisylve sur ces mêmes apports. Il s'agit ici d'analyser précisément l'impact des apports de MO en provenance de la ripisylve et des rotations culturales ainsi que de déterminer le poids de ces facteurs au sein de l'ensemble du compartiment MO véhiculé par les rivières de Bretagne. S'agit-il d'une source prépondérante (la MO des rivières correspondant à la dégradation des feuilles mortes de la ripisylve), ou au contraire d'une source mineure, de peu de poids par rapport aux apports de MO issus des sols des bassins versants? Pour cela, une méthodologie permettant de localiser les zones sources de pollution au sein des bassins versants bretons et les variables paysagères étant statistiquement significatives dans l'explication de la présence de MO dans les eaux superficielles est développée.

❖ **Le dispositif régional**

Dans le cadre du GEPMO qui étudie la pollution des captages d'eau brute de Bretagne par les MO depuis 2003, une base de données rassemblant des données sur la plupart des facteurs contrôlant les transferts de MO des sols vers les eaux de surface (assolement, topographie, teneur en MO des sols, réseau bocager, pH des sols, effectifs animaux…) a été constituée sur un réseau de suivi de sous-Bassins Versants (Sous-BV) distribués à l'échelle de la Bretagne. Ce réseau, qui comprend 44 sous bassin versants, permet de situer avec précision le degré de pollution d'un captage ou d'un BV dans le contexte régional (**Figure 41**). En comparant un sous-BV ou un BV donné à un ensemble plus vaste de sous-BV et de BV, ce réseau permet également d'identifier la variabilité de tel ou tel facteur physique ou anthropique favorisant les transferts de flux polluants et ainsi de caractériser la source de pollution majeure de l'eau par les MO. Ceci permet de définir en partenariat avec les gestionnaires de l'eau (syndicats de bassins versants, DRASS, Chambres d'Agriculture…) des actions concrètes visant à l'amélioration de la qualité de l'eau.

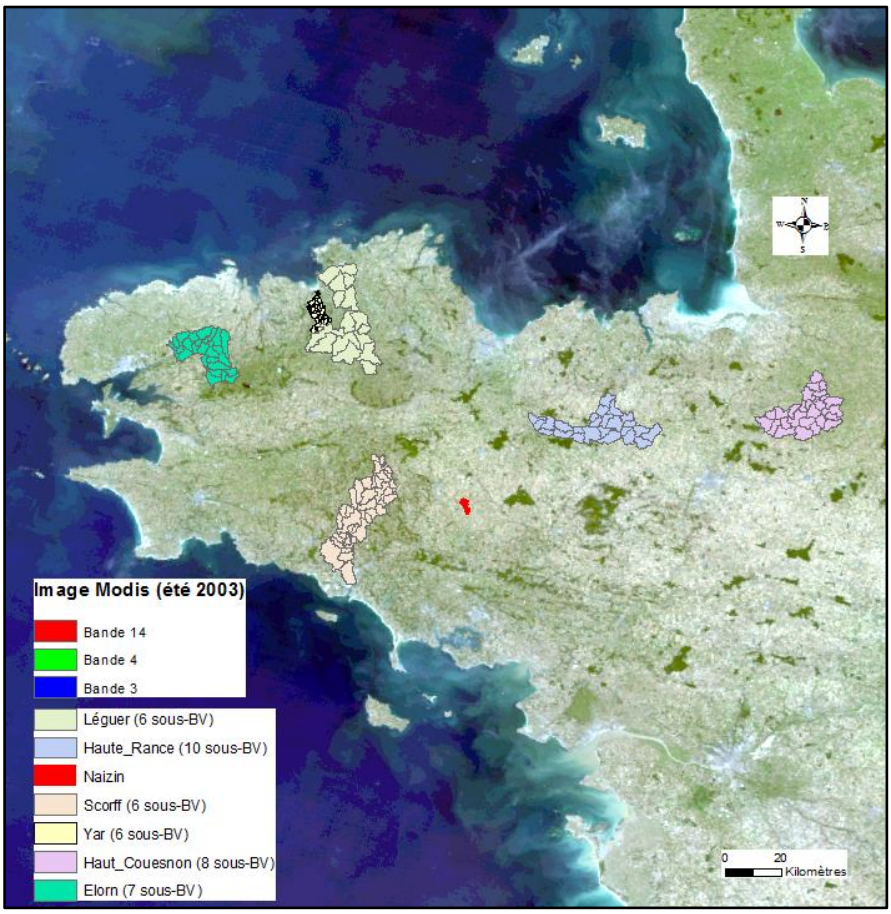


Figure 41- Présentation du réseau de sous-BV du GEPMO en Bretagne

❖ **Méthodologie**

Sur tous les sous-Bv étudiés dans le cadre du GEPMO, le volet « occupation du sol » vise à analyser à travers différentes sources d'information géographique les caractéristiques paysagères de ces sous bassins versants (Corgne & Gruau, 2006). Trois types d'information spatiale sont étudiés :

- Le linéaire bocager (réseau bocager; linéaire de ripisylve)
- L'évolution de l'occupation du sol sur au moins 3 années (surfaces en forêt, surfaces bâties, surfaces en eau, surfaces agricoles, cultures principales)
- Les zones humides de bas-fonds de vallées (ZHBF)

(1) La caractérisation du linéaire bocager en Bretagne nécessite l'utilisation de données à très haute résolution spatiale. La méthodologie de travail utilisée ici repose sur la digitalisation manuelle du bocage à partir de photographies aériennes (**Figure 42**).



Figure 42- Exemple de digitalisation du linéaire bocager à partir d'une photographie aérienne

A partir de la photo-interprétation du linéaire bocager, une nomenclature en trois classes est définie. Elle comprend les haies discontinues, les haies continues et les ripisylves. Ces dernières sont extraites à partir de la proximité du linéaire bocager avec le réseau hydrographique présent. La ripisylve est ici définie comme étant une formation végétale de type linéaire où domine l'arbre, riveraine et dépendante d'un cours d'eau.

(2) L'ensemble des traitements effectués pour déterminer l'évolution de l'occupation du sol est détaillé dans la **Figure 43**. La détermination de l'occupation du sol et son suivi sont réalisés à partir du traitement d'images satellitaires optiques à haute résolution spatiale. Le **Tableau 21** illustre par exemple le suivi de l'occupation des sols sur le bassin versant de la Haute Rance entre 2001 et 2003. Le suivi multi temporel sur les bassins versants du GEPMO à partir de données satellitaires optiques reste délicat car la présence d'une couverture nuageuse importante durant l'été limite les acquisitions d'images exploitables. Cela nécessite l'utilisation de données multi-sources caractérisées par des résolutions spatiales et spectrales différentes.

Tableau 21- Images satellitaires utilisées pour déterminer l'évolution de l'occupation du sol sur un bassin versant du GEPMO (ex. de la Haute-Rance)

Capteur	Résolution spatiale	Date de prise de vue	Bandes spectrales	Traitement
LANDSAT TM	30 mètres	12 MAI 2001	7 bandes	COSTEL
IRS-LISS	23 mètres	8 AOUT 2002	4 bandes	COSTEL
ASTER	15 mètres	14 JUILLET 2003	4 bandes	COSTEL

La méthodologie de traitement reste cependant la même pour tous les sous bassin versant étudiés. Elle consiste dans un premier temps à déterminer l'occupation du sol hors SAU (Surface Agricole Utile) à partir des photographies aériennes à l'échelle parcellaire [A].

La digitalisation du parcellaire est effectuée à partir de la photo-interprétation des photographies aériennes. Quatre types d'occupation du sol sont ainsi définis :

1. Surfaces boisées
2. Surfaces bâties
3. Surfaces en eau
4. SAU (Surface Agricole Utile)

Le traitement des images satellitaires commence par les prétraitements [B] nécessaires à toute analyse multitemporelle en télédétection. Les corrections radiométriques sont effectuées à partir du modèle de correction atmosphérique 5S (Kergormard et al., 2000) et les corrections géométriques permettent de géoréférencer l'ensemble des images dans le système cartographique Lambert 2. Les classifications d'images satellitaires sont supervisées, l'algorithme de classification repose sur la technique du maximum de vraisemblance [C]. Un indice de Kappa est systématiquement calculé afin de valider ces classifications. Ce dernier doit être supérieur à 0.8 pour que la classification soit validée. Trois types de culture majoritaires en Bretagne sont classifiés :

- Céréales
- Maïs
- Prairies

L'importation des classifications issues des images satellitaires dans la base SIG (Système d'Information Géographique) se fait par l'affectation de la classe majoritaire à la parcelle [D]. On dispose ainsi au final d'une base de données spatialisées avec à l'échelle parcellaire, les changements d'occupation des sols, le code du sous-BV, la surface et un identifiant parcelle. Les codes d'occupation du sol sont les suivants :

1- Surfaces boisées
2- Surfaces bâties
3- Surfaces en eau
4- Prairies
5- Céréales
6- Maïs

(3)La détermination des zones humides de bas-fonds (ZHBF) est réalisée à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (50 m.) et du logiciel MNTSURF. La méthode d'extraction des ZHBF consiste à modéliser le drainage de l'espace étudié à partir des altitudes des mailles

(écoulement de type multidirectionnel), le modèle hydrologique retenu étant l'indice de Beven aval (Mérot et al., 2003).

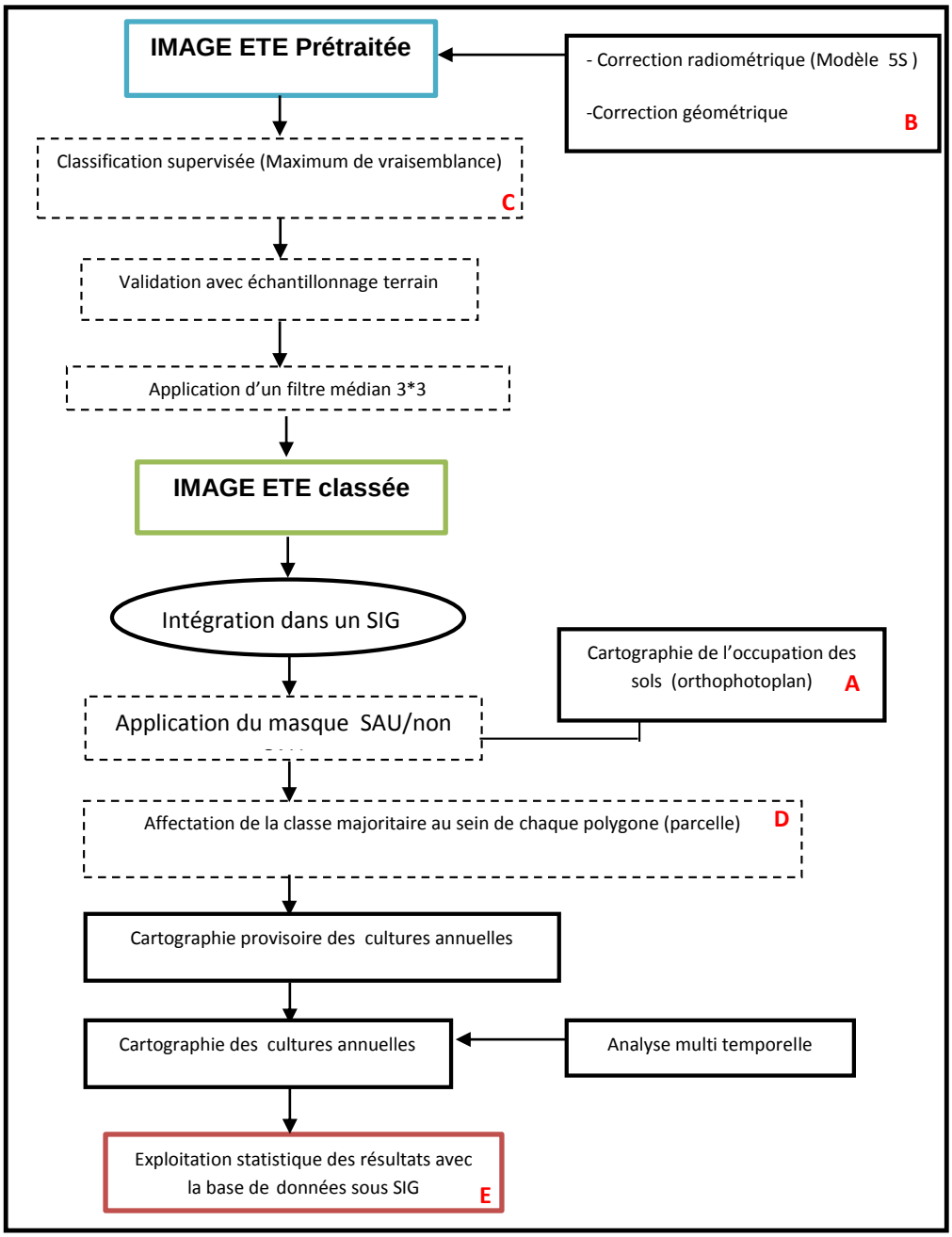


Figure 43- Méthodologie du suivi de l'évolution de l'occupation du sol sur les bassins versants du GEPMO à partir de données de télédétection (Corgne et Gruau, 2006)

L'ensemble de ces informations sont ensuite analysées dans un SIG et sont confrontées aux données de carbone organique dissous (COD) mesurés à l'exutoire de chaque ss-BV. Comme l'ont montré les travaux du GEPMO, les teneurs en MO variant fortement dans le temps, il faut une haute fréquence temporelle de mesure (typiquement 1 mesure tous les 3 jours) pour pouvoir calculer des concentrations moyennes annuelles représentatives et, à partir de là, analyser les trajectoires d'évolution de la pollution dans le temps. Clairement, les fréquences de mesures effectuées sur certains bassins versants dans le cadre des suivis « Bretagne Eau Pure »

depuis 2000 sont beaucoup trop lâches pour qu'une telle analyse puisse être effectuée. Ces données peuvent seulement être utilisées pour hiérarchiser les points de mesure entre eux (notamment les exutoires des sous-BV) du point de vue de leur pollution par les MO, en comparant les résultats obtenus en chaque point à une même date. Cette hiérarchisation n'est cependant pas évidente. En effet, et comme l'on montré les nombreux travaux sur les transferts de MO dans les BV, les transferts sont maximum lors des crues (Gruau et al., 2004; 2005). Hiérarchiser des cours d'eau entre eux du point de leur pollution par les MO se fait donc principalement à partir d'analyses effectuées lors des crues d'hiver (les plus grosses exportatrices de MO, tant en flux qu'en concentration). Or, pour certains sous-BV, peu de prélèvements ont été effectués durant les périodes de crue (Ex. : seuls 2 prélèvements sur 47 ont été effectués lors de crue sur le bassin de la Haute-Rance entre 2002 et 2005). Autant dire que la série de données disponible sur l'ensemble des sous-BV est loin d'être idéale pour poser un diagnostic MO. Cependant, comme l'on montré (Gruau et al., 2004), deux prélèvements en crue peuvent suffire pour hiérarchiser de manière fiable des sous-BV entre eux du point de vue de leur capacité à exporter des MO. Les données spatiales extraites sont ainsi étudiées à partir de méthodes statistiques (ACP, méthodes multicritères) pour trois paramètres: les teneurs en COD moyenne sur 10 à 20 ans selon les bassins étudiés, les teneurs en COD « en crue » et « hors crue » (**Figure 44**).

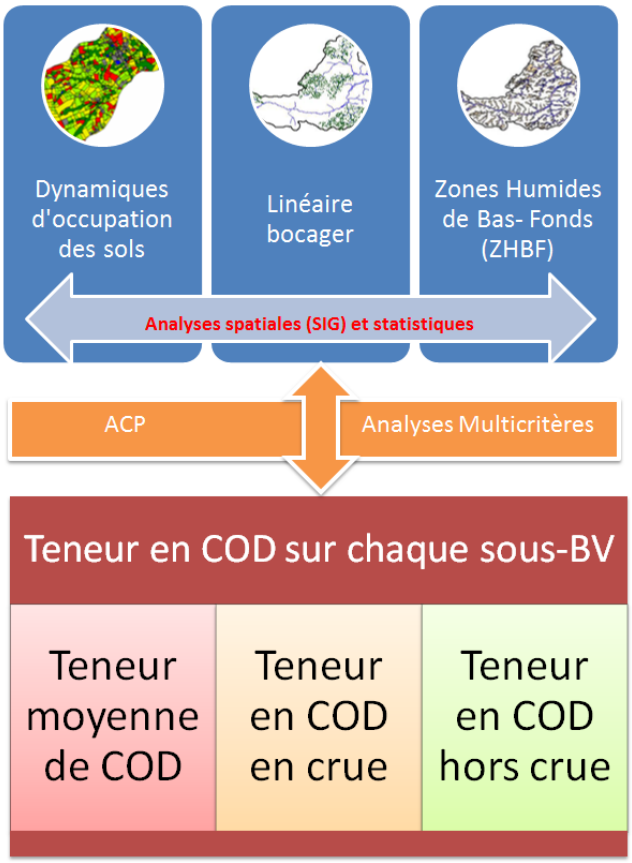


Figure 44- Méthodologie d'analyse des interactions entre la pollution de l'eau par les MO et les territoires agricoles

❖ **Analyse des résultats**

- Analyse des variables spatialisées avec les teneurs en COD mesurées aux exutoires des sous-BV

29 variables spatiales issus de l'analyse conjointe des images satellitaires, de l'extraction des ZHBF et de la caractérisation du linéaire bocager potentiellement explicatives sont extraits à différents niveaux scalaires sur 44 sous bassins versants du réseau GEPMO (**Tableau 22**).

Tableau 22- Présentation des variables extraites sur l'ensemble des sous-BV du GEPMO

Codes des variables	Signification des variables
SURF.SSBV	Surface du sous bassin versant
HORS.SAU.SSBV :	Surface Hors SAU à l'échelle du sous bassin versant
HORS.SAU.SSBV.P	Pourcentage de surface Hors SAU à l'échelle du sous bassin versant
SAU.SSBV :	Surface agricole utile à l'échelle du sous bassin versant
SAU.SSBV.P :	Pourcentage de surface agricole utile à l'échelle du sous bassin versant
SURF.ZHBF :	Surface des Zones Humides de Bas-Fonds à l'échelle du sous bassin versant
ZHBF.SSBV.P :	Pourcentage de la surface des Zones Humides de Bas-Fonds à l'échelle du sous bassin versant
HORS.SAU.ZHBF :	Surface Hors SAU à l'échelle des Zones Humides de Bas-Fonds
HORS.SAU.ZHBF.P :	Pourcentage de la surface Hors surface agricole utile à l'échelle des Zones Humides de Bas-Fonds
SAU.ZHBF :	Surface agricole utile à l'échelle des Zones Humides de Bas-Fonds
SAU.ZHBF.P :	Pourcentage de Surface agricole utile à l'échelle des Zones Humides de Bas-Fonds
LIN.BOCAGER.SSBV :	Longueur du bocage à l'échelle du sous bassin versant
DEN.BOCAGE.SSBV :	Densité du bocage à l'échelle du sous bassin versant
DEN.BOCAGE.ZHBF :	Densité du bocage à l'échelle des Zones Humides de Bas-Fonds
LIN.BOCAGER.ZHBF :	Longueur du bocage à l'échelle des Zones Humides de Bas-Fonds
SSBV.FORET :	Pourcentage des surfaces boisées à l'échelle du sous bassin versant
SSBV.EAU :	Pourcentage des surfaces en eau à l'échelle du sous bassin versant
SSBV.BATI :	Pourcentage des surfaces bâties à l'échelle du sous bassin versant
SSBV.CEREA :	Pourcentage des surfaces en céréales à l'échelle du sous bassin versant
SSBV.MAIS :	Pourcentage des surfaces en maïs à l'échelle du sous bassin versant
SSBV.PRAIR :	Pourcentage des surfaces en prairies à l'échelle du sous bassin versant
ZHBF.FORET :	Pourcentage des surfaces boisées à l'échelle des Zones Humides de Bas-Fonds
ZHBF.EAU	Pourcentage des surfaces en eau à l'échelle des Zones Humides de Bas-Fonds
ZHBF.BATI :	Pourcentage des surfaces bâties à l'échelle des Zones Humides de Bas-Fonds
ZHBF.CERE :	Pourcentage des surfaces en céréales à l'échelle des Zones Humides de Bas-Fonds
ZHBF.MAIS :	Pourcentage des surfaces en maïs à l'échelle des Zones Humides de Bas-Fonds
ZHBF.PRAIR :	Pourcentage des surfaces en prairie à l'échelle des Zones Humides de Bas-Fonds
Long.Hydro :	Longueur du réseau hydrographique à l'échelle du bassin versant
Densite.Hydro :	Densité du réseau hydrographique à l'échelle du bassin versant

Ces variables sont analysées en interaction avec les concentrations en COD mesurées par Analyseur de Carbone à Combustion (unité : mg/L). A la limite réglementaire des 10 mg/L d'oxydabilité correspond donc une concentration de 7.5 mg/L de COD (Gruau et al., 2004). Ces

concentrations sont étudiées selon trois critères : (a) les teneurs moyennes en COD, (b) les teneurs moyennes en COD en crue et hors crue (c) sur chaque sous-BV (**Figure 45**).

Concernant les mesures moyennes (a), les sous-BV ayant une teneur moyenne en COD supérieure à 7.5 sont représentés en orange (Samson et al., 2007). On remarque alors que 7 sous BV dépassent la limite réglementaire fixée à 7.5 (un des sous bassins versant du Yar ayant la plus forte teneur en COD). En revanche, durant les épisodes de crue, 25 sous-BV dépassent la limite règlementaire (en vert sur la **Figure 45(b)**). Ceci est notamment lié au fait que les MO sont situées dans les horizons superficiels des sols et que lors des évènements de pluie, par remontée des nappes et par ruissellement, les concentrations en MO augmentent. C'est pourquoi, les teneurs en COD hors crue (**Figure 45(c)**) sont beaucoup plus faibles durant les périodes hors-crue où seuls 3 sous bassins versant dépassent la norme de 7.5 mg/L.

