



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Discipline ou spécialité :

Agrosystèmes, Écosystèmes et Environnement

Présentée et soutenue par :

M. ANTOINE ROUMIGUIE

le vendredi 22 avril 2016

Titre :

DEVELOPPEMENT ET VALIDATION D'UN INDICE DE PRODUCTION
DES PRAIRIES BASE SUR L'UTILISATION DE SERIES TEMPORELLES
DE DONNEES SATELLITAIRES - APPLICATION A UN PRODUIT
D'ASSURANCE EN FRANCE

Ecole doctorale :

Sciences Ecologiques, Vétérinaires, Agronomiques et Bioingénieries (SEVAB)

Unité de recherche :

Laboratoire Dynamique Forestière dans l'Espace Rural (DYNAFOR)

Directeur(s) de Thèse :

M. JEAN DAYDE

MME ANNE JACQUIN

Rapporteurs :

Mme DOMINIQUE COURAULT, INRA AVIGNON

M. SYLVAIN PLANTUREUX, UNIVERSITE DE LORRAINE

Membre(s) du jury :

M. BRUNO BOUCHARD, UNIVERSITE PARIS 9, Président

M. JEAN DAYDE, EI PURPAN, Membre

Mme ANNE JACQUIN, EI PURPAN, Membre

Mme FRANCOISE RUGET, INRA AVIGNON, Membre

M. PIERRE-VINCENT PROTIN, ARVALIS LA JAILLIERE, Membre

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes directeurs de thèse Jean Daydé et Anne Jacquin. Ils ont tous deux parfaitement rempli leur rôle d'encadrement et d'accompagnement durant la thèse.

J'ai une reconnaissance particulière pour Anne. Un grand "merci" pour cette aide tout au long de la thèse, merci également pour cette collaboration qui s'est déroulée de la meilleure des façons. Ce fût un plaisir de travailler à tes côtés durant ces années. J'ai eu la chance de bénéficier de cet encadrement, savant mélange d'efficacité et de convivialité.

Un grand merci à l'Ecole d'Ingénieurs de Purpan et aux membres du laboratoire de Télédétection : Véronique Chéret, Sylvie Duthoit et Jean-Philippe Denux. Je remercie les personnes de l'UMR Dynafor, tout particulièrement mes interlocuteurs privilégiés : Sylvie Ladet, Michel Goulard et Marc Deconchat.

Je souhaite remercier également Grégoire Sigel et Hervé Poilvé pour leur disponibilité, leurs précieux conseils et leur bienveillance. J'ai particulièrement apprécié leur intégrité durant les travaux de thèse et leur volonté permanente d'améliorer la solution proposée par Airbus D&S. Aussi, je remercie Florence Baillarin, Théophile Habimana et toutes les personnes d'Airbus Defence & Space, qui m'ont fait confiance et avec qui j'ai pu travailler durant ces années.

Je remercie les équipes de Pacifica, tout particulièrement Bruno Lepoivre, Constance Collin et François Rosenberg. Cette collaboration fut très constructive et nos rencontres m'ont souvent permis d'avancer et d'apprendre. J'ai très sincèrement apprécié la qualité de nos relations.

Je remercie l'ensemble des membres du jury de thèse, notamment les rapporteurs, Dominique Courault et Sylvain Plantureux pour avoir accepté d'évaluer mon travail.

Je remercie toutes les personnes avec qui j'ai pu travailler durant la thèse et qui m'ont toujours été d'une aide importante : Bruno Bouchard, Olivier Hagolle, Françoise Ruget, Pierre-Vincent Protin et Anton Vrieling.

Enfin je tiens à remercier l'ensemble des doctorants de l'EIP et de Dynafor avec une attention toute particulière pour mes collègues de bureau Caroline et Emmanuelle. C'était une chance et un vrai plaisir de partager notre espace de vie durant ces années. Le fait de cohabiter avec la "Meilleure coloc de bureau" 2012/2016 et une future élèveuse de Highland (qui ne le sait pas !) est tout de même une sacrée expérience à vivre... Merci à vous deux, c'était "glop"!

Remerciements

Un dernier mot pour ceux qui me sont indispensables et qui m'ont entouré toutes ces années...
Ces quelques lignes seront trop maigres pour tout dire mais suffiront à rappeler ce que l'on sait déjà!