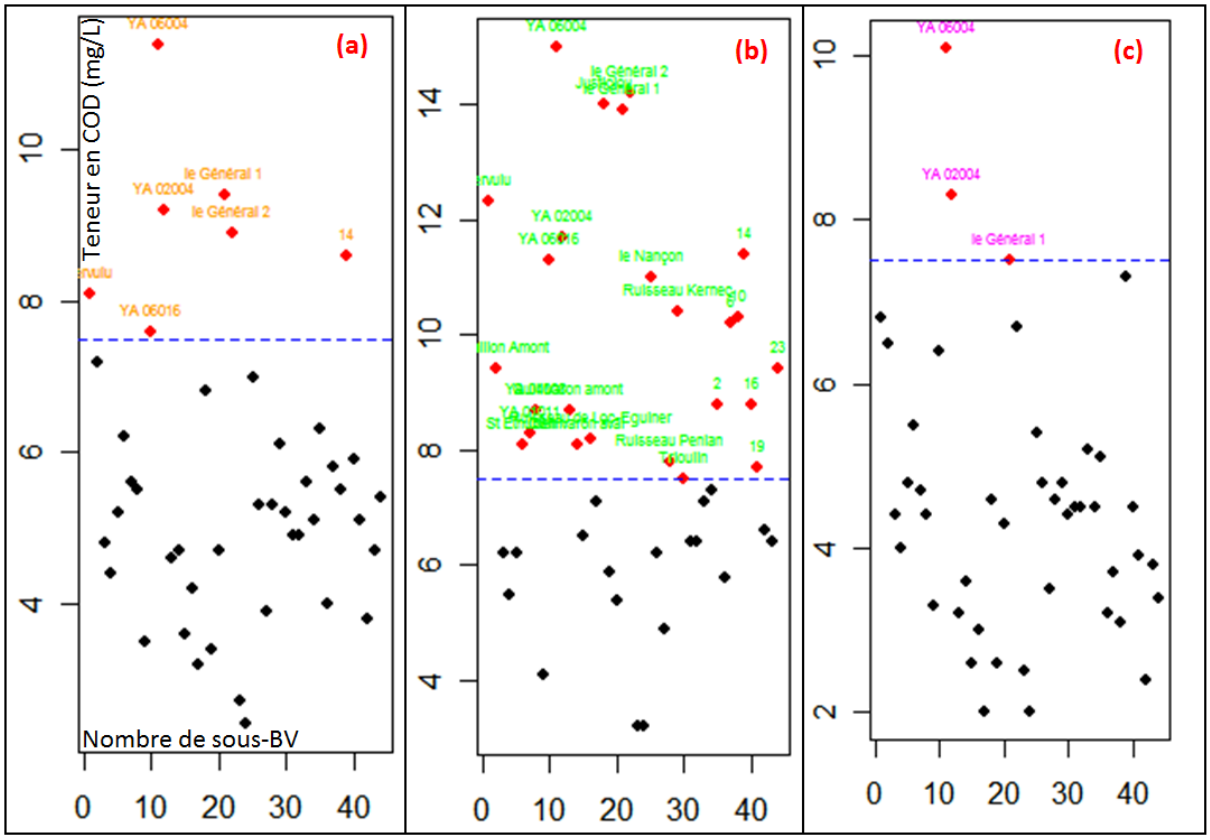


Figure 45- Présentation des sous-BV dépassant la limite réglementaire de COD de 7.5 mg/L (a: Moyenne sur la période étudiée; b : teneurs en crue; c: teneurs hors crue)

- Analyse des variables spatialisées pour les différents sous-BV étudiés dans le cadre du GEPMO

Une Analyse en Composantes Principales (ACP) est effectuée sur l'ensemble des sous-BV étudiés afin d'identifier les sous BV aux caractéristiques spatiales similaires ou au contraire différentes en considérant simultanément les différentes variables préalablement définies (**cf. Tableau 22**). Dans les plans factoriels 1 et 2 qui représentent près de 49% de la variance, l'axe 1 oppose les variables SAU ZHBF (%), SAU SSBV (%), SAU ZHBF et SAU SSBV à HORS SAU ZHBF (%), ZHBF FORET, HORS SAU SSBV (%) et SSBV FORET (**Figure 46**). Il oppose

ici les sous-BV caractérisés par une SAU importante et les sous-BV qui au contraire ont un pourcentage de surface HORS SAU élevé (surfaces boisées spécifiquement). On observe une très forte corrélation positive entre :

- Le pourcentage de surface HORS SAU à l'échelle du sous BV et le pourcentage de forêt à l'échelle du sous BV, ce qui signifie que les surfaces hors SAU sont principalement occupées par les surfaces en forêt.
- Le pourcentage de céréales à l'échelle des sous-BV et le pourcentage de SAU à l'échelle de la ZHBF. Ainsi, les sous-BV ayant un pourcentage important de céréales à l'échelle du sous-BV ont également un pourcentage de SAU élevé à l'échelle des ZHBF.
- Les variables de la SAU à l'échelle du SSBV, la longueur du bocage à l'échelle de la ZHBF et la surface de la ZHBF.

Cette première analyse permet, à partir de l'étude des corrélations entre les différentes variables, de mieux comprendre les relations entre les différentes composantes paysagères des territoires agricoles étudiés. Elle permet par ailleurs, d'identifier et de caractériser les sous-BV ayant différents niveaux d'intensification agricoles à partir notamment de la SAU, des ZHBF et du linéaire bocager présent dans les ZHBF qui apparaissent fortement corrélés.

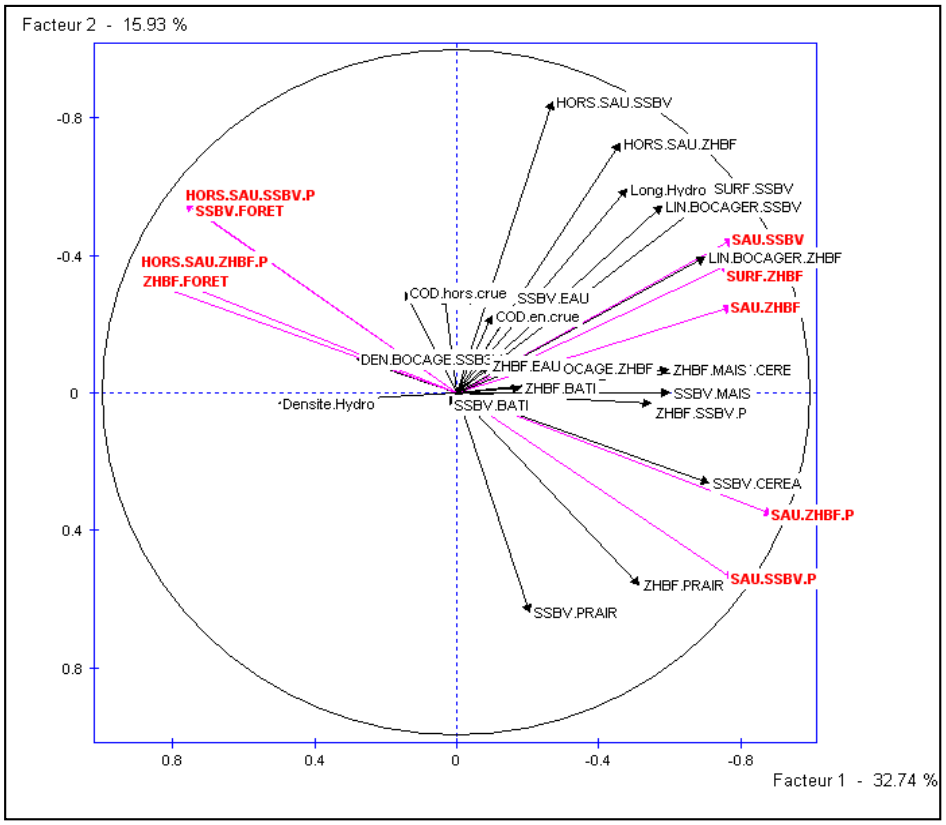


Figure 46- ACP (axes 1 et 2) présentant les caractéristiques des territoires agricoles étudiés sur l'ensemble des sous-BV du GEPMO (Samson, 2007)

Une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) réalisée sur 33 ss-BV où des informations sur les systèmes agricoles existent (issues du RGA) a permis de discriminer 4 groupes de sous-BV (Angée et al., 2006) :

1. Les sous-bassins versants d'agriculture intensive spécialisés dans l'élevage bovin et faiblement boisés ;
2. Les sous bassins versants caractérisés par une agriculture majoritairement hors-sol de type « volaille » ;
3. Les sous bassins versants caractérisés par une agriculture majoritairement hors-sol de type « porc » avec de faibles teneurs moyennes en COD hors crue ;
4. Les sous bassins versants caractérisés par une SAU moins présente, très boisés et un réseau hydrographique dense.

En conclusion, le réseau de sous-BV du GEPMO présente une forte variabilité de paysages et de niveaux d'intensification agricole satisfaisant ainsi les prérequis nécessaires pour une analyse statistique des facteurs favorisant la dégradation de la qualité de l'eau par les MO.

- Détermination des facteurs influant sur la teneur en COD à partir de la régression linéaire multiple

La régression linéaire multiple est ici privilégiée, elle permet de modéliser une relation linéaire entre une variable à expliquer et plusieurs variables explicatives tout en tenant compte des relations existant entre les variables potentiellement explicatives. Les 29 variables explicatives sont utilisées pour expliquer les teneurs moyennes en COD, les teneurs en COD en crue et hors crue à l'exutoire. Le **Tableau 23** résume les principaux résultats obtenus (Samson et al., 2007):

Tableau 23- Hiérarchisation des variables explicatives pour chaque teneur en COD et Coefficient de détermination associé

Variables à expliquer	Moyenne COD	COD en crue	COD hors crue
Hiérarchisation des variables les plus explicatives	1. Densité bocagère (ss-BV) 2. Densité bocagère (ZHBF) 3. SAU (ZHBF) 4. Surfaces bâties (ss-BV) 5. Surfaces bâties (ZHBF)	1. Densité bocagère (ss-BV) 2. SAU (ZHBF) 3. Surfaces bâties (ss-BV)	1. Densité bocagère (ss-BV) 2. Densité bocagère (ZHBF) 3. Surfaces en forêt (ZHBF) 4. Surfaces en forêt (ss-BV)
R^2	**0.526**	**0.302**	**0.612**

L'ensemble des modèles sont validés statistiquement. La variable « COD hors crue » est caractérisée par le coefficient de détermination le plus important (R^2 : 0.612), suivie de la variable « moyenne COD » avec un R^2 de 0.526 et de la variable « COD en crue » avec un R^2 de 0.302. Concernant la variable « COD hors crue », environ 61% de la variabilité est expliquée par le modèle, ce qui constitue une valeur élevée pour une problématique aussi complexe. Par ailleurs, quelle que soit la variable à expliquer étudiée, les densités bocagères apparaissent comme étant les plus significatives statistiquement.

❖ **Conclusion**

Les études réalisées depuis 2003 par le Groupe d'Etude sur la Pollution des Eaux par les Matières Organiques (GEPMO) mis en place à l'initiative de la DRASS de Bretagne et de la Région Bretagne ont livré plusieurs résultats. D'une part, elles ont montré l'existence d'une forte

variabilité spatiale de la pollution des captages d'eau brute superficielle de Bretagne par les MO. Une partie de cette variabilité spatiale provient de facteurs naturels, au premier rang desquels on trouve la topographie et la pédologie des bassins versants (BV). La part des facteurs naturels dans la variance totale est cependant faible, de l'ordre de 25%. D'où l'idée que d'autres facteurs, imputables aux activités humaines, sont impliqués dans la pollution.

D'autre part, les études réalisées sur les captages d'eau brute en rivière ont montré que pour ces captages (1) l'essentiel de la MO polluante était constitué de MO dissoute provenant du lessivage des sols des BV et (2) que les zones humides de fonds de vallée contribuaient majoritairement au flux de MO à l'origine des pollutions. De ces deux derniers résultats est née une méthodologie permettant de localiser les zones sources de pollution au sein des BV et de tenter d'en identifier les causes (et donc de proposer des solutions curatives). Cette méthodologie consiste à découper les BV d'alimentation en sous-BV d'une surface inférieure à 5 000 ha; à déterminer au sein de ces sous-BV les zones contributrices de MO à l'aide d'un modèle numérique de terrain (MNT); enfin, à quantifier l'occupation du sol et les pratiques agricoles au sein de ces zones par télédétection. Ainsi, une étude conduite en 2005 sur un réseau de 16 sous BV bretons a montré une corrélation inverse entre la teneur en MO à l'exutoire et la densité du réseau bocager au sein des zones contributives. La restauration d'un réseau bocager suffisamment dense au sein des zones contributives de fond de vallée pourrait donc être une mesure curative efficace pour diminuer la pollution des eaux de rivières par les matières organiques.

1.3. Application à la variabilité climatique et aux changements d'occupation des sols dans le grand ouest français

Les changements d'occupation et d'utilisation des sols ont des conséquences avérées sur l'environnement et sur le climat (Lobell et al., 2006). Dans les régions caractérisées par une agriculture prédominante, les changements d'occupation des sols sont très fortement liés aux changements de pratiques agricoles, telles que l'implantation de prairies à la place de cultures ou la mise en place d'un couvert végétal en hiver (Thenail & Baudry, 2001; Baudry et al., 2003). Ces changements de pratiques agricoles sont motivés par des facteurs locaux comme le choix des successions culturales et des assolements par les agriculteurs, mais aussi par les politiques locales, nationales et européennes mises en place (Houet et al., 2008; Vannier, 2011). Plusieurs études récentes ont montré les relations complexes existant entre le changement climatique et les changements d'occupation des sols (Fischer et al., 2005). Elles mettent en évidence que ces changements apparaissent tour à tour comme un des facteurs explicatifs du changement climatique et comme une conséquence de ce dernier (Lobell & Field, 2007).

La télédétection est aujourd'hui un outil d'observation couramment privilégié pour étudier les changements d'occupation des sols. La plupart des inventaires des espaces agricoles ou forestiers, tels que l'enquête TerUti-LUCAS ou la base de données CORINE Land Cover (Co-ORdination of Information on the Environment) sont réalisés avec des images satellitaires optiques à haute résolution spatiale, qui sont formées de pixels ayant une taille comprise entre 10 et 30 mètres. Si la précision de ces images est suffisante pour réaliser des inventaires de l'occupation des sols à une échelle parcellaire, elles présentent deux contraintes majeures pour caractériser finement l'évolution du couvert végétal afin d'étudier sa relation avec le climat :

seules quelques images sont exploitables par an en raison d'une résolution temporelle trop faible des capteurs qui les enregistrent et de la présence de nuages, et chacune d'entre elles ne couvre qu'une partie du territoire régional, ce qui entraîne des décalages d'acquisition préjudiciables pour la réalisation d'inventaires homogènes. Or, il existe des séries temporelles d'images à moyenne résolution spatiale, actuellement sous-exploitées, qui permettent d'étudier les changements d'occupation des sols et de caractériser finement l'évolution du couvert végétal à l'échelle de grandes parcelles ou d'îlots parcellaires sur le territoire national, avec une répétitivité quasi-quotidienne (Baret et al., 2007; Lecerf, 2008). Dans la mesure où ces séries d'images à moyenne résolution spatiale sont disponibles depuis l'année 2000, il est envisageable de chercher à étudier la relation entre les changements d'occupation du sol et la variabilité climatique sur la dernière décennie à l'échelle régionale ou suprarégionale, et ceci à une échelle infra ou interannuelle.

Dans le cadre du PSDR-GO CLIMASTER (Corgne et al., 2012b), j'ai exploité la complémentarité des images à moyenne et à haute résolution spatiales pour identifier, caractériser et suivre les changements d'occupation des sols depuis 2000 à deux échelles (**Figure 47**): j'ai d'abord étudié la dynamique de la végétation à partir de plusieurs indicateurs à l'échelle du Grand Ouest, qui englobe les régions Bretagne, Pays de Loire, Basse-Normandie et Poitou-Charentes ; j'ai ensuite analysé les dynamiques identifiées à l'échelle de sites d'étude représentatifs de la diversité agricole et climatique du Grand-Ouest.

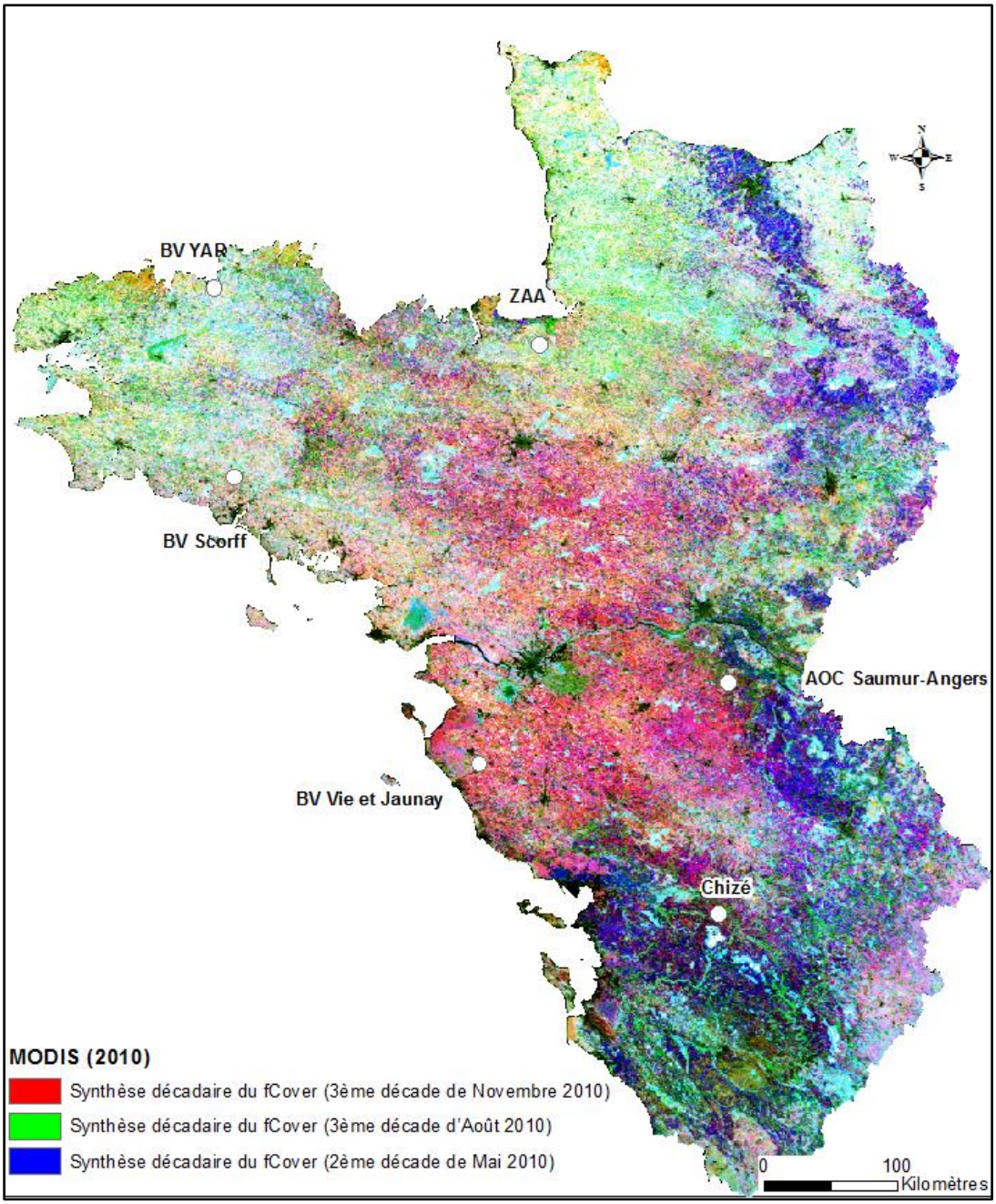

BV YAR
ZAA
BV Scorff
AOC Saumur-Angers
BV Vie et Jaunay
Chizé
MODIS (2010)
Synthèse décadaire du fCover (3ème décade de Novembre 2010)
Synthèse décadaire du fCover (3ème décade d'Août 2010)
Synthèse décadaire du fCover (2ème décade de Mai 2010)
0
100
Kilomètres

Figure 47- Localisation de la zone d'étude (le Grand Ouest) et des sites d'étude (Corgne et al., 2012)

❖ **Suivi des changements d'occupation des sols par télédétection à l'échelle du Grand Ouest**

La télédétection permet d'estimer des variables biophysiques révélatrices de l'état et du fonctionnement de la couverture végétale. L'identification des changements inter et intra-annuels de la végétation intervenus dans le Grand Ouest sur la période 2000-2010 à travers l'analyse de variables biophysiques dérivées des séries temporelles d'images MODIS a nécessité au préalable l'élaboration d'une chaîne d'acquisition et de traitement automatique d'images.

- Les séries temporelles d'images MODIS

Le capteur MODIS placé sur le satellite EOS-AM (Terra) fournit des images de moyenne résolution spatiale de la quasi-totalité de la surface terrestre tous les 1 à 2 jours. La taille des pixels composant les images étant comprise entre 250m*250m et 1 Km*1Km, il est possible de réaliser des cartographies à une échelle quasi-parcellaire, ou au moins à celle de l'îlot parcellaire dans des paysages agricoles. La fréquence d'acquisition élevée des images permet d'envisager un suivi régulier de la végétation, en particulier d'observer sa dynamique saisonnière. Les images MODIS acquises par le satellite Terra, lancé en 1999 et opérationnel depuis mars 2000, permettent ainsi d'effectuer un suivi des surfaces terrestres sur les dix dernières années.

Toutefois, les images brutes du capteur MODIS ne sont pas directement exploitables pour caractériser et suivre la dynamique de la couverture végétale, car elles sont affectées par des déformations géométriques et atmosphériques. Par ailleurs, pour identifier des dynamiques inter et intra-annuelles de la végétation il est nécessaire de disposer de séries temporelles d'indicateurs de ces dynamiques. Afin de constituer ces séries temporelles à partir des images

MODIS, une chaîne de traitement d'images complète a été développée au LETG Rennes COSTEL. Elle comprend plusieurs étapes. Les trois premières visent à effectuer les prétraitements des images. La première consiste à télécharger les produits MODIS L1B, qui sont des images de luminance journalières non géoréférencées (ftp://ladsweb.nascom.nasa.gov/), et à sélectionner automatiquement les images couvrant tout ou partie de la zone d'étude qui ne sont pas affectées par une couverture nuageuse (Abdel Latif et al., 2008). La deuxième étape correspond à l'application d'un modèle de corrections atmosphériques adapté aux données MODIS sur chacune des images, ce qui permet de normaliser les valeurs numériques des images en passant des valeurs de luminance à des valeurs de réflectance au sol (Vermote & El Saleous, 2002). Au cours de la troisième étape, les images sont corrigées géométriquement et géoréférencées dans le même système de projection, en l'occurrence ici le Lambert 2 étendu, afin d'être superposables.

Les étapes suivantes ont pour objectif de constituer des séries temporelles d'indicateurs de la dynamique de la végétation, qui sont ici des variables biophysiques. Ces dernières comprennent par exemple l'indice de surface foliaire ou LAI (Leaf Area Index), qui est la quantité de feuilles vertes par unité de surface, le fAPAR (fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) qui correspond à la fraction du rayonnement photo synthétiquement actif absorbée par la végétation ou encore le fCOVER qui est la fraction de couverture végétale des sols, c'est-à-dire la surface couverte par de la végétation par unité de surface. Ces variables peuvent être dérivées des images de télédétection soit de façon empirique en calculant des indices de végétation, soit en appliquant des modèles de transfert radiatif des couverts végétaux qui visent à modéliser les interactions entre le rayonnement électromagnétique et la matière au niveau de la structure du couvert végétal (Lecerf et al., 2008). Comme les méthodes empiriques ne permettent pas d'établir un lien constant dans le temps et dans l'espace entre un indice de végétation et des variables biophysiques, nous avons choisi d'appliquer un couplage de modèles de transfert radiatif pour transformer les images de réflectance au sol en variables biophysiques. Ainsi, l'estimation d'une variable telle que le taux de couverture du sol par la végétation à partir d'un modèle de transfert radiatif est généralisable. Le couplage du modèle de transfert radiatif des feuilles PROSPECT avec le modèle de transfert radiatif des couverts SAIL qui est utilisé ici présente l'avantage de modéliser la végétation en prenant en considération l'ensemble des éléments de la surface terrestre (Verhoef, 1984; Jacquemoud & Baret, 1990; Baret et al., 2007). En outre, il permet d'effectuer une inversion sur des images satellitaires pour estimer l'ensemble ou une partie des variables biophysiques servant à estimer les valeurs de réflectance en mode direct. Ainsi, ces modèles sont utilisés pour simuler la réflectance à partir de différents paramètres biogéochimiques des feuilles et de la structure des couverts. Leur inversion permet d'obtenir des variables biophysiques à partir des valeurs de réflectance. Cette inversion a été effectuée ici à l'aide d'un réseau de neurones (Lecerf, 2008). L'étape suivante vise à constituer des séries temporelles de variables biophysiques continues et cohérentes. Pour cela, un masque a été appliqué sur les valeurs aberrantes liées notamment à la présence des ombres portées de nuages, avant d'estimer les valeurs manquantes par interpolation, et de lisser les séries temporelles à l'aide de fonctions robustes (Lecerf et al., 2008).

Enfin, la dernière étape consiste à calculer des métriques temporelles à partir des séries temporelles de variables biophysiques précédemment obtenues, afin de mettre en évidence la phénologie des couverts végétaux. Par exemple, des métriques temporelles peuvent être

calculées à partir des séries temporelles de fCOVER pour déterminer les dates auxquelles la végétation commence et termine sa croissance ou la date à laquelle l'activité photosynthétique atteint son maximum (**Figure 48**).

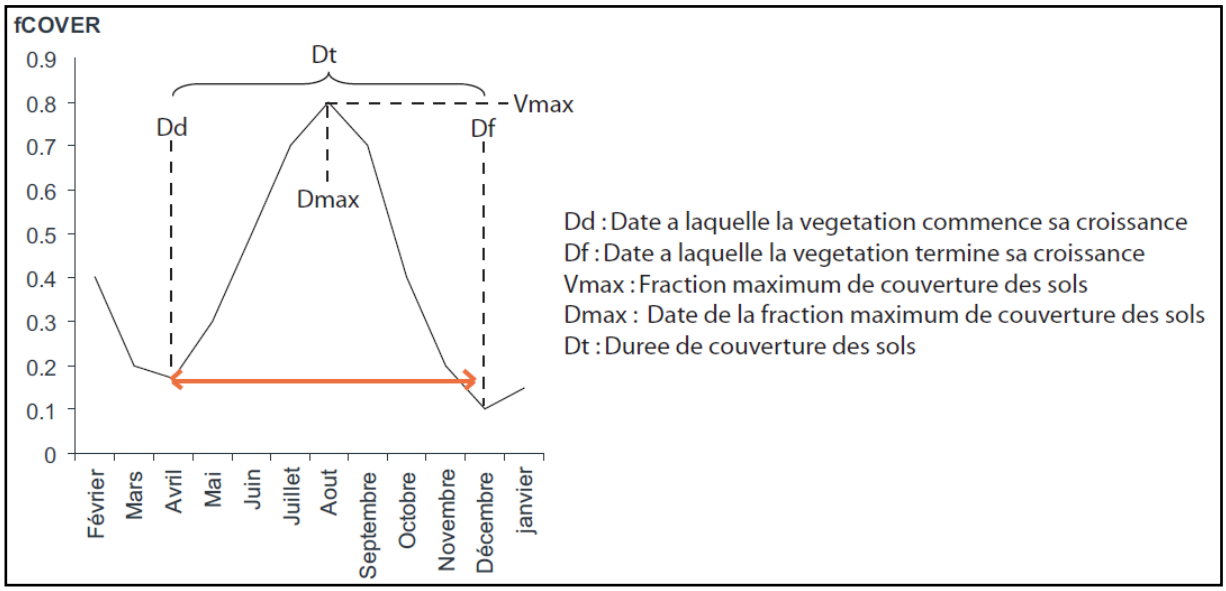


Figure 48- Représentation graphique des métriques temporelles annuelles calculées à partir des valeurs de Fcover dérivées des images MODIS (Corgne et al., 2012)

L'ensemble de cette chaîne de prétraitements et traitements a été automatisée afin d'assurer la reproductibilité de l'approche méthodologique développée ici. La mise à jour, sur la zone d'étude, de la série temporelle de variables biophysiques s'effectue grâce au téléchargement quotidien des produits MODIS.

Les dynamiques de la végétation appréhendées à travers l'analyse de l'évolution de la fraction de couvert végétal dérivées des images MODIS

L'étude de la dynamique de la couverture végétale sur le Grand Ouest sur la période 2000-2011 est effectuée ici à travers l'analyse d'une des variables biophysiques calculées à partir des séries temporelles MODIS et des métriques temporelles qui en ont été dérivées. Le choix a porté sur le fCOVER, car cette variable biophysique permet d'appréhender de façon synthétique les différentes phases de croissance de la végétation à travers l'évolution du recouvrement du sol par celle-ci. Parmi les métriques temporelles calculées (**Figure 48**), nous nous sommes attachés à analyser plus particulièrement la date de fin de croissance de la végétation. L'analyse de l'évolution du fCOVER à l'échelle du Grand Ouest met en évidence de fortes variations au niveau de la présence du couvert végétal en hiver. Ainsi, le taux de couverture végétale est particulièrement élevé durant l'hiver 2006/2007 qui a été doux et pluvieux (**Figure 49**). En revanche, ce taux est très faible au cours des deux hivers suivants, à l'instar de la situation observée au cours de l'hiver 2003-2004. Ceci peut s'expliquer par le climat, par les pratiques agricoles, et par une conjonction des deux. Les agriculteurs peuvent ne pas avoir implanté d'intercultures ou dans le cas contraire, ils peuvent l'avoir implanté tardivement (ce peut être pour des raisons climatiques), ou encore les conditions climatiques de l'automne et du début de l'hiver ne sont pas favorables à la croissance de la végétation.

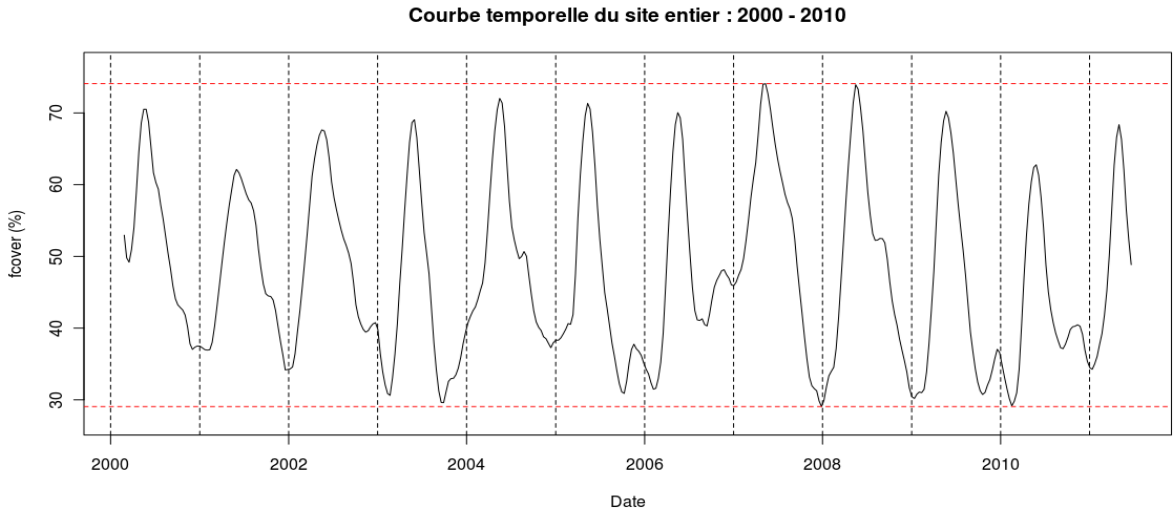


Figure 49- Evolution de la fraction de couverture végétale (fCOVER) sur l'ensemble du Grand-Ouest de mars 2000 à mars 2011 (Corgne et al., 2012)

L'analyse de la dynamique spatio-temporelle de l'évolution de la date de fin de croissance de la végétation vue par MODIS sur le Grand-Ouest de 2001 à 2010 montre un gradient relativement marqué entre la frange océanique nord-ouest, caractérisée par une date de fin de croissance prolongée (entre 300 et 350 jours), et les régions du sud-est pour lesquelles cette dernière varie de 250 à 300 jours (**Figure 50**). L'ouest de la Bretagne et la Basse-Normandie se distinguent ainsi nettement de l'est de la Bretagne (Bassin de Rennes), des Pays de la Loire et du Poitou-Charentes. Si ces deux ensembles se différencient d'un point de vue climatique, ils se distinguent également par des systèmes agricoles et des modes d'usage des sols spécifiques, ce qui explique en partie cette dichotomie : l'utilisation des sols de la frange nord-ouest (Bretagne occidentale et Basse Normandie) est effet dominée par les prairies, et le sud-est (Bassin de Rennes, Poitou-Charentes, Pays de la Loire) par les cultures céréalières.

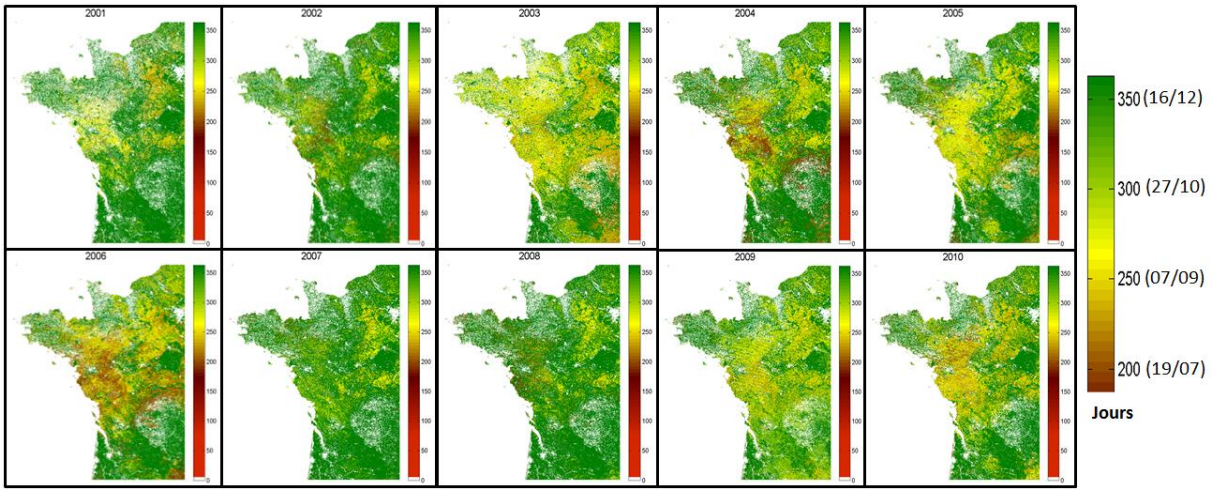


Figure 50- Date de fin de croissance de la végétation vue par MODIS sur le Grand-Ouest de 2001 à 2010 (Corgne et al., 2012)

L'analyse de cette métrique met également en évidence l'impact de la variabilité climatique sur la couverture végétale. Ainsi, les années sèches de 2005, 2006 et 2010 ressortent bien à cette échelle car elles sont caractérisées par une sénescence relativement précoce de la végétation. En 2005, année marquée par une sécheresse estivale, la date de fin de croissance de la végétation était avancée au 250ème jour de l'année (début septembre), tandis que pour des années humides et relativement fraîches telles que 2007 et 2008, la date de fin de croissance n'est intervenue qu'après le mois d'octobre. On remarque aussi que les sécheresses s'observent par une fin d'activité chlorophyllienne précoce en Bretagne et Basse-Normandie pour l'année 2003, et sur les régions Poitou-Charentes, Pays de la Loire, et sur le bassin de Rennes pour les années 2005 et 2006.

❖ **Suivi des changements d'occupation des sols par télédétection à l'échelle des sites d'étude**

Après avoir étudié les dynamiques de la couverture végétale à l'échelle du Grand-Ouest à partir des séries temporelles de fCOVER dérivées des images MODIS, nous avons cherché à les analyser à une échelle locale. Pour cela, deux sources de données ont été successivement utilisées : les séries temporelles de fCOVER dérivées des images MODIS calculées à l'échelle de chacun des sites d'étude retenus sur le Grand Ouest (**cf. Figure 47**) et des séries temporelles de fCOVER dérivées des d'images satellitaires à haute résolution spatiale calculées sur deux des six sites. Ces séries temporelles de fCOVER ont été analysées en les confrontant à des cartographies d'occupation et d'utilisation des sols réalisées à l'échelle parcellaire sur les six sites sur une période de quelques années à partir de données satellitaires à haute et très haute résolution spatiale. Deux images par an en moyenne ont été traitées afin de produire différents indicateurs tels que le ratio prairies/cultures ou le taux de couverture hivernale des sols.

- A partir des séries temporelles de FCOVER dérivées des images MODIS

Nous présentons ici les analyses effectuées sur les bassins versants du Yar et de la Vie et du Jaunay.

o Exemple du bassin-versant du Yar (Cf. Chapitre II, partie2)

L'analyse de l'évolution du fCOVER calculé à partir des images MODIS sur le bassin-versant de mars 2000 à mars 2011, montre que le maximum de taux de couverture végétale est enregistré sur une période qui varie de mai à septembre (**Figure 51**). Les cartes d'occupation et d'utilisation des sols réalisées à partir de données satellitaires plus précises, avec une résolution spatiale inférieure ou égale à 20 mètres, validées par des observations effectuées sur le terrain, montrent que cette période correspond à la croissance des céréales, le blé et le maïs arrivant respectivement à maturité à partir des mois de mai et de septembre. Par ailleurs, le bassin-versant comprend une part majoritaire de prairies au sein de sa Surface Agricole Utile (environ 65% en moyenne), ce qui explique que les taux minimum de couverture végétale observés apparaissent relativement élevés, la fraction minimum de couvert étant voisine de 40%. D'une façon générale, les précipitations régulières enregistrées sur ce bassin versant contribuent à maintenir l'activité chlorophyllienne des prairies sur toute l'année. Ainsi, sur l'ensemble de la série, on remarque bien l'impact du manque d'eau lors de l'été 2003. La forte baisse des taux de couverture végétale observée est due à l'absence d'irrigation du maïs. Les précipitations peu abondantes et la chaleur de l'été 2003 se sont manifestées par un stress hydrique et une forte baisse de l'activité chlorophyllienne des prairies.

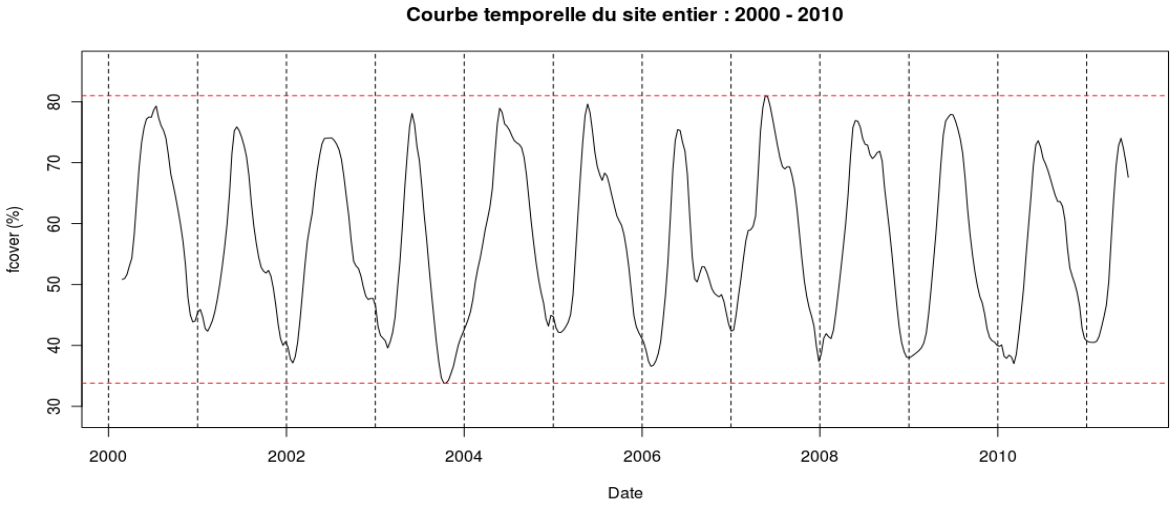


Figure 51- Evolution de la fraction de couverture végétale (fCOVER) sur le bassin-versant du Yar de mars 2000 à octobre 2011 (Corgne et al., 2012)

- Exemple des bassins-versants de la Vie et du Jaunay

Le bassin-versant de la Vie et du Jaunay, localisé en Vendée au cœur de la façade atlantique, couvre 782 Km². Caractérisé par une forte diversité des milieux et des usages, ce bassin versant à dominante rurale est soumis à une urbanisation historique située sur la bande littorale (Saint-Gilles-Croix-de-Vie) et à proximité de l'agglomération Yonnaise, et plus récente sur les franges des marais. Les terres agricoles sont occupées à plus de 40% par les céréales (maïs compris), le reste étant couvert par des prairies, permanentes ou temporaires. Face à une dégradation de la ressource en eau liée à l'irrigation (principalement pour le maïs) et à l'apport d'engrais et de pesticides, le SAGE du bassin versant de la Vie et du Jaunay, adopté par la Commission Locale de l'Eau fin 2009, vise entre autres à permettre une meilleure gestion qualitative et quantitative de l'eau couplée à la préservation et à la gestion des milieux aquatiques. Parmi les différentes actions définies par le SAGE, deux études ont été effectuées sur la cartographie des changements d'occupation des sols et l'analyse du climat (Etienne et al., 2010; Herrault & Corgne, 2010). Sur ce bassin versant, la variabilité climatique a une influence beaucoup plus marquée sur les variations inter et intra-annuelles de la couverture végétale que sur les sites bretons (**Figure 52**). Ainsi, les étés secs se distinguent nettement des étés bien arrosés, les taux de couverture végétale étant inférieurs à 30% pour les étés secs (2003, 2005, 2009, 2010) et supérieurs à 30% pour les étés où des précipitations suffisamment abondantes ont limité l'impact du stress hydrique sur la croissance de la végétation. L'évolution de la couverture végétale durant l'hiver 2006/2007 (doux et pluvieux) se distingue nettement des autres hivers, avec un fort taux de couverture végétale, à l'instar de ce qui a été observé à l'échelle du Grand Ouest, tandis que le taux de couverture végétale était moins élevé sur le bassin-versant du Yar, en raison de la diminution de l'implantation d'intercultures sur ce dernier cet hiver-là.

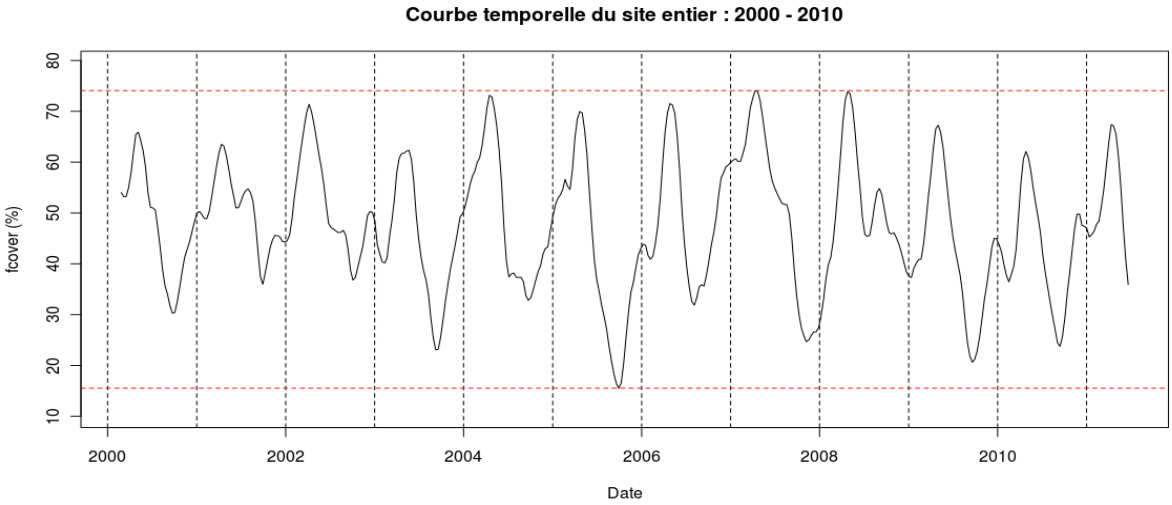


Figure 52- Evolution de la fraction de couverture végétale (fCOVER) sur le bassin-versant Vie-Jaunay de mars 2000 à mars 2011 (Corgne et al., 2012)

- Les dynamiques de la végétation appréhendées à partir des séries temporelles de fCOVER et de LAI dérivées d'images à haute résolution spatiale

Les prairies sont très sensibles au changement climatique en général et aux aléas climatiques en particulier (Vigneau-Loustau & Huyghe, 2008). La croissance de la prairie débute lorsque les températures moyennes sont positives et supérieures à 5-6°C, c'est-à-dire au printemps et se termine lorsque ces conditions de température et les conditions de teneur en eau minimale du sol ne sont plus satisfaites. Au cours de cette période de croissance, les prairies peuvent être exploitées différemment, soit par pâturage, par fauche (précoce pour l'ensilage ou l'enrubannage, tardif pour la production de foin) ou par exploitation mixte, ici avec une association de pâturage et de fauche, celle-ci étant parfois une variable d'ajustement lorsque la végétation se développe trop rapidement par rapport aux besoins en pâturage des troupeaux. L'intensité d'exploitation (durée du pâturage, nombre de fauches dans l'année) varie selon l'objectif souhaité par l'agriculteur par rapport à la parcelle en question, le climat, les besoins en herbe, le type de prairie et l'état de surface de la prairie. La gestion spatio-temporelle des prairies représente donc un indicateur bioclimatique intéressant à étudier.