Merci à mes amis!

Un grand merci à ma famille, tout particulièrement mes parents et mes frères pour ce qu'ils m'apportent au quotidien.

Et enfin, merci à toi Charlotte...

Liste des abréviations

AVHRR : "Advanced Very High Resolution Radiometer"
BRDF : "Bidirectional Reflectance Distribution Function"
Ca : Calcium
CEOS : "Committee on Earth Observation Satellites"
CLC : "Corine Land Cover"
CNES : Centre National d'Etudes Spatiales
CO₂ : Dioxyde de carbone
EARS : "Environmental Analysis and Remote Sensing"
ECGM : "EARS Crop Growth Model"
ESA : "European Space Agency"
ESU : "Elementary Sampling Unit"
EWBMS : "Energy and Water Balance Monitoring System"
fAPAR : "Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation"
fCover : "Fraction of Vegetation Cover"
FNGCA : Fonds National de Garantie des Calamités Agricoles
FNGRA : Fonds National de Garantie des Risques Agricoles
FPI : "Forage Production Index"
FR : "Forage Regions" (régions fourragères)
GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GPS : "Global Positioning System"
HR : Haute Résolution spatiale
IBI : "Index- Based Insurance"
IDELE : Institut de l'Elevage
IGN : Institut Géographique National
INRA : Institut National de la Recherche Agronomique
IPF : Indice de Production Fourragère
ISOP : Information et suivi objectif des prairies
K : Potassium
LAI : "Leaf Area Index"
LOWTRAN : "Low Resolution Transmission"

Liste des abréviations

LPV : "Land Product Validation"
MERIS : "MEdium Resolution Imaging Spectrometer"
Mg : Magnésium
MODIS : "Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer"
MR : Moyenne Résolution spatiale
MVC : "Maximum Value Composite"
N : Azote
NASA : "National Aeronautics and Space Administration"
NDVI : "Normalized Vegetation Index"
NOAA : "National Oceanic and Atmospheric Administration"
OS : Occupation du Sol
P : Phosphore
PAC : Politique Agricole Commune
PAR : "Photosynthetically Active Radiation"
PMW : "Passive Micro-Wave"
PROSPECT : "Model of leaf optical Properties Spectra"
RPG : Registre Parcellaire Graphique
SAIL : "Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves"
SAFRAN : Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige
SBI : "Satellite-Based Insurance"
SCEES : Service central des Enquêtes et Études statistiques
SPOT : Satellite Pour l'Observation de la Terre
SRMSE : "Standardized Root Mean Square Error" (erreur moyenne quadratique standardisée)
SSP : Service de la Statistique et de la Prospective
STH : Surface Toujours en Herbe
STICS : Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard
TIR : "Thermal Infra-Red"
TOA : "Top Of Atmosphere"
UF : Unité Fourragère
USGS : "United States Geological Survey"
UT : Unité de Traitement
VALERI : "Validation of Land European Remote Sensing Instruments"

Sommaire

REMERCIEMENTS	2
LISTE DES ABREVIATIONS	4
SOMMAIRE.....	6
LISTES DE PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS.....	10
INTRODUCTION	13
PREMIERE PARTIE	16
1. CHAPITRE 1 : CONTEXTE, DEMARCHE ET OBJECTIFS DE LA THESE	17
1.1. Les prairies : un écosystème vulnérable au phénomène de sécheresse.....	17
1.1.1. Définition et typologie des prairies	17
1.1.2. La fonction de production de biomasse.....	18
1.1.3. Une ressource centrale dans le système fourrager.....	19
1.1.4. Une ressource fourragère hétérogène dans le temps et dans l'espace	19
1.1.5. Impact des sécheresses sur les prairies	22
1.2. Synthèse des stratégies existantes de gestion du risque de sécheresse	27
1.2.1. La stratégie d'assumption	28
1.2.2. Solutions externes à l'exploitation.....	30
1.2.3. La stratégie de transfert vers des assurances privées	32
1.2.4. Le produit d'assurance indiciaire des fourrages de Pacifica	43
1.3. Objectifs et structure de la thèse	54
DEUXIEME PARTIE	59
2. CHAPITRE 2 : SITES D'ETUDE ET DONNEES	60
2.1. Sites d'étude et données : validation de l'indice de production fourragère produit à partir de données satellitaires haute résolution spatiale	60
2.1.1. Sites d'étude.....	60
2.1.2. Données de production fourragère.....	66
2.1.3. Données satellitaires	69
2.1.4. Bilan des acquisitions terrain et satellitaires	70
2.1.5. Données météorologiques.....	74