La dynamique infra-annuelle du couvert végétal a été estimée en 2010 sur le bassin-versant du Yar avec une série d'images satellitaires à haute résolution spatiale afin de déterminer le mode de gestion des prairies (le pâturage, la fauche et l'exploitation mixte combinant le pâturage et la fauche), et leur lien entre ces modes de gestion et le climat. Pour cela, plusieurs variables biophysiques ont été calculées pour chaque parcelle en prairie sur l'ensemble du bassin versant à partir de cinq images SPOT en appliquant le couplage des modèles PROSPECT et SAIL utilisés précédemment pour produire les séries temporelles de variables biophysiques à partir des images MODIS (Dusseux et al., 2011). La calibration et la validation du traitement des images ont été effectuées à partir d'observations directes et d'enquêtes réalisées sur le terrain. Deux variables sont présentées ici, le LAI et le fCOVER.

L'analyse des profils temporels du LAI et du fCOVER permet de distinguer les trois modes de gestion étudiés (**Figure 53**) : Concernant les prairies pâturées (**Figure 53a**), les variables montrent une croissance, puis une décroissance régulière autour du mois de Juin, avec un léger pic de croissance (LAI) ou un plateau (fCOVER). Cette évolution peut être mise en relation avec les modalités de pâturage. La mise en pâture débute progressivement entre mars et avril. Les animaux sont déplacés régulièrement au sein du paddock au cours de la saison pour permettre à la prairie de repousser pour un nouveau passage le mois suivant. Durant la saison estivale, la croissance de la prairie diminue, ceci étant lié aux conditions climatiques moins favorables. Concernant les prairies fauchées, le profil varie selon le nombre de fauches effectuées dans l'année. Selon les exploitants, le nombre de fauches peut être différent. Pour certains, deux fauches sont réalisées au cours de l'année, tandis que pour d'autres, et selon les conditions climatiques, quatre fauches peuvent être réalisées. Dans le cas étudié (**Figure 53b**), le nombre d'images satellitaires acquises au cours de la saison limite l'étude du nombre de fauches observables au cours la période. Un pic de croissance peut être observé début juin, suivi d'une forte baisse des deux variables, ce qui suggère le processus suivant : une fauche mi-juin, suivie d'une nouvelle croissance, puis d'une nouvelle fauche en septembre. Le fort déficit de précipitation enregistré en 2010 a entraîné une faible repousse de l'herbe après la fauche du mois de juin, ce qui explique que les agriculteurs n'ont pas fauché avant le mois de septembre.

Une dernière fauche peut avoir été effectuée en fin de saison après une forte croissance, visible sur la **Figure 53b**. Enfin, les parcelles de prairies à exploitation mixte montrent une forte croissance entre mars et juin (**Figure 53c**). Le pic de croissance est atteint en juin. Ensuite, on observe une décroissance plus élevée que dans le cas d'une prairie seulement pâturée ou seulement fauchée. A partir du mois de juillet, la croissance des prairies à exploitation mixte reprend, mais de façon modérée.

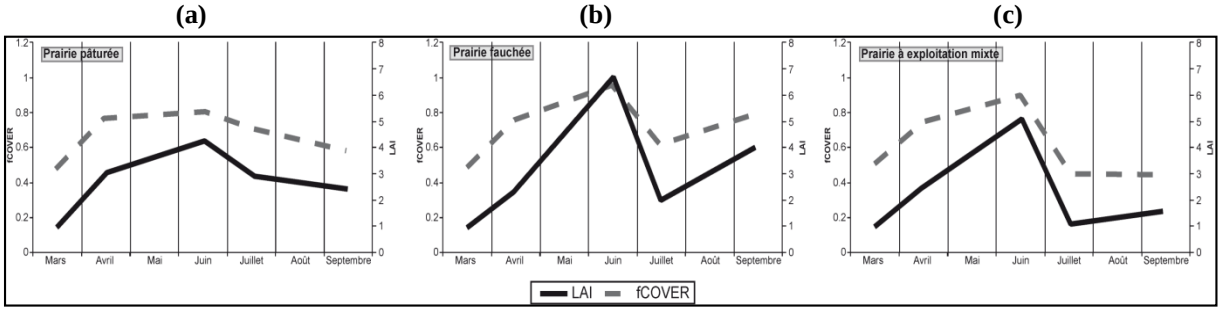


Figure 53- Discrimination des trois modes de gestion des prairies sur le bassin versant du Yar selon les profils moyens de LAI et de fCOVER calculés sur toutes les prairies du bassin versant pour l'année 2010 (Corgne et al., 2012)

D'après l'analyse des profils temporels des variables biophysiques dérivées des images de télédétection, l'activité agricole sur les prairies en Bretagne commence mi-mars et s'achève en octobre, ce qui est confirmé par les enquêtes réalisées auprès des agriculteurs. Cependant, la période de croissance et donc d'exploitation des prairies devrait être allongée avec le

changement climatique et l'augmentation des températures. En effet, la période d'exploitation pourrait débuter plus tôt dans l'année et se terminer plus tardivement en fin d'année, permettant ainsi une multiplication des activités agricoles opérées sur les parcelles. En outre, l'augmentation des températures ainsi que la baisse de la pluviométrie engendrerait des effets négatifs sur la croissance de la végétation au cours de la période estivale. Ceci se traduirait par une baisse, voire une absence de croissance de la végétation à cette période de l'année et entraînerait donc un déficit de production en herbe pour les troupeaux. Ainsi, le changement climatique pourrait entraîner une augmentation de la productivité des prairies au printemps et un déficit de croissance en été.

L'utilisation de la télédétection et des images à haute résolution spatiale nous permet d'appréhender les différentes dynamiques de couvert prairial en fonction de leur mode de gestion à l'échelle parcellaire. Le changement climatique peut entraîner une modification de l'importance relative des trois modes de gestion identifiés, puisque la sensibilité de la croissance des prairies au climat au cours de l'année diffère selon ces modes. En comparant les informations spatialisées sur la gestion des prairies avec des données climatiques, il devient alors possible d'estimer les productions en herbe et de prévoir les déficits pouvant être encourus selon le climat.

- **Conclusion**

L'étude des changements d'occupation et d'utilisation des sols par télédétection sur le Grand Ouest dans le cadre du programme Climaster a permis de mettre en évidence des dynamiques inter et intra-annuelles de la végétation à l'échelle régionale sur le Grand-ouest et à l'échelle locale sur six sites tests. Ces dynamiques ont été appréhendées à travers l'analyse des profils temporels de la fraction de végétation couvrant le sol et des cartes montrant l'évolution de la date de fin de croissance de la végétation. A l'échelle du Grand Ouest, les résultats montrent clairement l'impact de la variabilité climatique sur les changements d'occupation des sols. A l'échelle locale, en plus de la variabilité climatique, d'autres facteurs tels que les politiques environnementales, le changement de système d'exploitation agricole ou le contexte économique, seront à prendre en compte pour expliquer des changements d'occupation et d'utilisation des sols. L'application de l'approche développée ici sur de plus longues séries temporelles permettrait d'étudier les relations entre les changements d'occupation des sols et le climat en termes de changements climatiques, et non plus seulement en termes de variabilité climatique.

2. Perspectives de recherche

Mes perspectives de recherche s'inscrivent dans la continuité de mes travaux actuels. D'un point de vue thématique, elles s'intègrent prioritairement dans le cadre de l'Equipe 1 de l'UMR LETG (Changements d'usages, conflits, mutations territoriales à l'interface terre/mer) en se focalisant sur l'étude les changements d'occupation des sols en milieu agricole en interactions avec les sociétés et l'environnement. Les collaborations interdisciplinaires demeurent fondamentales (OSUR, GIS BRETEL) et se font dans le cadre de programmes de

recherche nationaux et internationaux. L'étude des changements d'occupation des sols se fera de manière plus intégrée avec les différentes partenaires scientifiques et acteurs territoriaux afin de répondre aux grands enjeux posés par le changement global comme notamment l'adaptation des territoires agricoles au changement climatique. A ce titre, deux programmes de recherche récemment acceptés qui illustrent les enjeux et défis scientifiques auxquels j'essaie de répondre à court et moyen terme sont présentés ici. Le programme « AICHA-CEFIPRA » qui étudie l'adaptation de l'agriculture irriguée face au changement climatique et le programme « GICC TERADCLIM » qui se focalise sur les terroirs viticoles et leur adaptation au changement climatique. Dans le cadre de ces programmes de recherche, de nouveaux capteurs satellitaires seront évalués pour la caractérisation et le suivi de l'occupation des sols. Le couplage de données radar-optique à très haute résolution spatiale apparaît à ce titre très prometteur pour une identification et caractérisation plus fine des changements d'occupation des sols. Nous présentons ici deux propositions récemment acceptées par le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) et la JAXA (Agence d'Exploration Aérospatiale Japonaise) pour le suivi et l'étude des changements d'occupation des sols.

2.1. Sur le plan thématique : les territoires agricoles face au changement climatique

2.1.1. Le programme AICHA-CEFIPRA

Nous présentons ici le programme de recherche franco-indien AICHA (Adaptation of Irrigated agriculture to climate CHAnge) qui a débuté en janvier 2013. Le projet AICHA, porté par le centre Indo-français pour la promotion de la recherche avancée (CEFIPRA/IFCPAR), est un projet pluridisciplinaire associant des centres de recherches français et indiens. Porté par L. Ruiz (INRA) et S. Muddu (Université des Sciences de Bengalore), son objectif principal est de développer, dans un contexte de changement global (climatique, démographique, économique…) des méthodes d'évaluation de la durabilité des systèmes de cultures actuels et des scénarios alternatifs sur un territoire d'agriculture irriguée en Inde. Dans le contexte du changement climatique et d'une agriculture de plus en plus dépendante des eaux souterraines pour l'irrigation, il est en effet crucial de développer des méthodes fiables d'évaluation de la durabilité des systèmes de culture actuels et de scénarios alternatifs. Le LETG Rennes Costel intervient dans le WP3 qui étudie les impacts des interactions spatiales sur la durabilité des systèmes agraires dans un contexte de changement climatique à l'échelle du bassin versant. Nous évaluons ainsi l'apport des images satellitaires optiques pour la reconstruction des trajectoires d'occupation des sols sur le bassin versant du Berambadi localisé au sud-ouest de l'Inde sur les trois dernières décennies (Amit Sharma et al., 2014) et la caractérisation de l'usage des sols à partir d'une série d'images radar polarimétriques (Rossignol et al., 2013).

Le site d'étude du projet AICHA est le bassin versant du Berambadi (84 km²) localisé dans le sud-ouest de l'état du Karnataka sur le plateau du Deccan (Inde). Intégré au bassin versant de la Kabini (**Figure 54**), il est situé dans la zone semi-aride avec des pluies comprises entre 750 et 900 mm/an. D'un point de vue agricole, le bassin versant du Berambadi dépend entièrement de la mousson qui définit deux saisons principales :

- **La saison du Kharif** qui s'étend de mai à septembre, qui correspond à la période de mousson sur le contient sub-asiatique. Cette saison est propice au développement de nombreux types de culture qui sont généralement semés à l'arrivée de la mousson.

- **La saison du Rabi** d'octobre à janvier, qui correspond à une saison plus sèche malgré la mousson du nord-est qui apporte un peu de pluies. Cette période est propice aux cultures à récolte de « printemps », c'est-à-dire semées vers octobre-novembre à la fin des dernières pluies et récoltées vers le mois d'avril. Les mois de février, mars et avril sont généralement très secs et seules les cultures annuelles sont exploitées.

Le bassin versant du Berambadi est caractérisé par plusieurs rotations culturales sur une même année (2 à 3 cultures différentes) exploitées sur de petites parcelles agricoles (moyenne inférieure à 0.5 ha), ce qui en fait un territoire agricole aux dynamiques spatio-temporelles extrêmement complexes. On remarque ainsi que sur une année, on peut retrouver deux cultures de maïs sur la même parcelle : la première est semée au début de la saison du Kharif (mai) et récoltée fin septembre et une deuxième récolté généralement irriguée, semée en décembre et récoltée en mars. Cependant, on retrouve plus souvent une association de cultures à cycle court (oignons, ail, tomates, piments…) avec des cultures au cycle plus long (curcuma, sorgho, betterave…). On note ainsi que les cultures traditionnelles durant la saison du Kharif comme le sorgho, le millet… peu consommatrices en eau, font depuis plusieurs décennies place à une agriculture intensive hautement dépendante de l'irrigation (**Tableau 24**). L'irrigation provient essentiellement de l'exploitation de l'eau souterraine qui permet le développement de 2 à 3 cultures annuelles à l'échelle de micro-parcelle (inférieure à 1 ha). La construction de puits et de canaux d'irrigation n'a donc cessé de croitre pour alimenter en eau une agriculture appelée « cash crop », consommatrice en eau, correspondant à des cultures de vente (curcuma, oignon, tournesol…) essentiellement. Ainsi, selon le Ministère des Ressources en Eau (Ministry of Water Resources, 2011), 8 puits par km² sont recensés sur le bassin versant avec une augmentation de 21% entre 2001 et 2006.

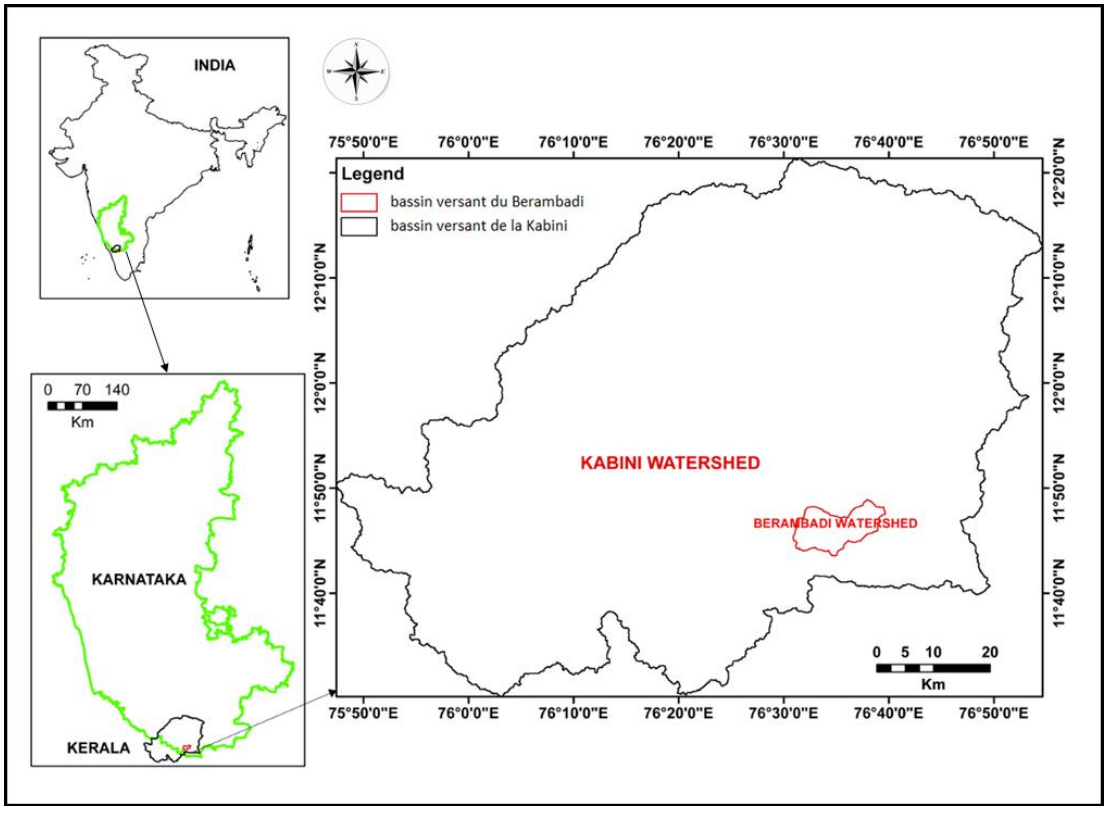


Figure 54- Localisation du bassin versant du Berambadi (Rossignol, 2013)

On assiste ainsi à une exploitation excessive de la nappe d'eau souterraine entraînant une baisse continue des réserves en eau, une dégradation de sa qualité (pollution par les nitrates notamment), une augmentation des coûts d'extraction de l'eau à partir de forages de plus en plus profonds et l'assèchement de certains puits (Sekhar et al., 2004). Les nombreux conflits d'usage (eau, sols…) et les pressions anthropiques sur l'environnement (densité de population, intensification des pratiques agricoles…) menacent ainsi la pérennité même du système agricole sur ce bassin versant. Dans un contexte de changement global, une connaissance fine des dynamiques d'occupation et d'usage des sols sur le bassin versant du Berambadi constitue ainsi un indicateur clé pour une meilleure gestion de cet espace par les acteurs locaux. A ce titre, le bassin versant du Berambadi représente un « défi scientifique » difficile car on y retrouve une agriculture irriguée avec plusieurs cycles culturaux annuels sur des parcelles de petite taille (inférieure à 0.5 ha). La caractérisation des cultures et leur suivi nécessitent ainsi une série d'images à haute résolution spatiale et temporelle. Etant donnés les forts taux de couverture nuageuse durant la mousson du Kharif, l'imagerie satellitaire radar est évaluée.

Tableau 24- Présentation des différents types de culture et de leur cycle phénologique sur le bassin versant du Berambadi

Cultures	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Curcuma												
Œillet d'Inde												
Canne à sucre												
Coton												
Eleusine												
Maïs												
Sorgho												
Pois chiche												
Haricot												
Ail												
Chou												
Betterave												
Piment												
Tournesol												
Arachide												
Pastèque												
Oignon												
Tomate												

Le bassin versant du Berambadi est un site expérimental étudié depuis plusieurs années par les collègues de l'Université des Sciences de Bengalore (Sekhar et al., 2004). Concernant le suivi de l'occupation des sols, les campagnes de terrain sont synchronisées avec les acquisitions d'image sur le bassin versant (**Tableau 25**). Ainsi 60 parcelles sont quotidiennement suivies, les informations suivantes étant intégrées dans un SIG (**Figure 55**):

• Les types de cultures sur les parcelles

• L'humidité moyenne des sols

• Le LAI (Leef area Index) et la biomasse

• La température moyenne des sols

Une série de huit images radar polarimétriques acquises par le satellite Radarsat-2 (©Vigisat) sont exploitées sur l'année 2012 (**Tableau 25**). Les angles d'incidence des images sont relativement faibles (autour de 25°) ce qui les rend sensibles à la diffusion de surface. Par ailleurs, la répétitivité temporelle de Radarsat-2 est de 24 jours, ce qui apparait suffisant pour un suivi précis des cultures qui ont un cycle minimum de 2 à 3 mois.

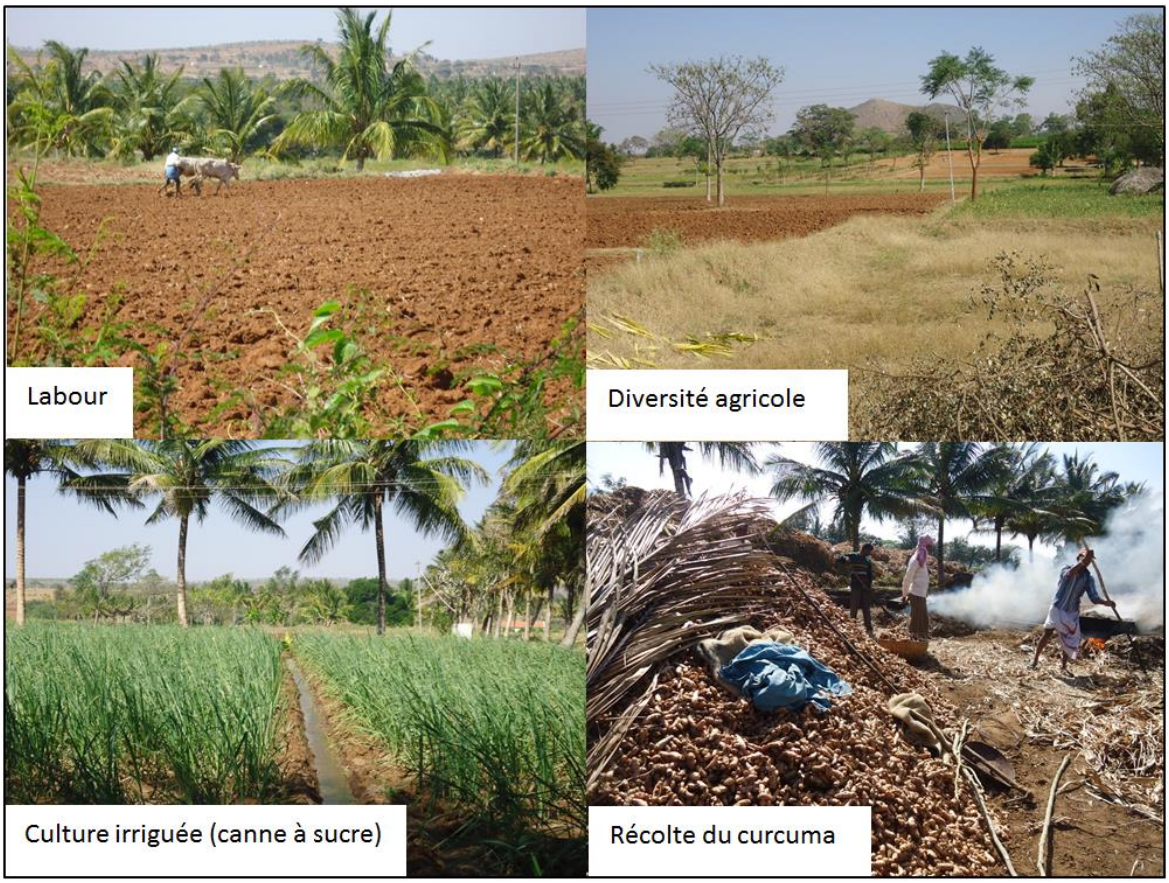


Figure 55- Occupation du sol sur le bassin du Berambadi (Janvier 2013)

Tableau 25- Présentation des images radar acquises en 2012 sur le bassin versant du Berambadi (Source : CLS-VIGISAT©)

Date de la prise de vue	07/07/2012	31/07/2012	24/08/2012	17/09/2012	11/10/2012	04/11/2012	28/11/2012	22/12/2012
Satellite	Radarsat-2	Radarsat-2	Radarsat-2	Radarsat-2	Radarsat-2	Radarsat-2	Radarsat-2	Radarsat-2
Capteur/Produit	SAR/SLC	SAR/SLC	SAR/SLC	SAR/SLC	SAR/SLC	SAR/SLC	SAR/SLC	SAR/SLC
Longueur d'onde	Bande C	Bande C	Bande C	Bande C	Bande C	Bande C	Bande C	Bande C
Orbite	Descendante	Descendante	Descendante	Descendante	Descendante	Descendante	Descendante	Descendante
Mode d'acquisition	FQ6 quad-pol	FQ6 quad-pol	FQ6 quad-pol	FQ6 quad-pol	FQ6 quad-pol	FQ6 quad-pol	FQ6 quad-pol	FQ6 quad-pol
Polarisations	HH, VV, HV, VH	HH, VV, HV, VH	HH, VV, HV, VH	HH, VV, HV, VH	HH, VV, HV, VH	HH, VV, HV, VH	HH, VV, HV, VH	HH, VV, HV, VH
Fauchée	25 km.	25 km.	25 km.	25 km.	25 km.	25 km.	25 km.	25 km.
Angles d'incidence	24.6°- 26.4°	24.6°- 26.4°	24.6°- 26.4°	24.6°- 26.4°	24.6°- 26.4°	24.6°- 26.4°	24.6°- 26.4°	24.6°- 26.4°
Résolution pixel distance*azimuth	4.7*4.7 m.	4.7*4.7 m.	4.7*4.7 m.	4.7*4.7 m.	4.7*4.7 m.	4.7*4.7 m.	4.7*4.7 m.	4.7*4.7 m.

Les premiers résultats ont montré que la série d'images Radarsat-2 en pleine polarimétrie ne permet pas d'identifier et caractériser les cultures à l'échelle parcellaire. La résolution spatiale ne semble en effet pas assez fine pour détecter des changements d'occupation des sols sur des parcelles qui sont souvent inférieures à 0.5 ha. Pour évaluer cet aspect, des images en polarisation double issues du satellite TerraSar-X à 2*2 mètres de résolution spatiale seront acquises en 2014 durant la période du Kharif. Cependant, la pleine polarisation de Radarsat-2 a permis d'extraire des paramètres de diffusion de surface (volume, rugosité et double-rebond) qui, analysés dans un contexte multi-temporel apparait prometteur pour suivre les principaux cycles culturaux des parcelles à fine échelle. A ce niveau, de nouveaux algorithmes de classification d'images devront être développés pour prendre en compte l'aspect temporel de ces images à fine échelle spatiale. Si des algorithmes de classification existent déjà pour les séries d'images satellitaires à moyenne et basse résolution spatiales, ils ne paraissent pas adaptés à la richesse spatiale des images à haute voire très haute résolution spatiale. L'objectif visé est de caractériser spatialement les pratiques agricoles, les cycles de culture, etc. à fine échelle sur le bassin versant et les assimiler dans un modèle intégré évaluant l'impact de différents scénarios climatiques sur la durabilité agricole du territoire. Le modèle développé dans le cadre de ce programme est un modèle intégré couplant différents modèles (agronomique : STICS, hydrologique AMBHAS-GWet socio-économique : LERNA). Les variables d'entrée portant sur l'étude des changements d'occupation des sols apparaissent donc fondamentales et constituent un défi scientifique majeur tant sur le point méthodologique que thématique.

2.1.2. Le programme GICC TERADCLIM

Le programme GICC-TERADCLIM coordonné par H. Quénol (LETG Rennes COSTEL) a pour objectif de mettre en place une méthodologie de modélisation spatiale du climat adaptée aux échelles fines afin d'apporter des réponses aux conséquences futures du changement climatique en procédant à une simulation adaptée. Pour répondre à cet objectif, ce projet s'articule en 4 parties :

- Acquisition des données météorologiques et agronomiques à l'échelle de vignobles expérimentaux ;
- Modélisation climatique à l'échelle de terroirs viticoles et intégration des scénarios IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) avec notamment la

mise en relation entre la modélisation atmosphérique (ex : RAMS, WRF, ..) et la modélisation statistique ;

- Scénarios d'adaptation des vins de terroir au changement climatique à une échelle de temps de 15-30 ans avec l'utilisation d'une plateforme Multi-agents (SMA) ;
- Transfert de l'information auprès de la profession viticole et sensibilisation au changement climatique (ex : proposition d'adaptation à l'échelle de l'exploitation viticole ; ateliers participatifs chercheurs/acteurs, …)

Dans le cadre de ce programme, mes travaux se focalisent sur le suivi phénologique de la végétation à partir de données satellitaires. Les images MODIS caractérisées par une moyenne résolution spatiale (250 à 500 mètres) mais une haute résolution temporelle (1 à 2 jours) sont évaluées pour détecter les changements phénologiques sur les vignobles. Dans le cadre de ce programme, de nombreux sites sont étudiés à l'échelle mondiale afin de mesurer l'impact du changement climatique sur les vignobles dans différents contextes géographiques. Nous présentons ici les premiers résultats portant sur le territoire de l'AOC de Saumur-Angers. L'AOC de Saumur-Angers qui est située dans le Maine-et-Loire, entre Saumur et Montsoreau, fait partie du vignoble de la vallée de la Loire. Le vignoble de l'AOC de Saumur-Angers couvre 33 840 hectares. Ce site, qui est monocultural, est particulièrement intéressant à étudier car les changements observés sur les variables biophysiques sont étroitement liés aux variations des températures et des précipitations.

Nous utilisons ici une série d'images MODIS de 2000 à 2011 avec une résolution temporelle décadaire. Une chaîne de traitements développée au LETG Rennes Costel (Lecerf, 2008) permet d'extraire différentes variables biophysiques comme le Fcover (fraction de couverture végétale) ou le LAI (Leaf Area Index) sur les 10 années étudiées. Des métriques temporelles comme le début de la croissance de la végétation, le maximum de croissance de la plante ou la sénescence sont alors extraites de ces variables. Associé à ce suivi satellitaire, nous disposons également d'un réseau de 13 stations climatiques installées dans le cadre du programme au sein de l'AOC (températures et précipitations) ainsi que des relevés terrain annuels identifiant les stades phénologiques de la vigne (**Figure 56**). Trois phases phénologiques sont spécifiquement étudiées, le débourrement, la floraison et la véraison.

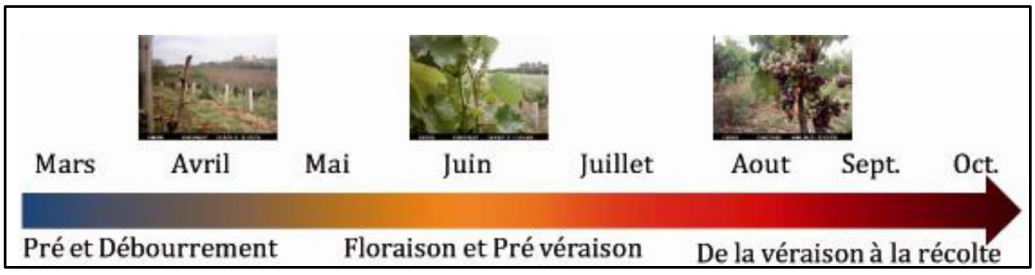


Figure 56- Phénologie de la vigne dans l'hémisphère nord (Quénol, 2012)

Les **Figure 57** et **Figure 58,** qui présentent l'évolution estivale et annuelle du fCOVER sur la période 2000 - 2010 permettent d'identifier les hivers 2000-2001 et 2006-2007 (particulièrement doux et pluvieux) qui contribuent à augmenter l'activité chlorophyllienne et les taux de couverture végétale (Thomas et al., 2012). La canicule de l'été 2003 est caractérisée par une faible activité photosynthétique bien visible également. En 2005, année la plus sèche

enregistrée entre 2000 et 2010, l'automne est caractérisé par un manque d'eau et on observe une forte diminution de la couverture végétale, potentiellement en lien avec un stress hydrique important qui impacte directement l'activité chlorophyllienne. Enfin, pour l'hiver 2005/2006, plus froid que la normale avec des températures particulièrement basses dès le mois de novembre, on observe une très faible activité chlorophyllienne et un faible taux de couverture des sols de l'automne 2005 à la fin de l'hiver 2005/2006.

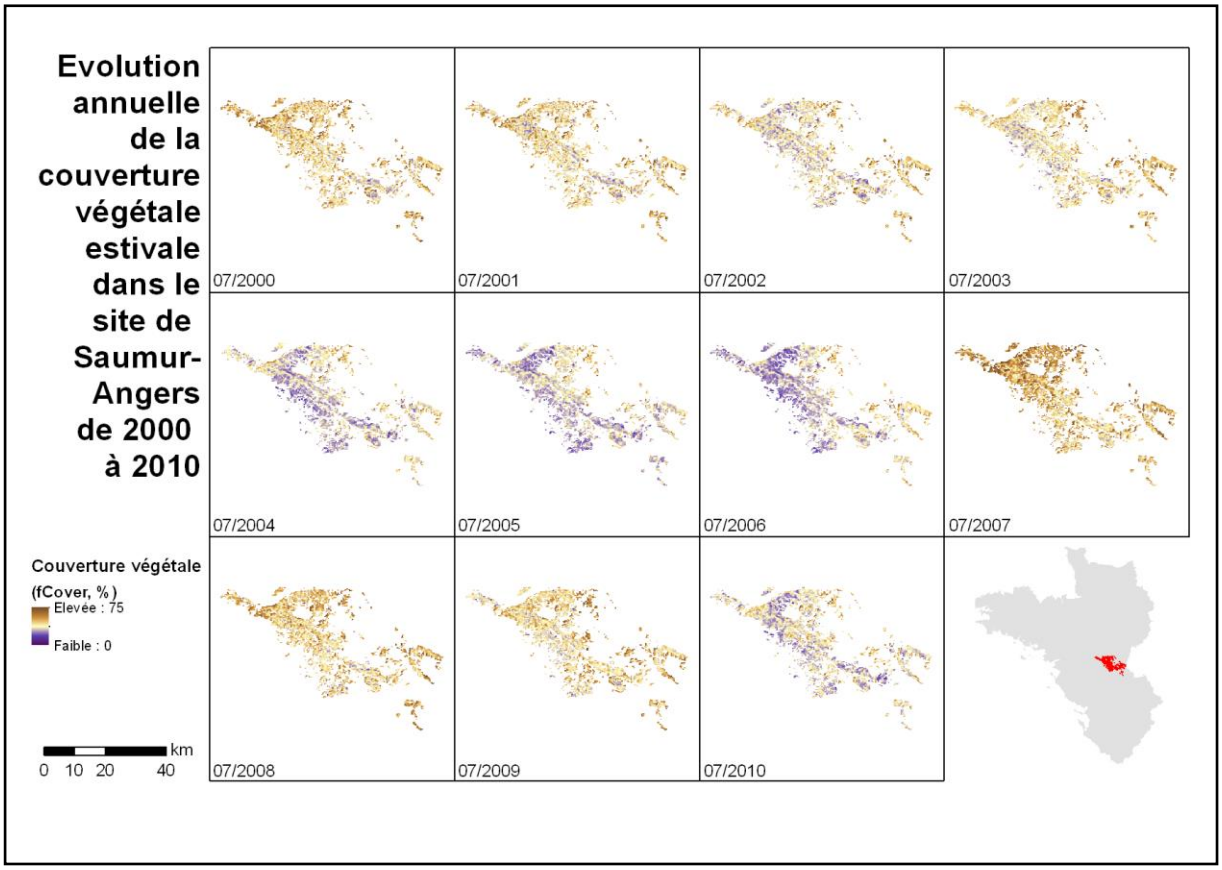


Figure 57- Cartographie de l'évolution estivale de la couverture végétale de 2000 à 2010, sur le site de Saumur-Angers (Corgne et al., 2012)

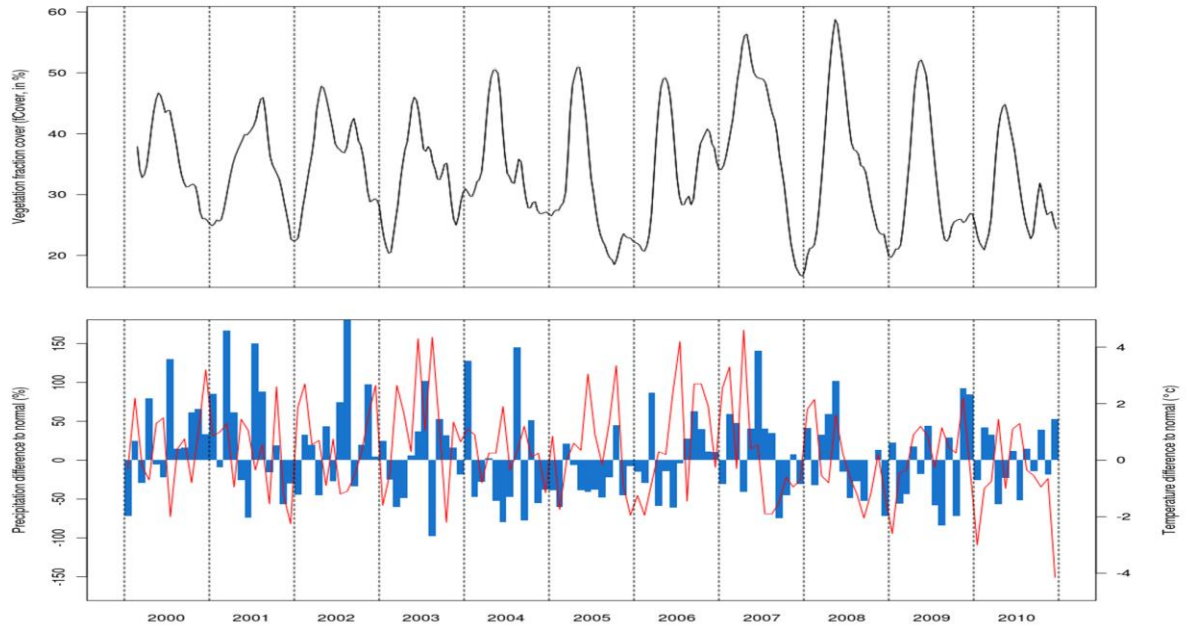


Figure 58- Evolution de la fraction de couverture végétale (fCOVER) sur le site de Saumur-Angers de mars 2000 à mars 2011 (Thomas et al., 2012)

Les observations terrain portant sur les grands stades phénologiques de la vigne sont comparées aux métriques temporelles dérivées des variables biophysiques de MODIS (**Figure 59**).

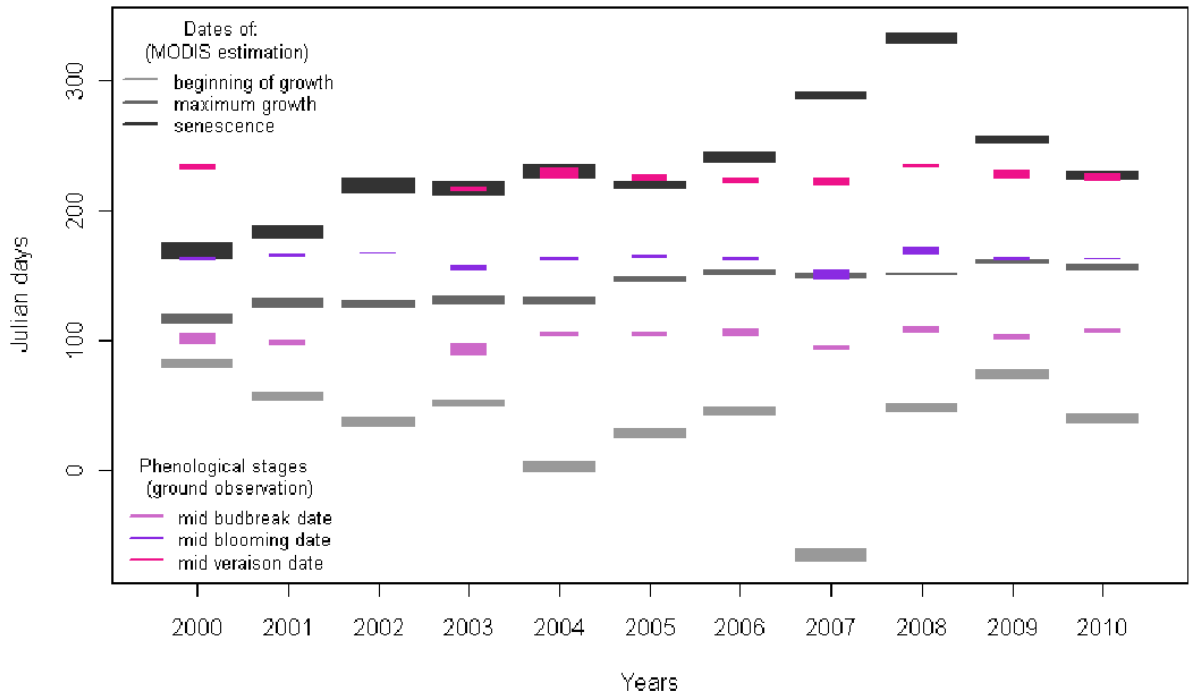


Figure 59- Stades phénologiques de la vigne mesurées sur le terrain et le capteur MODIS (Thomas et al., 2012)

On remarque une faible correspondance entre les stades phénologiques de la vigne issus des relevés terrain et les estimations issues des métriques temporelles de MODIS. Le début de croissance estimée avec MODIS apparait être la plus éloignée des données terrain. En revanche, on note une meilleure concordance des estimations MODIS avec les observations terrain pour le stade de véraison et de sénescence. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ceci.

En règle générale, sur ces dix années, les métriques temporelles MODIS apparaissent pertinentes pour détecter les extrêmes climatiques qui se caractérisent par exemple par une sénescence importante du vignoble sur le site entier. En revanche, une estimation des stades phénologiques avec MODIS apparait difficile à extraire à fine échelle (parcellaire). Ceci est principalement lié à la résolution spatiale des images (250 à 500 mètres), un même pixel pouvant englober plusieurs parcelles avec différents cépages au développement phénologique spécifique à chacun. Par ailleurs, d'autres cultures ou des boisements (haies) contigües au vignoble peuvent également modifier les valeurs des variables biophysiques et ainsi décaler les métriques temporelles qui en sont dérivées. Ainsi, pour un suivi phénologique à l'échelle parcellaire, des données à haute résolution spatiale apparaissent nécessaires. Ceci étant, il apparait fondamental de conserver une très haute résolution temporelle.

2.2. Sur le plan méthodologique : Evaluation de nouveaux capteurs satellitaires pour une meilleure compréhension des territoires agricoles

Aux échelles locales, voire régionales, si la télédétection apparait comme l'outil le plus approprié pour étudier les territoires agricoles, elle est cependant limitée par certaines contraintes pour la compréhension de ces espaces aux dynamiques complexes. Ainsi, si la résolution spatiale des capteurs depuis 2000 a considérablement augmenté et apparait plus adaptée au parcellaire parfois fragmenté des territoires agricoles (Ex : Spot, Landsat, Irs-Liss…), leur résolution temporelle est généralement faible voir insuffisante pour un suivi régulier de la cinématique culturale. Au contraire, lorsque cette résolution temporelle est bonne (MODIS, SPOT-Végétation…), c'est la résolution spatiale qui fait défaut et qui ne permet pas une caractérisation à fine échelle de l'usage des sols. Or, depuis 2010, on constate une évolution de l'offre satellitaire très prometteuse pour notre problématique de recherche. Des agences spatiales comme le CNES (France), l'ESA (Europe), l'ASC (Canada), la DLR (Allemagne) ou la JAXA (Japon) développent ainsi des programmes de recherche spatiale ambitieux basés sur le couplage de « constellations » de satellites optiques et radar à haute et très haute résolution spatiale et temporelle. Nous pouvons citer ici le programme « Pléiades » du CNES qui constitue la composante optique du système d'observation franco-italien Orfeo, l'Italie fournissant la composante Radar appelée Cosmo-Skymed. Grâce à ce programme des images satellitaires d'une temporalité quasi journalière peuvent être acquises sur la quasi-totalité du globe, les images radar complétant l'offre optique lorsque la couverture nuageuse est présente.

A ce niveau, dans le cadre du programme de recherche TERADCLIM portant sur l'impact du changement climatique sur le vignoble dans le monde, nous évaluons actuellement les données du capteur Pléiades pour le suivi phénologique de la vigne. Nous disposons ainsi de 5 images optiques acquises en 2013 (de janvier à avril) qui couplées à des données terrain sont évaluées pour l'identification des cépages et la caractérisation des stades phénologiques du vignoble de la Bodega d'AltaVista (**Figure 60**).