Sommaire

2.2. Sites d'étude et données : validation de l'indice de production fourragère produit à partir de données satellitaires à moyenne résolution spatiale.....	75
2.2.1. Sites d'étude et données pour la comparaison directe de l'IPF mesuré à moyenne résolution spatiale avec des mesures de biomasse au champ	75
2.2.2. Sites d'étude et données pour la comparaison indirecte de l'IPF mesuré à moyenne résolution spatiale avec l'IPF mesuré à haute résolution spatiale.....	82
2.3. Sites d'étude et données : proposition d'une nouvelle modalité de calcul de l'indice de production fourragère	87
2.3.1. Sites d'étude.....	88
2.3.2. Données satellitaires et climatiques pour le développement des modèles	91
2.3.3. Données d'estimation de production des prairies pour la validation	93
TROISIEME PARTIE.....	97
3. CHAPITRE 3 : VALIDATION DE L'INDICE DE PRODUCTION FOURRAGERE PRODUIT A HAUTE RESOLUTION SPATIALE	98
3.1. Introduction	101
3.2. Methodology	105
3.2.1. Experimental sites.....	105
3.2.2. Remote sensing data and processing.....	106
3.2.3. Biomass field measurements and Spatial sampling strategy.....	109
3.2.4. Meteorological data.....	109
3.2.5. Statistical analysis	110
3.3. Results	111
3.4. Discussions.....	115
3.4.1. Interest of the fCover as a vegetation estimate for SBI.....	115
3.4.2. Discrepancies between biomass estimate methods.....	115
3.4.3. Evolution of FPI computation	116
3.5. Conclusions and perspectives.....	118
4. CHAPITRE 4 : VALIDATION DE L'INDICE DE PRODUCTION FOURRAGERE PRODUIT A MOYENNE RESOLUTION SPATIALE	120
4.1. Introduction	124
4.2. FPI processing methodology	127
4.2.1. Direct comparison of field measurements and MR product.....	131

Sommaire

4.2.2. <i>Indirect comparison of field measurements and MR product using HR product as intermediate</i>	138
4.3. Discussion	147
4.4. Conclusion.....	149
5. CHAPITRE 5 : PROPOSITION D'UNE NOUVELLE MODALITE DE CALCUL DE L'INDICE DE PRODUCTION FOURRAGERE	151
5.1. Introduction	155
5.2. Models to assess forage production	159
5.2.1. <i>Baseline model</i>	159
5.2.2. <i>New models</i>	160
5.3. Materials and methods	164
5.3.1. <i>Application site</i>	164
5.3.2. <i>Remote sensing data</i>	166
5.3.3. <i>Climatic data</i>	167
5.3.4. <i>Reference grassland production data</i>	168
5.3.5. <i>Methods</i>	169
5.4. Results	172
5.4.1. <i>Models overall performance estimation</i>	172
5.4.2. <i>Individual assessment of biomass production function factors</i>	176
5.5. Discussion	178
5.5.1. <i>On the operational implementation of identified improving factors</i>	179
5.5.2. <i>Explanations for why potential improving factors are not relevant</i>	179
5.5.3. <i>On the potential of additional remote sensing data to bring improvements</i> .	180
5.6. Conclusion.....	181
QUATRIEME PARTIE	183
6. DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES	184
6.1. Contributions de la thèse	185
6.1.1. <i>Contributions méthodologiques</i>	185
6.1.2. <i>Contributions thématiques</i>	186
6.2. Poursuite des travaux de thèse et nouvelles perspectives de recherche	187
6.2.1. <i>Poursuite des travaux de validation de l'IPF</i>	188

Sommaire

<i>6.2.2. Nouvelles perspectives de recherche</i>	191
LISTE DES TABLEAUX	201
LISTE DES FIGURES	203
BIBLIOGRAPHIE	209
ANNEXES	226

Listes de publications et communications

La liste de l'ensemble des publications et communications réalisées dans le cadre de la thèse est dressée ci-dessous selon les axes de travail abordés.