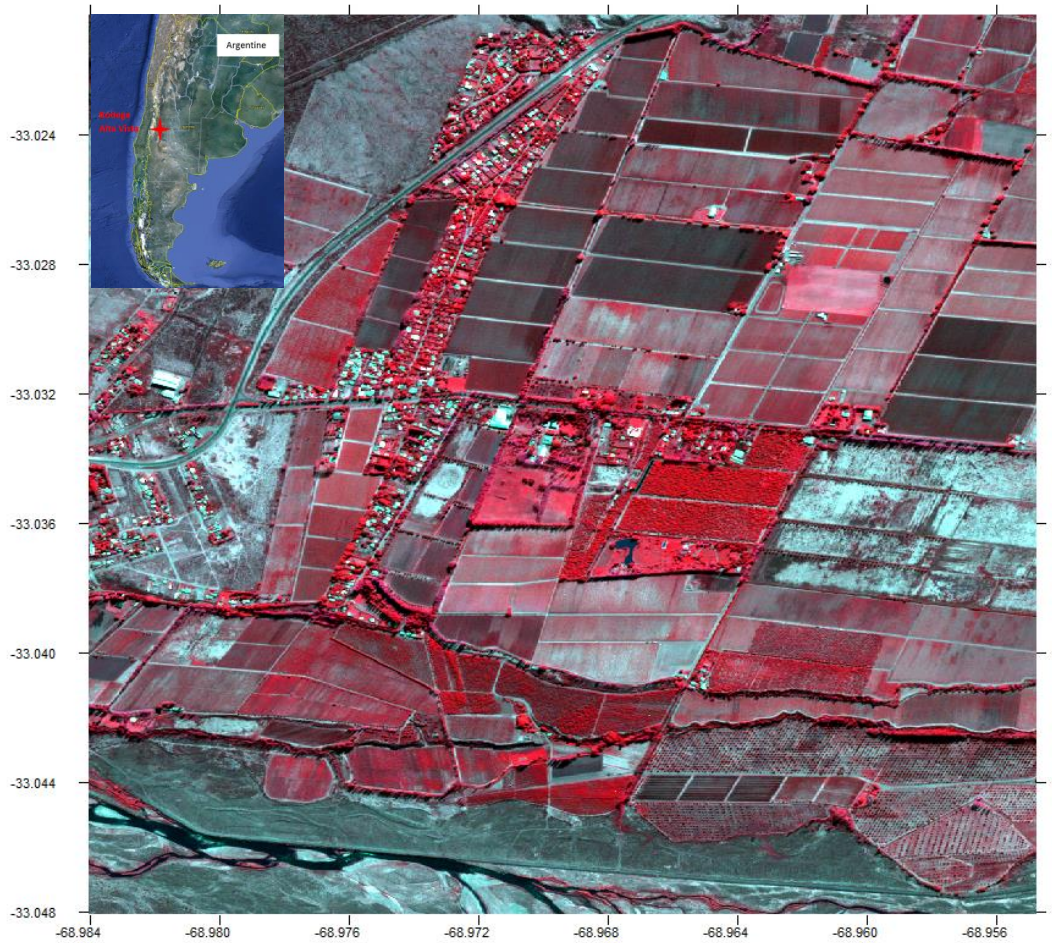


Figure 60- Localisation du site d'étude en Argentine pour le suivi phénologique du Vignoble (Programme Pléaides)

La complémentarité optique/radar développée depuis plusieurs années dans le cadre de mes recherches pour l'étude des changements d'occupation des sols sur les territoires agricoles apparait ainsi en plein développement pour les prochaines décennies. Cette synergie encore peu évaluée pour une caractérisation fine des territoires agricoles offre des perspectives de recherche très intéressantes tant sur le point thématique que méthodologique.

Ainsi, sur le plan thématique, il s'agira de caractériser non seulement les changements d'occupation et d'usage des sols mais également les pratiques agricoles associées (semis, labours, récoltes, fertilisations…), les stades phénologiques des cultures (début de croissance, pic de croissance, sénescence…), les rotations et successions culturales (périodes sans culture, jachères, inter-cultures…). Ces données d'une précision thématique accrue apporteront une source d'information privilégiée pour les acteurs et gestionnaires territoriaux (exploitants agricoles, gestionnaire de la ressource en eau, politiques…). Elles serviront également, dans un contexte de changement global, à mieux calibrer les modèles (agronomique, hydrologiques, climatiques, socio-économique…) visant à une meilleure compréhension et gestion des territoires. Les territoires agricoles sont en effet déjà touchés par les effets du changement global (climatique, démographique, économique, social…) avec notamment des impacts majeurs sur l'environnement (pollution de la ressource en eau, des sols, désertification, déforestation, baisse de la biodiversité…) menaçant la pérennité même des sociétés. La « durabilité » des territoires agricoles passera ainsi nécessairement par une plus fine

connaissance et compréhension des dynamiques spatio-temporelles qui interagissent avec l'environnement et les sociétés. Mes futurs projets de recherche s'inscriront dans cette démarche où l'interdisciplinarité doit être réalisée de manière encore plus intégrée pour une meilleure analyse et gestion de ces espaces.

D'un point de vue méthodologique, de nombreux défis scientifiques sont également à relever pour l'étude des changements d'occupation et d'usage des sols (Betbeder et al., 2014a; Corgne et al., 2014). Ainsi, les classifications d'images satellitaires à (très) haute résolution spatiale et temporelle nécessiteront des développements méthodologiques innovants basés entre autres sur des algorithmes de classification gérant de l'information multi-temporelle et multi source, une richesse spectrale et spatiale plus importante…De nouveaux modes de représentation graphique de la « temporalité spatiale » seront également à développer pour représenter la phénologie ou les pratiques culturales par exemple. Concernant la modélisation des changements d'occupation et d'usage des sols, celle-ci devra intégrer spatialement un niveau d'informations sur la caractérisation de l'occupation des sols, les pratiques culturales… de plus en plus fin. Il s'agira ainsi de représenter spatialement et temporellement la variabilité des actions anthropiques sous contraintes multiples (environnementales et socio-économiques) et d'en étudier les interactions avec l'environnement. Dans cette perspective, nous privilégierons une modélisation spatialement explicite basée sur les automates cellulaires et les systèmes multi-agents. Nous utiliserons dans ce cadre la plate-forme DAHU (Dynamique des Activités Humaines) développé par le site GEOMER de l'UMR LETG (Tissot & Cuq, 2005; Tissot et al., 2005) et en cours d'évaluation sur les terroirs viticoles (programme TERADCLIM). Contrairement aux approches classiques, l'espace n'est pas considéré comme un élément structurant du modèle, mais comme une donnée de forçage résultant d'une combinaison de phénomènes opérant à différentes échelles spatiales et temporelles (Tissot et al., 2005). Cette modélisation permettra entre autre de formaliser spatialement les facteurs motivant les changements d'occupation des sols en interaction avec l'évolution des contraintes environnementales et en particulier le changement climatique aux échelles fines. Les résultats produits à l'échelle parcellaire offriront aux acteurs et gestionnaires locaux différents scénarios d'adaptation des territoires agricoles au changement climatique.

CONCLUSION

A travers ce texte de synthèse, j'ai tenté de dégager le fil conducteur de mes recherches et la logique des démarches que j'ai privilégiées. Ces travaux s'inscrivent dans un contexte scientifique pluridisciplinaire tout en en se focalisant sur les axes de recherche de l'UMR 6554 LETG, plus précisément sur l'Environnement, la Télédétection et la Géomatique. Ce travail de synthèse m'a permis de positionner mes recherches par rapport aux autres disciplines et de mettre en exergue l'apport de la Géographie pour cette problématique de recherche. Mes travaux se situent ainsi à l'interface des sciences environnementales (géosciences, agronomie,…) et des sciences en traitement de l'information (traitement du signal, fusion de données) avec comme trait d'union entre ces disciplines, la transversalité inhérente aux approches spatiales.

Dans la présentation des différents travaux, l'évaluation de la télédétection radar occupe une place privilégiée, car elle constitue une source d'information spatiale originale, encore peu utilisée en Géographie, et elle offre d'intéressantes potentialités pour l'étude des changements d'occupation des sols. La fusion d'information de type « incertaine » apparait également comme une approche spécifique de mes travaux. Elle offre en effet un cadre théorique et conceptuel adapté à l'étude des changements d'occupation des sols caractérisés, en contexte agricole, par des trajectoires spatio-temporelles complexes et des interactions avec les territoires plus ou moins connues. En m'appuyant sur les recherches que j'ai effectuées et encadrées, j'ai ainsi essayé de montrer comment la télédétection radar et la fusion d'information peuvent être utilisées pour l'étude des changements d'occupation et d'usage des sols en interaction avec les sociétés humaines et leurs territoires.

Dans un premier temps, j'ai évalué le potentiel de l'imagerie radar pour l'étude des changements d'occupation et d'usage des sols sur différents territoires agricoles. L'imagerie radar reste en effet sous exploitée dans les programmes de recherche portant sur les changements d'occupation et d'usage des sols, qui, généralement, utilisent uniquement l'imagerie optique. Cependant, la couverture nuageuse limite fortement la caractérisation et le suivi des changements d'occupation et d'usage des sols dans certaines régions. Outre le fait que l'imagerie radar s'affranchit des conditions climatiques, elle présente un intérêt évident pour caractériser les états de surface (rugosité, humidité de surface). La polarimétrie radar, technologie récente développée sur certains capteurs, présente également un fort potentiel pour identifier et suivre les changements d'occupation des sols. Sa combinaison avec l'imagerie optique apparait ainsi être un défi scientifique majeur pour affiner la caractérisation des changements d'occupation des sols. Sur un plan méthodologique, mes travaux ont porté sur l'évaluation des potentialités de l'imagerie radar pour la caractérisation de l'occupation des sols:

- Ainsi, les paramètres polarimétriques permettent une identification fine des sols nus et des sols couverts en contexte agricole bocager caractérisés par un parcellaire agricole très dense et de petite taille. Ils permettent également une caractérisation de la rugosité des sols nus (lisses ou rugueux). En revanche, aucune relation n'a été trouvée entre l'humidité des sols et les intensités radar sur les sols nus car l'hétérogénéité intra parcellaire de l'humidité des sols est trop importante.

- La synergie radar et optique a été également évaluée sur la thématique de la couverture hivernale des sols. La polarimétrie radar apparait ainsi plus appropriée pour discriminer les sols nus grâce notamment à l'utilisation de certains paramètres polarimétriques (contribution de la diffusion de surface, une faible dépolarisation du signal…). Au contraire, l'imagerie optique apporte, elle, à travers le calcul d'indices de végétation et de variables biophysiques (LAI, Fapar…), une information privilégiée pour identifier la végétation. Leur synergie offre ainsi des taux de classification très intéressants (indice de Kappa proche de 0.9) à l'échelle parcellaire. Par ailleurs, leur fusion à travers la règle d'inférence de Dempster-Shafer permet de mesurer le niveau d'incertitude de chaque classe à l'échelle parcellaire. Ceci rend l'interprétation des résultats plus réaliste et adaptée à la complexité de la thématique étudiée qui correspond à une période de transition d'un point de vue cultural.
- L'aspect multi-temporel des données radar à très haute résolution spatiale (THRS) a également été évalué sur deux thématiques : la cartographie des cultures en contexte bocager et la cartographie des zones humides. D'un point de vue général, l'intégration d'une série d'images radar THRS dans les processus de classification améliore considérablement les résultats que ce soit pour cartographier les cultures ou caractériser les zones humides à très fine échelle. En revanche, si la résolution spatiale (inférieure à 2*2 mètres) apparait très bien adaptée aux espaces agricoles, une acquisition quotidienne d'images durant la période culturale (une à deux images par mois) permettrait d'affiner l'identification des cultures et discriminer différentes pratiques culturales.
- Concernant les zones humides, l'apport de la polarimétrie même partielle (dual-pol) permet une fine caractérisation de la végétation au sein même de ces espaces. Cependant, les algorithmes de classification intégrant des séries d'images à très haute résolution spatiale sont encore en phase d'évaluation et les résultats diffèrent beaucoup selon le type d'algorithme utilisé.
- Enfin, une série d'images radar multi sources à haute résolution spatiale a été analysée pour étudier l'évolution spatio-temporelle de l'occupation des sols durant la saison des pluies en contexte semi-aride entre 1993 et 2009. L'exploitation de la série d'images a ainsi permis d'identifier et spatialiser les occurrences de sol nu durant la période étudiée. En saison des pluies, de nombreuses occurrences de sols nus s'apparentent à des signes de désertification significatifs (dégradation des sols, disparition de la végétation, encroutement des sols…). Dans un contexte de changement global, cette information spatialisée représente pour les gestionnaires locaux un outil pertinent pour optimiser leurs actions sur le terrain.

Concernant la modélisation des changements des changements d'occupation des sols en interaction avec les territoires agricoles, les travaux montrent que :

- Les changements d'occupation des sols en contexte agricole intensif ont des impacts significatifs sur l'environnement en général (climat, biodiversité, ressources naturelles...) et donc sur le développement des territoires. Cependant, l'étude de leurs interactions reste encore incomplète et incertaine.
- En Bretagne, même s'il est clairement établi que l'intensification agricole depuis les années 1960 a un impact négatif sur la qualité de l'eau (pollution par les nitrates, les pesticides, les Matières Organiques….), les changements d'occupation des sols

observés n'ont pas les même conséquences environnementales selon le territoire étudié. Ces changements sont en effet le reflet des changements passés qui interviennent de différentes manières dans l'espace et le temps, avec un rythme et une intensité variables. Combinés aux caractéristiques physiques (climatique, pédologique, hydrologique…) et socioéconomique de l'espace étudié, les changements d'occupation des sols auront des impacts plus ou moins significatifs sur l'environnement. Parmi les travaux exposés dans ce mémoire, le bassin versant du Yar (baie de Lannion) constitue un exemple significatif de cette complexité. A l'origine de plus de 60 % des flux polluants alimentant la Baie de Saint-Michel-en-Grève, il a fait l'objet depuis une dizaine d'années de programmes de luttes contre les marées vertes. Les changements d'occupation des sols observés depuis les années 2000 suite à ces programmes (remise en herbe des zones humides auparavant cultivées, SAU majoritairement prairial, mise en place d'inter-cultures pièges à nitrate en hiver...) n'ont eu pour l'instant, qu'un faible impact sur les transferts de flux polluants vers les cours d'eau. La résilience du processus étudié (cycle de l'azote) et la configuration de la baie (faible pente, milieu confiné, large estran…) font que les échouages d'algues vertes se poursuivent, et ce, malgré des teneurs de nitrate inférieures aux normes européennes. En ce qui concerne la pollution des captages d'eau brute superficielle de Bretagne par les MO, on observe sur plus de 40 sous-bassins versants bretons étudiés dans le cadre du GEPMO, une forte variabilité spatiale provenant notamment de facteurs naturels, au premier rang desquels on trouve la topographie et la pédologie des bassins versants. Cependant, la part des facteurs naturels, de l'ordre de 25% dans la variance totale reste faible, d'où l'idée que d'autres facteurs, d'origine anthropique, sont impliqués dans la pollution. Ces facteurs n'ont pu être clairement déterminés même si des études ont montré une corrélation inverse entre la teneur en MO à l'exutoire, et la densité du réseau bocager au sein des zones humides de bas-fonds. La restauration d'un réseau bocager suffisamment dense au sein des zones contributives de fond de vallée pourrait donc être une mesure curative efficace pour diminuer la pollution des eaux de rivières par les matières organiques.

- Les changements d'occupation et d'usage des sols peuvent avoir des conséquences inattendues sur l'environnement. Ainsi, dans la zone Hapex-Sahel au Niger, les changements d'occupation des sols liés à une intensification agricole ont indirectement contribués à l'augmentation sensible du niveau de la nappe phréatique autour de Niamey. En effet, malgré une réduction importante des précipitations depuis les années 1970 et une forte pression sur la ressource en eau, de récents travaux (Leblanc et al., 2008; Favreau et al., 2009; Corgne et al., 2010) ont montré que la dégradation des sols et leur encroutement accélèrent les processus d'infiltration de l'eau vers la nappe souterraine.

Dans ce contexte d'incertitude élevé, il apparait ainsi nécessaire d'améliorer nos connaissances portant sur les interactions entre les changements d'occupation des sols et l'environnement. Mes perspectives de recherche vont ainsi, à court et moyen terme suivre les directions suivantes :

-Sur le plan méthodologique :

L'amélioration de la caractérisation de l'occupation et l'usage des sols à partir de l'évaluation de données multi sources et multi temporelles THRS.

Le développement d'algorithmes de classifications adaptés aux données multi temporelles THRS. Ce point constitue un enjeu majeur pour cette problématique, les méthodes de classification n'étant pas à l'heure actuelle adaptées au contenu informationnel des séries d'images THRS.

L'amélioration de la prise en compte de l'incertitude dans l'étude des changements d'occupation des sols. Source d'information de base pour de nombreux programmes de recherche en environnement, la « donnée occupation des sols » doit intégrer la notion d'incertitude pour une meilleure analyse et assimilation dans les modèles. Pour cela, nous évaluerons les modèles de fusion développés récemment permettant de gérer différents types et niveaux d'incertitude.

-Sur le plan thématique :

La caractérisation des modes d'usage des sols à fine échelle, comme la phénologie ou les pratiques culturales. Ces données d'une précision thématique accrue apporteront une source d'information privilégiée pour les acteurs et gestionnaires territoriaux (exploitants agricoles, gestionnaires de la ressource en eau, politiques…).

Une modélisation des changements d'occupation et d'usage des sols réalisée dans un contexte pluridisciplinaire plus intégré. Il s'agira ainsi de représenter spatialement et temporellement la variabilité des actions anthropiques sous contraintes multiples (environnementales et socio-économiques) et d'en étudier les interactions avec l'environnement. Dans cette perspective, nous privilégierons une modélisation spatialement explicite basée notamment sur les systèmes multi-agents.

Une étude des interactions focalisée sur le changement global, en particulier le changement climatique qui représente un enjeu fondamental pour la durabilité des territoires agricoles.

Ces travaux, d'ores et déjà engagés pour les années à venir, permettront d'apporter de nouvelles connaissances sur la problématique étudiée. Dans un contexte de changement global de plus en plus marqué, ils tenteront d'apporter des réponses adéquates pour un développement durable des territoires agricoles.

BIBLIOGRAPHIE

Abdel Latif A., Lecerf R., Mercier G., & Hubert-Moy L. (2008) Low Resolution Time Series Analysis With Erroneous Data. *IEEE Trans. On Geosciences and Remote Sensing*, **46**, 2083–2096.

Agarwal C., Green M.G., Morgan Grove J., Evans T.P., & Schweik C.M. (2002) A review and assessment of land-use change models: dynamics of space, time, and human choice. *United States Department of Agriculture*, 67.

Ambouta K., Valentin C., & Laverdière R. (1996) Jachères encroûtées d'érosion. *Sécheresse*, **7**, 269–275.

Amit Sharma K., Sekhar M., Corgne S., Ruiz L., Hubert-Moy L., Bandyopadhay S., & Rossignol C. (2014) Retrieving long time-series of land-use change using Brovey Transformation method on multi temporal satellite data: Application to an intensive agricultural watershed in south India. *Journal of Environmental Management*, soumis.

Angée M., Corgne, & Gruau G. (2006) Pollution des captages d'eau brute en rivière de Bretagne par les matières organiques. Une étude statistique inter sous-bassins versants du rôle de l'occupation du sol et des pratiques agricoles. 113 p.

Anys H. & He D.C. (1995) Approche multipolarisation et texturale pour la reconnaissance des cultures à l'aide de données Radar aéroporté. *Journal Canadien de Télédétection*, **21**, 138–157.

Appriou A. (1991) Probabilités et incertitudes en fusion de données multisenseurs. *Revue Scientifique et Technique de la Défense*, 11–27.

Appriou A. (1999) Multisensor Signal Processing in the Framework of the Theory of Evidence. *Application of Mathematical Signal Processing Techniques to Mission Systems*, 32.

Ash N., Jürgens N., & Leadley P.W. (2009) bioDISCOVERY: Assessing, monitoring and predicting biodiversity change. 44.

Baghdadi N., Boyer N., Todoroff P., El Hajj M., & Bégué A. (2009) Potential of SAR sensors TerraSAR-X, ASAR/ENVISAT and PALSAR/ALOS for monitoring sugarcane crops on Reunion Island. *Remote Sensing of Environment*, **113**, 1724–1738.

Baret F., Hagolle O., Geiger B., Bicheron P., Miras B., Huc M., Berthelot B., Niño F., Weiss M., Samain O., Roujean J.L., & Leroy M. (2007) LAI, fAPAR and fCOVER CYCLOPES global products derived from VEGETATION. Part 1: principles of the algorithm. *Remote Sensing of Environment*, **110**, 275–286.

Batty M. & Xie Y. (1999) Modelling urban dynamics through GIS-based cellular automata. *Computers, Environment and Urban Systems*, **23**, 205–233.

Baudry J., Burel F., Aviron S., Martin M., Ouin A., Pain G., & Thenail C. (2003) Temporal variability of connectivity in agricultural landscapes: do farming activities help? *Landscape ecology*, **18**, 303–314.

Bayes T. (1763) An Essay Toward Solving a Problem in the Doctrine of Chances. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **53**, 370–418.

Berndt D. & Clifford J. (1994) Using Dynamic Time Warping to Find Patterns in Time Series. 359–370.

Berrien M. & Lambin E. (2000) French IGBP-WCRP News Letter. 84.

Betbeder J., Corgne S., Pottier E., Corpetti T., & Hubert-Moy L. (2014a) Multi-temporal optical and radar data fusion for crop monitoring: Application to an intensive agricultural area in Brittany (France). *IGARSS 2014*, A paraître.

Betbeder J., Nabucet J., Pottier E., Baudry J., Corgne S., & Hubert-Moy L. (2014b) Detection and Characterization of Hedgerows Using TerraSAR-X Imagery. *Remote Sensing*, A paraître.

Betbeder J., Rapinel S., Corpetti T., Pottier E., Corgne S., & Hubert-Moy L. (2013) Multi-temporal classification of TerraSAR-X data for wetland vegetation mapping. *SPIE*, Proc. SPIE 8887, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XV,88871B.

Betbeder J., Rapinel S., Corpetti T., Pottier E., Corgne S., & Hubert-Moy L. (2014c) Multitemporal classification of TerraSAR-X data for wetland vegetation mapping. *Journal of Applied Remote Sensing*, **JARS-14007P**, A paraître.

Bloch I. (1996) Information Combination Operators for Data Fusion : A Comparative Review with Classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, **26**, 52–67.

Bloch I. (2003) *Fusion d'informations en traitement du signal et des images.*

Bonny S. (2011) L'agriculture écologiquement intensive : nature et défis. *Cah Agric*, **20**, 451–462.

Bunn A.G. (2005) Observed and predicted responses of plant growth to climate across Canada. *Geophysical Research Letters*, **32**, 1–4.

Casenave A. & Valentin C. (1989) *Les États de Surface de la zone Sahélienne : Influence sur l'infiltration.* Paris.

Chevassus-au-Louis B. & Griffon M. (2007) La nouvelle modernité : une agriculture productive à haute valeur écologique. *Economie et stratégie agricole* pp. 7–48. Club Démeter, Paris.

Chikhaoui M., Bonn F., Merzouk A., Lacaze B., & Mejjati A.M. (2007) Cartographie de la dégradation des sols à l'aide des approches du spectral angle mapper et des indices spectraux en utilisant des données Aster. *Télédétection*, **7**, 343–357.

Cloude S.R. & Pottier E. (1996) A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, **34**, 498–518.

Corgne S. (2004a) Hiérarchisation des facteurs structurant les dynamiques pluriannuelles des sols nus hivernaux. Application au bassin versant du Yar (Bretagne). *Norois*, 17–29.

Corgne S. (2004b) *Modélisation prédictive de l'occupation des sols en contexte agricole intensif : Application à la couverture hivernale par télédétection.* Thèse soutenue à l'Université de Rennes 2, 230 p., Université Rennes 2.

Corgne S. (2005) Gestion de l'incertitude dans un processus de modélisation géographique. *Incertitude, et Environnement: Mesures, Modèles, gestion*, 5.

Corgne S., Betbeder J., Rapinel S., Hubert-Moy L., & Pottier E. (2012a) Dempster- Shafer fusion rule of optical and polarimetric data for winter land cover mapping. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*,

Corgne S., Dallon D., & Mercier G. (2014) Land use and land cover monitoring with multitemporal and multipolarization Radarsat data ; Application to an intensive agricultural area (France). *IGARSS 2014*, A paraître.

Corgne S. & Gruau G. (2006) Pollution du Captage d'Eau Brute de la Retenue de Rophemel par les Matières Organiques: Une Etude du rôle des Apports en provenance du Bassin Versant. 89.

Corgne S., Hubert-Moy L., Barbier J., Mercier G., & Solaiman B. (2002) Follow-up and modeling of the land use in an intensive agricultural watershed in France. *9th International Symposium on Remote Sensing*, 342–351.

Corgne S., Hubert-Moy L., Dezert J., & Mercier G. (2003) Land cover change prediction with a new theory of plausible and paradoxical reasoning. *Fusion 2003 Conference*, 1141–1148.

Corgne S., Hubert-Moy L., Lecerf R., Thomas A., Dusseux P., & Planchon O. (2012b) Observation des changements d'occupation et d'utilisation des sols par télédétection dans le Grand Ouest. *Le climat change dans l'Ouest, Evaluation, Impacts, Perceptions.* pp. 251–264. Rennes, France.

Corgne S., Hubert-Moy L., Mercier G., & Dezert J. (2004) Application of DSmT for land cover change prediction. *Advances and Applications of DSmT for information Fusion* pp. 371–382. Rehoboth, American Research Press.

Corgne S., Magagi R., Yergeau M., & Sylla D. (2010) An integrated approach to hydro-geological lineament mapping of a semi-arid region of West Africa using Radarsat-1 and GIS. *Remote Sensing of Environment*, **114**, 1863–1875.

Corgne S., Pottier E., Mercier G., & Hubert-Moy L. (2012c) Land cover monitoring with Radarsat-2 data in Brittany. *Fist BreTel Workshop, Monitoring of the environment in the framework of the NEREUS working group on GMES*,

Corgne S., Seigne P., Mercier G., & Nabucet J. (2012d) Bare soils extraction anf characterization in an intensive agricultural area with polarimetric data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*,

D'Herbes J.M., Délabre E., & Loireau M. (1995) Bases écologiques pour une spatialisation des données recueillies dans le cadre de l'expérience Hapex-Sahel. *Hydrologie et Météorologie de Méso-échelle dans Hapex-Sahel* pp. 181–207. Paris.

Dabney S.M., Delgado J.A., & Reeves D.W. (2001) Using winter crops to improve soil and water quality. *Commun. Soil Science Plant Annals*, **32**, 1221–1250.

Dallon D. (2013) Suivi multitemporel des changements d'occupation des sols à partir d'images radar. Application à la Beauce à partir de données Radarsat-1. 30.

Daouda S. (2012) *Modélisation spatio-temporelle de la vulnérabilité du milieu à la dégradation des sols en milieu semi-aride à partir de données radar.* Thèse soutenue à l'Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 211 p.

Daouda S., Magagi R., & Corgne S. (2011) Suivi de l'occupation des sols par méthode « orientée-objet » à partir d'images radar en milieu semi aride : Application au sud-ouest du Niger. *32ème Symposium Canadien sur la Télédétection*, 4.

Daughtry C.S.T. (2001) Discriminating crop residues from soil by shortwave infrared reflectance. *Agronomy Journal*, **93**, 125–131.

Dezert J. (2003) Fondations pour une nouvelle théorie du raisonnement plausible et paradoxal. 75.

Dezert J., Wang P., & Tchamova A. (2012) On The Validity of Dempster-Shafer Theory. *15th International Conference on Information Fusion*, 655–660.

Djiknavorian P. (2008) Fusion d'informations dans un cadre de raisonnement de Dezert-Smarandache appliquée sur des rapports de capteurs ESM sous le STANAG 1241. 256.

Dubois D. & Prade H. (1985) *Théorie des Possibilités. Applications à la Représentation des Connaissances en Informatique.* Paris.

Dubois D. & Prade H. (2004) On the use of aggregation operations in information fusion processes. *Fuzzy Sets and Systems*, **142**, 143–161.

Dusseux P., Corgne S., Corpetti T., & Hubert-Moy L. (2011) Use of optical and radar imagery at high spatial resolution for grasslands management identification. *International Symposium on Remote Sensing and GIS methods for Change Detection and Spatio-temporal Modelling*, 72–74.

Dusseux P., Gong X., Corpetti T., Hubert-Moy L., & Corgne S. (2012) Contribution of radar images for grassland management identification. *SPIE*, 853104, 1–4.

Ellis E.C. (2012) The GLOBE Project: accelerating global synthesis of local studies in land change science. .

Etienne L., Planchon O., Quénol H., & Corgne S. (2010) Analyse climatique en Vendée : Application au SAGE de la Vie et Du Jaunay. 70.

Euroconsult (2012) Satellites to be Built & Launched by 2021. .

EUROSTAT (2001) Manual of concepts on land cover and land use information systems. 106.

Favreau G., Cappelaere B., Massuel S., Leblanc M., Boucher M., & Boulain N. (2009) Land clearing, climate variability, and water resources increase in semiarid southwest Niger: A review. *Water Resources Research*, **45**, 1–18.

Fischer G., Shah M., Tubiello F.N., & van Velhuizen H. (2005) Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment. *Phil. Trans. Royal. Soc.*, **360**, 2067–2073.

Foley J.A., DeFries R., Asner G.P., Barford C., Bonan G., Carpenter S.R., Chapin F.S., Coe M.T., Daily G.C., Gibbs H.K., & others (2005) Global consequences of land use. *science*, **309**, 570–574.

Freeman A. & Durden S.L. (1998) A three-component scattering model for polarimetric SAR data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing*, **36**, 963–973.

Galloway J.N., Aber J.D., Erisman J.W., Seitzinger S.P., Howarth R.W., Cowling E.B., & Cosby B.J. (2003) The nitrogen cascade. *BioScience*, **53**, 341–356.

Godfray H.C.., Crute I.R., Haddad L., Lauwrence D., Muir J.F., Nisbett N., Pretty J., Robinson S., Toulmin C., & Whiteley R. (2010) The future of the global food system. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **365**, 2769–2777.

Goetz S.J., Bunn A.G., Fiske G.J., & Houghton R.A. (2005) Satellite-observed photosynthetic trends across boreal North America associated with climate and fire disturbance. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **102**, 13521.

Di Gregorio A. & Jansen L.J.M. (1997) A new concept for land cover classification system. *Proceedings of the Earth Observation and Environmental Information.*, 10.

Di Gregorio A. & Jansen L.J.M. (2005) *Land Cover Classification System. Classification concepts and user manual.* Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, Italia.

Griffon M. (2013) *Qu'est-ce que l'agriculture écologiquement intensive ?* Quae, Paris.

Gruau G., Corgne S., Jardé E., Angée M., & Samson E. (2007) A spatialized approach combining remote sensing techniques, digital elevation model analysis and water quality monitoring to test the influence of land use on the DOM concentration of rivers. *International Symposium on Organic matter dynamics in agro-ecosystems*, 54–55.

Gruau G., Jardé E., Novince E., Birgand F., Panaget T., & Le Roy S. (2004) Pollution des eaux continentales bretonnes par les matières organiques. .

Gutman G., Janetos A.C., Justice C.O., Moran E.F., Mustard J.F., Rindfuss R.R., Skole D., Turner II B.L., & Cochrane M.A. (2004) *Observing, Monitoring and Understanding Trajectories of Change on the Earth's Surface.*

Haberl H., Erb K.H., Krausmann F., Gaube V., Bondeau A., Plutzar C., Gingrich S., Lucht W., & Fischer-Kowalski M. (2007) Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **104**, 12942.

Haralick R.M., Shanmugan K., & Dinstein I. (1973) Textural features for image classification. *IEEE Transaction on Systems; Man and Cybernetics*, **3**, 610–621.

Le Hegarat-Mascle S., Seltz R., Hubert-Moy L., Corgne S., & Stach N. (2006) Performance of change detection using remotely sensed data and evidential fusion: Comparison of three cases of application. *International Journal of Remote Sensing*, **27**, 3515–3532.

Herrault P.A. & Corgne S. (2010) Analyse de l'occupation du sol et du réseau bocager sur le bassin de la Vie, du Jaunay et du Ligneron à partir de données de télédétection. 16.

Houet T. & Gaucherel C. (2007) Simulation dynamique et spatialement explicite d'un paysage agricole bocager : Validation sur un petit bassin versant breton sur la période 1981-1998. *Revue Internationale de Géomatique*, **17**, 491–516.

Houet T., Hubert-Moy L., Corgne S., & Marchand J.-P. (2008) Approche systémique du fonctionnement d'un territoire agricole bocager. *Espace géographique*, **3**, 270–286.

Hubert-Moy L. (2004) *Occupation du sol et télédétection : de l'inventaire à la modélisation prédictive.* Université de Rennes 2, Université de Rennes 2.

Hubert-Moy L., Clement B., Lennon M., Houet T., & Lefeuvre E. (2004) Study of wetlands using CASI hyperspectral images: Application to the valley floors of the Armorican Massif. *Photo-Interprétation*, **39**, 33–43.

Hubert-Moy L., Cotonnec A., Le Du L., Chardin A., & Perez P. (2001) A comparison of classification procedures of remotely sensed data applied on different landscape units. *Remote Sensing of Environment*, **75**, 174–187.

Hubert-Moy L., Quété Y., Billot M., & Corgne S. (2002) Trajectories of land cover-change in intensive agricultural regions: a short-time predictive approach with the Dempster-Shafer Theory. *first International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing images*, 2, 403–414.

Jacquemoud S. & Baret F. (1990) PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, **34**, 75–91.

Jain S.K. & Goel M.K. (2002) Assessing the vulnerability to soil erosion of the Ukai Dam catchments using remote sensing and GIS. *Hydrological Sciences Journal*, **47**, 31–40.

Jardé E., Gruau G., Mansuy-Huault L., Peu P., & Matrinez J. (2007) Using Sterols to Detect Pig Slurry Contribution to Soil Organic Matter. *Water, Air, and Soil Pollution*, **178**, 169–178.

Jukka H. & Aristide V. (1998) Land cover/land use classification of urban areas: a remote sensing approach. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, **12**, 475–489.

Karathanassi V. & Dabboor M. (2004) Land cover classification using ESAR polarimetric data. *Proc. XXth ISPRS Congr. Comm. VII*, 280–285.

Kasperson J.X. & Kasperson R.E. (2001) *Global Environmental Risk - Jeanne X. Kasperson, Roger E. Kasperson - Google Livres.*

Klepeis P. & Turner Ii B.L. (2001) Integrated land history and global change science : the example of the Southern Yucatán Peninsular Region project. *Land Use Policy*, **18**, 27–39.

Lambin E. & Geist H.J. (2006) *Land Use and Land Cover Change. Local Processes and Global Impacts.* Berlin, Germany.

Lambin E.F. & Strahler A.H. (1994) Indicators of land cover change for change vectors analysis in multitemporal space at coarse spatial scale. *International Journal of Remote Sensing*, **15**, 2099–2119.

Lambin E.F., Turner B.L., Geist H.J., Agbola S.B., Angelsen A., Bruce J.W., Coomes O.T., Dirzo R., Fischer G., Folke C., & others (2001) The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global environmental change*, **11**, 261–269.

Langlois A. & Philipps M. (1997) *Automates cellulaires.* Paris, France.

Leblanc M.J., Favreau G., Massuel S., Tweed S.O., Loireau M., & Cappelaere B. (2008) Land clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger. *Global and Planetary Change*, 135–150.

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).* Université Rennes 2, France.

Lecerf R., Hubert-Moy L., Corpetti T., Baret F., & Nicolas H. (2008) Estimating Biophysical Variables at 250 M with Reconstructed EOS/MODIS Time Series to Monitor Fragmented Landscapes. 954–957.

Lee J.S., Grunes M.R., & de Grandi G. (1999) Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **37**, 2363–2373.

Lee J.S., Jurkevich L., Dewaele P., Wambacq P., & Costerlinck A. (1994) Speckle filtering of synthetic aperture radar images: a review. *Remote Sensing Reviews*, **8**, 311–340.

Lee J.S. & Pottier E. (2009) *Polarimetric Radar Imaging.*

Lippe E., de Schmidt J.T., & Glenn-Lewin D.C. (1985) Markov models and succession: a test from a hearthland in the Netherlands. *Journal of Ecology*, **73**, 775–791.

Lobell D.B. & Field C.B. (2007) Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters*, **2**, 7.

Lobell D.B., Field C.B., Cahill K.N., & Bonfils C. (2006) Impacts of future climate change on California perennial crop yields: Model projections with climate and crop uncertainties. *Agricultural and Forest Meteorology*, **141**, 208–218.

Lopez-Sanchez J.M., Cloude S.R., & Ballester-Berman J.D. (2011) Retrieval of rice phenology by means of copolar dual-pol images provided by TerraSar-X. 7 p.

Lüdeke M.K.B., Moldenhauer O., & Petschel-Held G. (1999) Rural poverty driven soil degradation under climate change: the sensitivity of the disposition towards the Sahel Syndrome with respect to climate. *Environmental Modeling and Assessment*, **4**, 315–326.

Mancebo F. (2006) *Développement durable.* Paris.

Martin A. (2005a) Fusion d'informations haut niveau - Application à la classi_fication d'images sonar. *EGC*, 12 p.

Martin A. (2005b) La fusion d'informations. 117.

Mas J.-F., Kolb M., Houet T., Paegelow M., & Camacho Olmedo M.T. (2011) Revue Internationale de Géomatique Éclairer le choix des outils de simulation des changements des modes d'occupation et d'usages des sols. Une approche comparative. *Revue Internationale de Géomatique*, **21**, 405–430.

McNairn H., Duguay C., Brisco B., & Pultz T. (2002) The effect of soil and crop residue characteristics on polarimetric radar response. *Remote sensing of environment*, **80**, 308–320.

Mérot P., Squividant H., Aurousseau P., Hefting M., Burt T., Maitre V., Kruk M., Butturini A., Thenail C., & Viaud V. (2003) Testing a climato-topographic index for predicting wetlands distribution along an European climate gradient. *Ecological Modelling*, **163**, 51–71.

Millennium Ecosystem Assessment (2005) *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis.* The Millennium Ecosystem Assessment series, Washington, DC.

Ministère de l'agriculture (1993) Arrêté du 20 septembre 1993 relatif à la terminologie de l'agriculture. .

Ministère de l'agriculture (2012) Les chiffres de l'agriculture, de l'agroalimentaire, et de la forêt. 42 p.

Ministry of Water Resources (2011) 4th Census of Minor Irrigation Schemes. .

Mücher C.A., Stomph T., & Fresco L. (1993) Proposal for a global land use classification. 37.

Nédélec V., Corgne S., Dubreuil V., & Hubert-Moy L. (2003) Fusion de données de télédétection à l'aide de la théorie des évidences, application au Mato Grosso en vue d'une spatialisation de la déforestation. *anais XI SBSR*, 2107–2019.

Ortiz S., Breidenbach J., Knuth R., & Kandler G. (2012) The Influence of DEM Quality on Mapping Accuracy of Coniferous- and Deciduous-Dominated Forest Using TerraSAR‑X Images. *Remote Sensing*, **4**, 661–681.

Paegelow M., Villa N., Cornez L., Ferraty F., Ferré L., & Sarda P. (2004) Modélisations prospectives de l'occupation du sol. Le cas d'une montagne méditerranéenne. *Cybergeo : European Journal of Geography*, 365.

Pech P. (2007) Développement durable et géographie physique. *L'information géographique*, **71**, 66–78.

Peijun D., Sicong L., Junshi X., & Yindi Z. (2013) Data fusion techniques for change detection from multi-temporal remote sensing images. *Information Fusion*, **14**, 19–27.

Pottier E., Marechal C., Allain-Bailhache S., Meric S., Hubert-Moy L., & Corgne S. (2012) On the use of fully polarimetric Radarsat-2 time-series datasets for delineating and monitoring the seasonal dynamics of wetland ecosystem. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*,

Rapinel S. (2012a) *Contribution de la télédétection à l'évaluation des fonctions des zones humides : De l'observation à la modélisation prospective.* Université de Rennes 2, Rennes, France.

Rapinel S. (2012b) *Contribution de la télédétection à l'évaluation des fonctions des zones humides : De l'observation à la modélisation prospective.* Université de Rennes 2, Rennes, France.

Reenberg A. (2011) *Toolbox options for conceptualizing change in human-environmental systems. Pathways, path dependency, legacies, syndromes and scenarios.* Copenhagen, Danmark.

Richard Y. & Benoit G. (2012) L'eau et la sécurité alimentaire face au changement global : quels défis, quelles solutions ? Contribution au débat international. 76 p.

Rossignol C., Corgne S., & Ruiz L. (2013) Caractérisation de l'occupation et de l'usage des sols en contexte d'agriculture irriguée à partir d'images radar polarimétriques (Radarsat-2) Application au bassin versant du Berambadi en Inde. 45.

Rouchouze C. (1994) Fusion de données : exemple Défense et axes de recherche. *Traitement du Signal*, **11**, 459–464.

Saaty T.L. (1977) A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, **5**, 234–281.

Sahli N. & Moulin B. (2006) Agent-based geo-simulation to support human planning and spatial cognition. 115–132.

Samson E., Matzner E., & Corgne S. (2007) Evaluation statistique du rôle des structures paysagères sur la présence de Matières Organiques dans les eaux superficielles. 38.

Sanders L. (2001) *Modèles en analyse spatiale (Traité IGAT, série aspects fondamentaux de l'analyse spatiale).* Lavoisier, Paris, France.

Santilli M., Moutinho P., Schwartzman S., Nepstad D., Curran L., & Nobre C. (2005) Tropical Deforestation and the Kyoto Protocol. *Climatic Change*, **71**, 267–276.

Sekhar M., Rasmi L., Sivapullaia P.V., & Ruiz L. (2004) Groundwater flow modeling of Gundal sub-basin in Kabini river basin, India. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, **1**, 65–77.

Shafer G. (1976) *A Mathematical Theory of Evidence.* Princeton University Press, Princeton.

Shang J., Vachon P.W., & McNairn H. (2013) Multiyear crop monitoring using polarimetric RADARSAT-2 data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **51**, 2227–2240.

De Sherbinin A. (2002) A CIESIN Thematic Guide to Land-Use and Land-Cover Change (LUCC). 67.

Simone G., Farina A., Morabito F.., Serpico S.B., & Bruzzone L. (2002) Image fusion techniques for remote sensing applications. *Information Fusion*, **3**, 3–15.

Smarandache F. & Dezert J. (2009) *Advances and Applications of DSmT for Information Fusion.* Collected Works, Ann Arbor, U.S.A.

Smets P. (1990) The combination of evidence in the transferable belief model. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **12**, 447–458.

Steffan-Dewenter I., Kessler M., Barkmann J., Bos M.M., Buchori D., Erasmi S., Faust H., Gerold G., Glenk K., Gradstein S.R., & others (2007) Tradeoffs between income, biodiversity, and ecosystem functioning during tropical rainforest conversion and agroforestry intensification. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **104**, 4973–4979.

Tacnet J.M., Batton-Hubert M., & Dezert J. (2009) Information fusion for natural hazards in mountains. *Advances and Applications of DSmT for information Fusion* pp. 565–660. ARP, American Research Press, USA.

Takada M., Mishima Y., & Natsume S. (2009) Estimation of surface soil properties in peatland using ALOS/PALSAR. *Landscape and Ecological Engineering*, **5**, 45–58.

Thenail C. & Baudry J. (2001) Modélisation des systèmes techniques agricoles contribuant aux dynamiques des structures paysagères: de la parcelle à l'exploitation agricole et au paysage. *Etude des changements d'utilisation et d'occupation du sol par télédétection: échelles et modèles*, 16–24.

Thériault M., Sparfel L., Gourmelon F., & Le Berre I. (2011) Modélisation des changements d'occupation et d'utilisation du sol : Cadres formels et exemple d'application. *Revue Internationale de Géomatique*, **21**, 267–295.

Thomas A., Corgne S., Planchon O., Bonnefoy C., Quénol H., & Lecerf R. (2012) Phenological monitoring of vine using MODIS imagery in the vineyard of Saumur-Angers (Loire Valley area, France). *EGU*, 9274.

Tissot C. & Cuq F. (2005) Modélisation spatio-temporelle d'activités humaines à fort impact environnemental. *Cybergéo : Revue européenne de géographie*, 14.

Tissot C., Le Tixerant M., & Rouan M. (2005) Le simulateur DAHU : une plateforme de modélisation des activités humaines en zone côtière. *Norois*, **196**, 125–135.

Touzi R., Goze S., Le Toan T., & Lopes A. (1992) Polarimetric discriminators for SAR images. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, **30**, 973–980.

Turner B.L., Kasperson R.E., Matson P.A., McCarthy J.J., Corell R.W., Christensen L., Eckley N., Kasperson J.X., Luers A., Martello M.L., & others (2003) A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **100**, 8074–8079.

Turner B.L., Lambin E., & Reenberg A. (2007) The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *The National Academy of Sciences of the USA*, **104**, 38.

Ulaby F.T. & Elachi C. (1990) *Radar Polarimetry for Geoscience Applications.* Artech House, Inc., Dedham, Massachusetts.

Vannier C. (2011) *Observation et modélisation spatiale de pratiques agricoles territorialisées à partir de données de télédétection : Application au paysage bocager.* Rennes 2, Rennes, France.

Verhoef W. (1984) Light scattering by leaf layers with applications to canopy reflectance modelling: The SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, **16**, 125–141.

Vermote E.F. & El Saleous N.Z. (2002) Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results. *Remote Sensing of Environment*, **83**, 97–111.

Vigneau-Loustau L. & Huyghe C. (2008) *Stratégies Fourragères.* Paris, France.

Yager R.R., Kacprzik J., & Fedrizzi M. (1994) *Advances in the Dempster-Shafer theory of evidence.* NY, USA.