- L'indice de production fourragère utilisé par Crédit Agricole Assurances Pacifica pour le produit d'assurance indicielle des prairies en France

[**Poster**] Roumigué, A., Jacquin, A., Sigel, G., Poilvé, H., Lepoivre, B. (2014). A risk management solution for forage production monitoring in France. Development of an index-based insurance using fCover time series from satellite images. Presented at Global Vegetation Monitoring and Modeling International Conference (GV2M), 3rd - 7th February 2014, Avignon, France.

[**Présentation orale**] Roumigué A., Jacquin A., Sigel G. (2013). Construction d'indices à partir d'images satellites et protocoles agronomiques. Presented at the conference "Les nouveaux outils du Développement Durable", 24 Octobre 2013, Université Paris Dauphine, Paris, France.

- La méthode de validation de l'indice de production fourragère et les résultats obtenus

[**Article**] Roumigué, A., Jacquin, A., Sigel, G., Poilvé, H., Lepoivre, B., Hagolle, O. (2015). Development of an index-based insurance product: validation of a forage production index derived from medium spatial resolution fCover time series. *GIScience & Remote Sensing*, 52, 94-113.

[**Article**] Roumigué, A., Jacquin, A., Sigel, G., Poilvé, H., Daydé, J., Hagolle, O. (2015). Validation of a Forage Production Index derived from MODIS fCover time series with high repetitivity HR sensors – Methodology, results and opportunities for future. *Remote Sensing*, 7, 11525-11550.

[**Poster + Article**] Roumigué, A., Jacquin, A., Sigel, G., Poilvé, H., Lepoivre, B. (2014). *Validation of a Forage Production Index derived from MODIS fCover time series - Methodology and main results*. Presented at 4th International Symposium on Recent Advances In Quantitative Remote Sensing, September 22-26, 2014, Valencia, Spain.

[**Présentation orale + Article**] Roumigué, A., Jacquin, A., Sigel, G., Poilvé, H., Lepoivre, B. (2014). *Development of index-based insurance product: validation of forage production index derived from medium spatial resolution fCover time series*. Presented at 12th International Conference on Precision Agriculture, July 20-23, 2014, Sacramento, California, USA.

[**Présentation orale + Article**] Roumigué, A., Jacquin, A. (2013). *Using high spatial resolution time series to monitor forage production*. Blog "Séries Temporelles" du CESBIO : <http://www.cesbio.ups-tlse.fr/multitemp/?p=2928>

- La proposition d'une nouvelle modalité de calcul de l'indice de production fourragère

[**Présentation orale**] Roumiguié, A. et Jacquin, A. (2015). *Is Combining Remote Sensing and Climatic Data Interesting to Estimate Grassland Production?* Presented at "Index insurance: risk sharing & challenges - International Research Workshop", September 16th, 2015, Paris, France.

[**Présentation orale**] Roumiguié, A. et Jacquin, A. (2015). *Insuring forage through satellites: testing alternative indices against grassland production estimates for France*. Presented at "American Association of Geographers", April 1st, 2016, San Francisco, Californie.

[**Article accepté**] Antoine Roumiguié, Grégoire Sigel, Hervé Poilvé, Bruno Bouchard, Anton Vrieling et Anne Jacquin (2016). *Insuring forage through satellites: testing alternative indices against grassland production estimates for France*. *International Journal of Remote Sensing*.

Introduction

Introduction

Les prairies sont des écosystèmes très vulnérables face aux événements climatiques. Le risque de sécheresse est notamment défini par la combinaison d'un aléa climatique avec une fréquence spatiale et temporelle élevée associée à une forte vulnérabilité de ces milieux. Une sécheresse se caractérise par une diminution de la réserve en eau du sol affectant la végétation cultivée. La gravité dépend de la période d'occurrence, de l'ampleur et de la durée du déficit hydrique (Itier et Seguin, 2007). Elle survient généralement au moment où les besoins en eau des espèces composant les prairies sont maximums (Zhao et Running, 2010; Craine *et al.*, 2012b).

Pour un grand nombre d'espèces prairiales et malgré leurs capacités d'adaptation physiologique, l'exposition à un stress hydrique prolongé induit une diminution de la biomasse produite (jusqu'à 50% selon l'intensité et la durée de l'épisode sec), une modification de la valeur fourragère (Durand, 2007) et des changements morphogénétiques pouvant remettre en cause leur présence au sein de la prairie (Lemaire *et al.*, 2006).

Dans les exploitations d'élevage où l'herbe constitue la principale ressource alimentaire du troupeau, les prairies jouent un rôle central dans le système fourrager (Lemaire *et al.*, 2006). En causant une perte de production de biomasse, les sécheresses contribuent à fragiliser les résultats économiques des élevages (Lemaire *et al.*, 2006; Veysset *et al.*, 2007; Mosnier *et al.*, 2008; Mosnier *et al.*, 2014). Par ailleurs, les prévisions climatiques pour 2100 s'accordent sur une diminution de la pluviométrie accentuant les risques de sécheresse estivale (Pigeon *et al.*, 2013) et sur une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes. Ainsi, face à des fréquences croissantes de cet aléa, le besoin de solutions d'ajustement pour les éleveurs est très fort.

Afin de limiter l'impact des sécheresses, l'éleveur peut mobiliser des leviers d'adaptation internes à l'exploitation qui s'appliquent soit au système fourrager, soit au troupeau. Ces solutions d'auto-assurance ont un coût économique non négligeable (Mosnier, 2015).

On en distingue deux. Le premier type regroupe des adaptations tactiques mobilisables à court terme en réponse à une sécheresse imprévue, comme par exemple l'achat d'aliments ou la diminution des rations du troupeau. On parle de solutions *ex post* (Pflimlin, 1997; Le Gall *et al.*, 1998; Faidherbe *et al.*, 2007; Lorgeou *et al.*, 2007; Desarmenien *et al.*, 2013).

Le second type rassemble des solutions pour anticiper des sécheresses impliquant des modifications du système de production comme la constitution de stocks ou la sélection de variétés plus résistantes à la sécheresse (Lemaire, 2008). On parle de solutions *ex ante* (Pottier *et al.*, 2007; Noury *et al.*, 2013).

Des mécanismes externes à l'exploitation agricole sont aussi à disposition de l'éleveur (Noury *et al.*, 2013). Parmi ceux-ci, les produits d'assurance sont des outils financiers permettant de limiter l'impact économique d'un aléa sur les résultats économiques de l'exploitation.

Le fait que l'aléa climatique touche généralement de larges étendues et surtout la difficulté d'estimation de la production font des prairies un candidat idéal pour être géré via une assurance indicielle (de Leeuw *et al.*, 2014). Contrairement aux assurances traditionnelles, ce type d'assurance indemnise tous les assurés d'une même zone en fonction d'un indice local qui permet d'apprécier la perte agricole subie (Sandmark *et al.*, 2013).

Un des principaux enjeux liés à la mise en place d'une telle solution assurantielle réside dans la précision d'évaluation de la perte de production mesurée durant l'année (Burke *et al.*, 2010; Gomme et Kayitakire, 2013). Les indices utilisés peuvent être des mesures directes de production (Skees *et al.*, 1997), des mesures indirectes réalisées à partir de données météorologiques (Osgood *et al.*, 2007) ou des données sur les caractéristiques physiologiques de la végétation (Vrieling *et al.*, 2014). Pour ces deux derniers, l'apport de la télédétection est apprécié dans de nombreuses approches.

Concernant les assurances indicielles des prairies, les indices de végétation sont les plus couramment utilisés. C'est le cas pour les produits d'assurance commercialisés au Mexique, en Espagne et aux Etats-Unis. En effet, avec le lancement au début des années 2000 de capteurs à moyenne résolution spatiale, comme MODIS et MERIS respectivement lancés en décembre 1998 et mars 2002, les fréquences d'acquisition et les résolutions obtenues permettent de créer des séries temporelles d'images satellitaires desquelles sont extraites des informations clés sur la végétation, sur de larges étendues.