Ya-Qiu Jin & Fei Chen (2002) Polarimetric scattering indexes and information entropy of the SAR imagery for surface monitoring. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **40**, 2502–2506.

Zadeh L.A. (1978) Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, **1**, 3–28.

Zadeh L.A. (1979) On the Validity of Dempster's Rule of Combination of Evidence. *Electronics Research Laboratory*, **Memorandum UCB/ERL-M**, 24 p.

Zambon M., Lawrence R., Bunn A., & Powell S. (2006) Effect of Alternative Splitting Rules on Image Processing Using Classification Tree Analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **72**, 25–30.

Zhang J. (2010) Multi-source remote sensing data fusion: status and trends. *International Journal of Image and Data Fusion*, **1**, 5–24.

Van Zyl J. (1990) Calibration of polarimetric radar images using only image parameters and trihedral corner reflector responses. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **28**, 337–348.

FIGURES

Figure 1- Schéma conceptuel du système « Changements d'occupation et d'usage des sols » (Turner *et al.*, 2007) 12

Figure 2- Description des différents niveaux de modélisation des changements d'occupation et d'usage des sols 15

Figure 3- Prise en compte de l'incertitude dans un processus de modélisation d'un phénomène (Corgne, 2004) 19

Figure 4- Les règles de fusion utilisées en fonction du type d'information 22

Figure 5- Représentation générale d'un processus de fusion d'informations (d'après Martin, 2005b) 23

Figure 6- Représentation des différents niveaux de fusion d'information sur une problématique environnementale 24

Figure 7- Positionnement de mes recherches et méthodologies privilégiées pour l'étude des changements d'occupation et d'usage des sols sur les territoires agricoles. 26

Figure 8- Localisation des programmes de recherche internationaux (depuis 2010) 29

Figure 9- Echelles spatiales et facteurs de changements de l'occupation du sol (Corgne, 2004) 31

Figure 10- Dynamiques temporelles des changements d'occupation du sol pendant l'hiver (Corgne, 2004) 32

Figure 11- Nombre de satellites civil d'observation de la terre lancés depuis 1972 (source : Université de Twente) 33

Figure 12- Nombre de satellites civil Radar lancés depuis 1978 (source : Université de Twente) 33

Figure 13- Différentes pratiques culturales sur les sols nus durant la période hivernale (Bretagne) 38

Figure 14- Méthodologie de traitement de l'image polarimétrique Radarsat-2 39

Figure 15- Transformation des variables polarimétriques en mode vecteur 40

Figure 16- Composition colorée à partir des paramètres polarimétriques de Freeman-Durden (Radarsat-2, 10 février 2011) 41

Figure 17- ACP des 9 variables polarimétriques les plus explicatives pour les classes sol nu et sol couvert 43

Figure 18- ACP des 9 variables polarimétriques les plus explicatives pour les sols nus avec des surfaces «lisses » et « rugueuses » 45

Figure 19- Caractérisation des sols nus sur le bassin versant du Yar (Radarsat-2, 10 février 2011) 46

Figure 20- Localisation du site d'étude sur l'image ALOS AVNIR à gauche et Radarsat-2 à droite 48

Figure 21- Méthodologie de classification par fusion de données radar et optiques : application à la couverture hivernale des sols sur la ZA Armorique 49

Figure 22- Affectation floue des fonctions de masse pour la variable « Entropie » 49

Figure 23- Mesures d'incertitude dans le cadre de la théorie de Dempster-Shafer 50

Figure 24- Cartes de croyance pour les hypothèses « sol nu » et « sol couvert » 52

Figure 25- Spatialisation de l'incertitude associée aux hypothèses « sol nu » et « sol couvert » 53

Figure 26- Méthodologie de traitements des images Radarsat-2 pour la caractérisation de l'occupation des sols sur le bassin versant du Yar (2011) 56

Figure 27- Evolution moyenne des σ° pour 6 classes d'occupation des sols entre mai et aout 2011 (Rossignol, 2011) 57

Figure 28- Evolution temporelle des σ° en fonction de différents types d'occupation et d'usage des sols 58

Figure 29- Classifications supervisées à partir d'images radar (Rossignol, 2011) 60

Figure 30- Localisation du marais de Sougéal (Betbeder et al., 2013) 62

Figure 31- Suivi multi temporel de l'occupation des sols au sein de la zone humide de Sougéal avec les polarisations HH et VV (Betbeder et al., 2013) 64

Figure 32- Suivi multitemporel de l'occupation des sols sur le marais de Sougéal avec l'entropie de Shannon (Betbeder et al., 2013) 64

Figure 33- Localisation du site d'étude au Niger (Daouda, 2012) 66

Figure 34- Occupation du sol sur le site d'étude au Niger (Octobre 2010) 67

Figure 35- Méthodologie de classification orientée objet des images radar 68

Figure 36- Occurrences des sols nus durant la saison des pluies (Daouda, 2012) 70

Figure 37- Organigramme méthodologique du processus de modélisation de désertification des sols 73

Figure 38- Relations spatiales entre et les occurrences de sol nu (1993-2009) et l'échantillonnage terrain (2009) 74

Figure 39- Relations spatiales entre l'intensification agricole et les parcelles échantillonnées sur le terrain (2009) 74

Figure 40- Résultats de la modélisation de la dégradation des sols en milieu semi-aride (Daouda, 2012) 77

Figure 41- Présentation du réseau de sous-BV du GEPMO en Bretagne 82

Figure 42- Exemple de digitalisation du linéaire bocager à partir d'une photographie aérienne 83

Figure 43- Méthodologie du suivi de l'évolution de l'occupation du sol sur les bassins versants du GEPMO à partir de données de télédétection (Corgne et Gruau, 2006) 85

Figure 44- Méthodologie d'analyse des interactions entre la pollution de l'eau par les MO et les territoires agricoles 86

Figure 45- Présentation des sous-BV dépassant la limite réglementaire de COD de 7.5 mg/L (a: Moyenne sur la période étudiée; b : teneurs en crue; c: teneurs hors crue) 88

Figure 46- ACP (axes 1 et 2) présentant les caractéristiques des territoires agricoles étudiés sur l'ensemble des sous-BV du GEPMO (Samson, 2007) 89

Figure 47- Localisation de la zone d'étude (le Grand Ouest) et des sites d'étude (Corgne et al., 2012) 94

Figure 48- Représentation graphique des métriques temporelles annuelles calculées à partir des valeurs de Fcover dérivées des images MODIS (Corgne et al., 2012) 96

Figure 49- Evolution de la fraction de couverture végétale (fCOVER) sur l'ensemble du Grand-Ouest de mars 2000 à mars 2011 (Corgne et al., 2012) 97

Figure 50- Date de fin de croissance de la végétation vue par MODIS sur le Grand-Ouest de 2001 à 2010 (Corgne et al., 2012) 97

Figure 51- Evolution de la fraction de couverture végétale (fCOVER) sur le bassin-versant du Yar de mars 2000 à octobre 2011 (Corgne et al., 2012) 99

Figure 52- Evolution de la fraction de couverture végétale (fCOVER) sur le bassin-versant Vie-Jaunay de mars 2000 à mars 2011 (Corgne et al., 2012) 100

Figure 53- Discrimination des trois modes de gestion des prairies sur le bassin versant du Yar selon les profils moyens de LAI et de fCOVER calculés sur toutes les prairies du bassin versant pour l'année 2010 (Corgne et al., 2012) 101

Figure 54- Localisation du bassin versant du Berambadi (Rossignol, 2013) 104

Figure 55- Occupation du sol sur le bassin du Berambadi (Janvier 2013) 106

Figure 56- Phénologie de la vigne dans l'hémisphère nord (Quénol, 2012) 108

Figure 57- Cartographie de l'évolution estivale de la couverture végétale de 2000 à 2010, sur le site de Saumur-Angers (Corgne et al., 2012) 110

Figure 58- Evolution de la fraction de couverture végétale (fCOVER) sur le site de Saumur-Angers de mars 2000 à mars 2011 (Thomas et al., 2012) 110

Figure 59- Stades phénologiques de la vigne mesurées sur le terrain et le capteur MODIS (Thomas et al., 2012) 111

Figure 60- Localisation du site d'étude en Argentine pour le suivi phénologique du Vignoble (Programme Pléaides) 113

Figure 61- Représentation des 3 mécanismes de diffusion sur un territoire agricole 137

TABLEAUX

Tableau 1- Différents types d'imperfection associés à une information 20

Tableau 2- Caractéristiques générales des trois principales règles de fusion d'information 25

Tableau 3- Caractéristiques de l'image Radarsat-2 37

Tableau 4- Variables explicatives pour les classes sol nu et sol couvert 42

Tableau 5- Matrice de confusion pour la classification de l'image Radarsat-2 du 10 février 2011 43

Tableau 6- Surface et pourcentage de la couverture hivernale des sols à l'échelle du bassin versant du Yar et sa SAU (10 février 2011) 43

Tableau 7- Variables explicatives pour les sols nus avec des surfaces « lisses » et « rugueuses » 44

Tableau 8- Surface et pourcentage des sols nus « lisses » et « rugueux » sur le bassin versant du Yar (10 février 2011) 45

Tableau 9- Mesures de croyance pour les hypothèses « sol nu » et « sol couvert » 52

Tableau 10- Matrice de confusion pour la classification de la couverture hivernale des sols (mars 2010) 52

Tableau 11- Quantification de l'incertitude pour les hypothèses « sol nu » et « sol couvert » 53

Tableau 12- Caractéristiques des images Radarsat-2 SLC (Rossignol, 2011) 55

Tableau 13- Série temporelle TerraSar-X sur le marais de Sougéal (2012) 62

Tableau 14- Indices de Kappa des classifications multi-temporelles sur le marais de Sougéal en 2012 (Betbeder et al., 2013) 65

Tableau 15- Occurrences de sol nu durant la saison des pluies (Daouda, 2012) 68

Tableau 16- Affectation des fonctions de masse pour chaque hypothèse 75

Tableau 17- Probabilités pignistiques pour les hypothèses « Vulnérabilité des sols à la dégradation » et « non Vulnérabilité des sols à la dégradation » (%) 78

Tableau 18- Niveaux de conflit entre les sources d'information visant à modéliser la vulnérabilité des sols à la dégradation 78

Tableau 19- Prise de décision entre les hypothèses "Vulnérabilité des sols à la dégradation" et "Non vulnérabilité des sols à la dégradation" 79

Tableau 20- Validation du processus de modélisation de la vulnérabilité des sols 79

Tableau 21- Images satellitaires utilisées pour déterminer l'évolution de l'occupation du sol sur un bassin versant du GEPMO (ex. de la Haute-Rance) 83

Tableau 22- Présentation des variables extraites sur l'ensemble des sous-BV du GEPMO 87

Tableau 23- Hiérarchisation des variables explicatives pour chaque teneur en COD et Coefficient de détermination associé 90

Tableau 24- Présentation des différents types de culture et de leur cycle phénologique sur le bassin versant du Berambadi 105

Tableau 25- Présentation des images radar acquises en 2012 sur le bassin versant du Berambadi (Source : CLS-VIGISAT©)..... 106

Tableau 26- Principes généraux des paramètres issus des décompositions de Freeman-Durden et de Cloude-Pottier..... 135

Tableau 27- Présentation de quelques discriminateurs polarimétriques 135

ANNEXE: BASES DE LA POLARIMETRIE RADAR

Les bases physiques de la polarimétrie radar pouvant être consultées dans (Lee & Pottier, 2009), nous présentons ici succinctement les bases fondamentales de la polarimétrie radar et leur intérêt pour l'étude des changements d'occupation et d'usage des sols. La polarimétrie radar repose en effet sur des concepts mathématiques et physiques complexes qui sont généralement développés par des spécialistes en traitement du signal ou en télécommunication. Les géographes sont pour cela encore peu nombreux à exploiter cette source d'information. Cependant, les applications en polarimétrie sont nombreuses : Hydrologie, glaciologie, foresterie, géologie…(Lee & Pottier, 2009) et sur la thématique des changements d'occupation des sols, de nombreux travaux existent (Baghdadi et al., 2009b; Corgne et al., 2010, 2012a; Karathanassi and Dabboor, 2004; Lopez-Sanchez et al., 2011; Ortiz et al., 2012; Shang et al., 2013; Takada et al., 2009; Ya-Qiu Jin and Fei Chen, 2002…).

La spécificité d'un radar pleinement polarimétrique est d'émettre des ondes en polarisation H (horizontal) et V (vertical) simultanément et de recevoir l'énergie rétrodiffusée dans les mêmes polarisations. Contrairement au radar mono polarisation, on peut extraire (dans le cas des satellites radar pleinement polarimétrique) les quatre polarisations HH, VV, VH et HV dont on mesure l'amplitude (A) et la phase ϕ qui exprime la position instantanée de l'onde. Les composantes H et V constituent donc un ensemble permettant de représenter complètement l'onde électromagnétique et son état de polarisation. L'ellipse de polarisation décrivant cela, la polarisation est dite linéaire si H et V ont la même phase et même amplitude, en ellipse si la phase et l'amplitude sont différentes et circulaire dans le cas particulier d'une différence de phase de 90°. Les propriétés de diffusion d'un objet sont contenues en totalité dans la matrice de diffusion [S] qui correspond à une matrice 2*2 complexe qui décrit comment la diffusion transforme le champ électrique de l'onde incidente. Elle s'écrit de la façon suivante :

$$\begin{bmatrix} E_h^s \\ E_v^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{vh} \\ S_{hv} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_h^i \\ E_v^i \end{bmatrix}$$

Avec :

- Ei= onde incidente ; Es= onde rétrodiffusée et [ ] = vecteur

Les 4 composantes de la matrice sont des nombres complexes (I : In Phase et Q : Quadrature), calculés à partir des amplitudes et des phases des canaux polarisés.

Le vecteur $\begin{bmatrix} E_h^i \\ E_v^i \end{bmatrix}$ permet à partir du calcul de la matrice, de calculer l'amplitude et la polarisation de l'onde diffusée. L'hypothèse de réciprocité, généralement vérifiée pour les cibles naturelles, permet de déduire que Shv = Svh. La matrice est donc réduite à 5 quantités indépendantes (van Zyl, 1990), correspondant aux les amplitudes Svv ,Shv ,Shh et aux deux phases relatives ϕ_c et ϕ_x où $\phi_c = \phi_{vv} - \phi_{hh}$ et $\phi_x = \phi_{hv} - \phi_{hh}$

La matrice de diffusion permet ainsi de synthétiser toutes les polarisations transmises et reçues, de déterminer les polarisations les plus pertinentes selon la problématique étudiée et surtout d'étudier les propriétés de diffusion des objets géographiques. Ce dernier aspect est réalisé à travers la vectorisation de la matrice de diffusion [S] qui permet d'obtenir différentes

matrices (matrice de covariance C ; matrice de cohérence T…) à partir desquelles de nombreux modèles de décomposition polarimétrique ont été développés (Lee & Pottier, 2009). On peut citer ici la décomposition de Freeman-Durden (Freeman & Durden, 1998), de Cloude-Pottier (Cloude & Pottier, 1996) qui permettent d'extraire les différents mécanismes de diffusion d'un pixel d'une image après filtrage polarimétrique (**Tableau 26**).

Tableau 26- Principes généraux des paramètres issus des décompositions de Freeman-Durden et de Cloude-Pottier

	Freeman-Durden	**Cloude-Pottier**
Principe	Séparation des mécanismes de diffusion à partir d'un modèle physique basé sur la matrice de cohérence T	Décomposition en valeur propre de la matrice de covariance C
Paramètres polarimétriques	**Surface** = Diffusion de surface correspondant aux surfaces planes ou peu rugueuses. Ex : sol nu **Double** = Diffusion dite en double rebond caractéristique d'une interaction de l'onde incidente entre une surface plane et un objet vertical. Ex : Bâtiment, arbre… **Volume** = Diffusion dite de volume lié à une diffusion aléatoire. Ex : Forêt	**Entropie (H)** : caractère aléatoire de la diffusion. Si H=0 alors il y a un seul mécanisme de diffusion (Ex : surface en eau) ; Si H =1 alors plusieurs mécanismes de diffusion sont présents (dépolarisation du signal) (Ex : Forêt) **Anisotropie (A)** : caractérise le niveau de mélange entre le 2ème et 3ème mécanisme de diffusion. Si A=0, alors les deux mécanismes sont mélangés dans des proportions égales, Si A = 1, alors le 2ème mécanisme domine **L'angle α** indique le mécanisme de diffusion moyen ou dominant. Si α = 0° alors on a une diffusion de surface. Si α = 45° alors on a une diffusion dipolaire ou par un volume. Si α = 90° alors on a une diffusion par un dièdre ou des réflexions multiples

Outre ces paramètres, de nombreux discriminateurs peuvent être extraits pour caractériser la surface étudiée (Touzi et al., 1992). Basés sur la synthèse polarimétrique de chaque pixel, ils permettent d'exploiter la richesse de l'information polarimétrique (**Tableau 27**).

Tableau 27- Présentation de quelques discriminateurs polarimétriques

Discriminateurs polarimétriques	**Interprétation et intérêt**
Différence de phase co-polarisée	Elle représente la différence de phase entre les canaux HH et VV (compris entre 0 et 180°) -autour de 0°, le signal est caractérisé par un seul mécanisme de diffusion (sol nu, océan…)

	-autour de 180°, le signal est caractérisé par une diffusion de type double rebond (bâtiment, haie…) -entre -180° et 0°, la diffusion est aléatoire (végétation)
Puissance totale (SPAN)	Correspondant à la puissance totale dans les 4 canaux d'un pixel
Ratio co-polarisé $\frac{\langle \lvert S_{hh} \rvert^2 \rangle}{\langle \lvert S_{vv} \rvert^2 \rangle}$	Mesure la rugosité de surface. Faible pour une surface lisse (autour de 0), il tend vers 1 pour une diffusion de volume et est supérieur à 1 pour une diffusion double
Coefficient de corrélation co-polarisé $\frac{\langle S_{hh} S^* {}_{vv} \rangle}{\sqrt{\langle \lvert S_{hh} \rvert^2 \rangle \langle \lvert S_{vv} \rvert^2 \rangle}}$	Mesure le degré de dépolarisation d'une cible. Forte amplitude et faible différence de phase pour un sol nu (pas ou peu de dépolarisation). Faible amplitude et différence de phase variable pour de la végétation (forte dépolarisation). Différence de phase très forte (proche de 180°) pour une cible caractérisée par une diffusion double
Ratio d'intensité co-polarisée (HH/VV)	Mesure de rugosité de surface (≤ 1) pour une diffusion de surface
Etc.	

L'interprétation de toutes ces variables polarimétriques va dépendre de plusieurs facteurs (Ulaby & Elachi, 1990):

- **La rugosité.** Dépendante de la longueur d'onde λ et de l'angle d'incidence θ, elle est déterminée de la façon suivante :
  Si S (écart-type des hauteurs de surface) < $\lambda / 32 \cos\theta$ alors, la surface étudiée est considérée comme lisse (Ulaby & Elachi, 1990). Plus simplement, on considère une surface comme « rugueuse » si les variations en hauteur de la surface étudiée sont plus grandes que la longueur d'onde utilisée. Par exemple, une parcelle en sol nu observée en bande C (4 cm) apparaitra rugueuse si les variations de surface sont supérieures à 10 cm (ex : labour profond) et lisse dans le cas contraire. Dans ce cas-là, il y a une réflexion plus diffuse pour une surface rugueuse et spéculaire pour une surface lisse.
- **L'humidité.** Le taux d'humidité des surfaces observées modifie les intensités rétrodiffusées. Ainsi, généralement, la réflectivité augmente avec le taux d'humidité contenu dans les sols ou les végétaux.

Les paramètres du capteur apparaissent donc fondamentaux à connaitre pour interpréter une image radar. La fréquence utilisée conditionne la profondeur de pénétration de l'onde au sein de la végétation et dans le sol, détermine sa sensibilité à la rugosité, à l'humidité… Les polarisations en V sont généralement plus sensibles aux structures verticales de la végétation alors que la polarisation en H va pénétrer plus profondément dans le sol. Enfin, les angles d'incidence ont un impact direct sur les intensités qui vont décroitre plus celui–ci est important. Un grand angle d'incidence sera par ailleurs plus sensible à la végétation et les surfaces étudiées apparaissent plus rugueuses.

Des campagnes de terrain doivent ainsi être réalisées au plus proche de la date d'acquisition des images afin de connaitre les conditions de surface sur le site d'étude. La **Figure 61 Erreur ! Source du renvoi introuvable.** illustre les trois principaux types de diffusion que l'on peut trouver sur un territoire agricole. La diffusion de surface est très liée aux paramètres du sol (rugosité, humidité, résidus de cultures…) et correspond généralement à des surfaces plus ou moins planes. Sur un territoire agricole, elle peut correspondre par exemple à une parcelle en sol nu. La diffusion en double rebond va dépendre des paramètres géométriques de l'acquisition de l'image (mode ascendant ou descendant, acquisition latérale gauche ou droite, angle d'incidence…). Sur un territoire agricole, le double rebond peut correspondre par exemple au linéaire bocager, l'intensité rétrodiffusée étant alors maximale. Enfin, la diffusion de volume caractérise des diffusions multiples que l'on retrouve sur les espaces boisés.

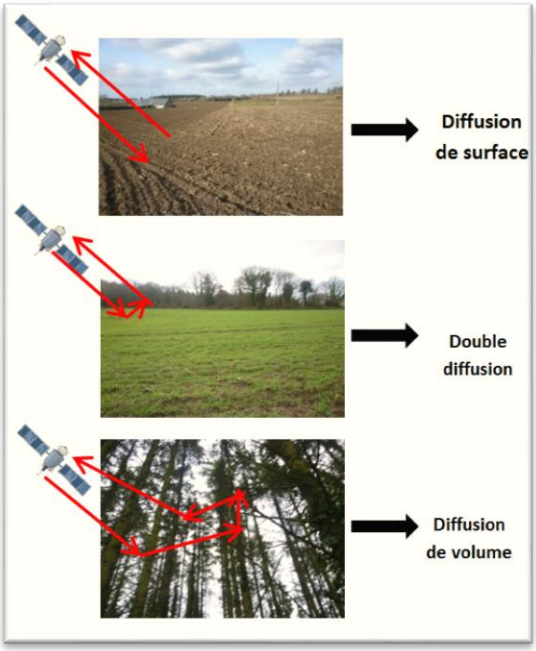


Figure 61- Représentation des 3 mécanismes de diffusion sur un territoire agricole