Cependant, si l'utilisation de ces données fait consensus, plusieurs études montrent que le développement d'un indice de production des surfaces prairiales résulte d'une chaîne de traitement plus ou moins complexe (Chantararat *et al.*, 2009; Turvey et McLaurin, 2012; de Leeuw *et al.*, 2014). Celle-ci implique des choix méthodologiques, guidés par des procédures de validation spécifiques, ayant des conséquences variables sur l'erreur d'estimation de la production.

Les travaux présentés dans ce document s'inscrivent dans le projet commun entre Crédit Agricole Assurances Pacifica et AIRBUS Defence & Space. Les deux entreprises élaborent depuis 2010 un Indice de Production Fourragère (IPF) dans le cadre du développement d'un produit d'assurance indicielle pour couvrir la baisse de production des prairies en France. L'approche méthodologique choisie repose sur le calcul de la somme d'un paramètre biophysique relatif à la fraction de couvert vert (fCover) mesuré à partir de série temporelle d'images MODIS et MERIS. Afin de proposer des pistes d'amélioration pour le traitement des données de télédétection et d'accroître la qualité d'estimation de la production fourragère, le travail réalisé et présenté s'articule autour de deux objectifs méthodologiques :

- Le développement et la mise en œuvre d'une méthode de validation adaptée à l'indice de production fourragère utilisé pour le produit d'assurance ;
- La proposition d'une nouvelle modalité de calcul de l'indice de production fourragère permettant d'améliorer l'estimation de production en combinant des données de télédétection et des données climatiques dans un modèle semi-empirique.

Ce document s'organise en quatre parties. La première partie présente le contexte général des prairies (les caractéristiques de cet écosystème, la fonction de production de biomasse, le risque de sécheresse sur la production des prairies et les outils de gestion de ce risque disponibles pour les éleveurs), dresse l'état de l'art des assurances indicielles existantes et les apports de la télédétection dans ce domaine et décrit l'indice de production fourragère utilisé par Pacifica dans le produit d'assurances des prairies en France (chapitre 1). La deuxième partie expose les sites d'étude et les jeux de données mobilisés pour répondre aux objectifs de notre recherche (chapitre 2). Trois articles (deux publiés et un soumis pour publication) constituent la troisième partie. Les chapitres 3 et 4 décrivent les méthodes de validation développées au cours des travaux de thèse et les résultats obtenus. Le chapitre 5 décrit le nouveau modèle proposé pour calculer l'indice de production fourragère. La dernière partie est une discussion des travaux réalisés et présente les perspectives de la thèse.

Première partie

Contexte, démarche et objectifs de la thèse

Chapitre 1 : Contexte, démarche et objectifs de la thèse

1.1. Les prairies : un écosystème vulnérable au phénomène de sécheresse

1.1.1. Définition et typologie des prairies

La prairie est un élément important du paysage agricole français. Elle peut être composée de graminées et/ou de légumineuses. Il s'agit d'une culture pérenne destinée à l'alimentation des animaux (Huyghe, 2005).

Sous les latitudes de la France, les prairies bénéficient de conditions favorables qui permettent d'exploiter plusieurs cycles de production au cours d'une année. En 2013, 12,7 millions d'hectares de prairies sont recensés en France, soit 43,9 % de la surface agricole utile (Statistique Agricole Annuelle Agreste, 2015b). On distingue les types de prairies (Tableau 1-1) selon leur durée d'implantation, leur composition floristique et leur utilisation dans l'alimentation du bétail (Puydarrieux et Devaux, 2013).

Tableau 1-1. Typologie des prairies.

Catégorie	Type de prairies	Durée	Nature	
Prairies non permanentes	Prairies artificielles	0 à 5 ans	Légumineuses à plus de 80%	
	Prairies temporaires	0 à 5 ans	Graminées fourragères à plus de 20 %	
Prairies permanentes ou surfaces toujours en herbe (STH)	Prairies semées		Plantes fourragères herbacées vivaces en général nombreuses et diversifiées	
	Prairies naturelles non semées	Productives (production \geq 1 500 UF)		6 ans ou +
		Non productives Parcours et landes, alpages, estives (production < 1 500 UF)		6 ans ou +

Source : (Moule et Bustarret, 1971; Huyghe, 2005; Puydarrieux et Devaux, 2013)

Au sein du territoire, les prairies permanentes semées et non semées productives occupent 54,6 % de la surface herbacée totale. Les superficies restantes sont couvertes par les prairies temporaires (24,7 %), les landes et parcours (18,9 %) et les prairies artificielles (1,8 %) (Statistique Agricole Annuelle Agreste, 2015a).

Dans ce travail, on définit par fourrage la production végétale fournie par les prairies qu'elles soient permanentes, temporaires, artificielles, et par les landes et parcours.

1.1.2. La fonction de production de biomasse

La production brute correspond au cumul de la biomasse produite, incluant les feuilles sénescentes. L'accumulation nette ou production relative correspond à la production brute à laquelle on soustrait les feuilles qui sont devenues sénescentes ou mortes pendant l'intervalle de temps considéré.

La biomasse récoltée ne correspond généralement qu'à une partie de la biomasse présente ou de la production brute (Parsons, 1988). Les facteurs de variation de la production de biomasse sont ceux régissant la photosynthèse : le rayonnement, la température, la disponibilité en eau du sol et la disponibilité en éléments minéraux.

Les lois générales de variation de la production de biomasse en fonction de chacun de ces facteurs sont connues. La production brute d'une prairie dépend principalement du climat et de la nutrition minérale, et dans une moindre mesure, du sol et des espèces. En l'absence de déficit hydrique, les apports en azote permettent d'augmenter la productivité (Figure 1-1).

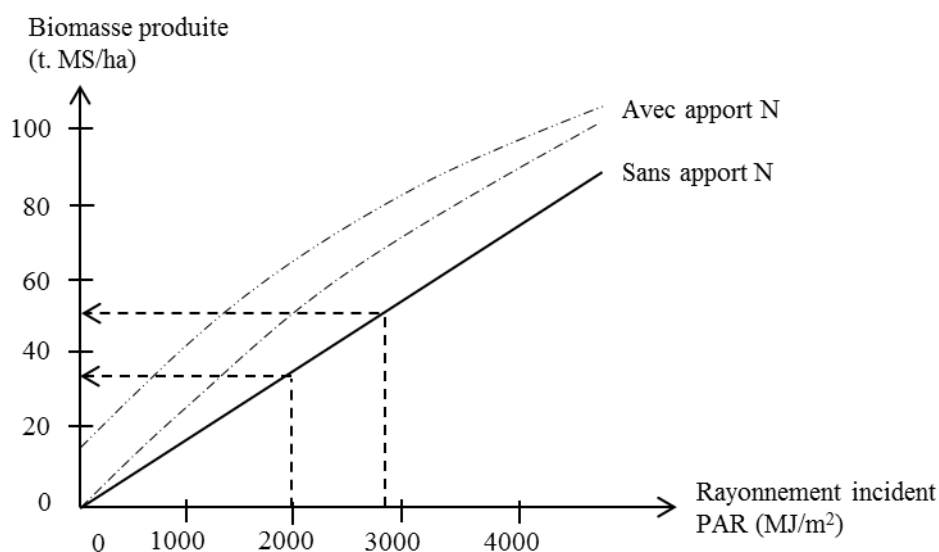


Figure 1-1. Représentation schématique de la fonction d'accumulation de biomasse en fonction du rayonnement incident après une coupe sévère (biomasse initiale nulle) ou partielle (biomasse initiale non nulle), en l'absence de déficit hydrique et selon un apport en azote.

Source : (Duru *et al.*, 1998).

Ainsi, l'accumulation de biomasse peut être mise en relation avec le cumul du rayonnement intercepté par la prairie, voire plus simplement avec le cumul de température au printemps (Gosse *et al.*, 1986).

Le rayonnement intercepté est fonction de la surface des feuilles vertes qui captent l'énergie. En début de repousse à la sortie de l'hiver, la surface foliaire est encore insuffisante pour capter l'ensemble du rayonnement incident, la courbe de croissance en fonction du temps présente une allure exponentielle.

1.1.3. Une ressource centrale dans le système fourrager

Au sein de l'exploitation d'élevage, les prairies doivent fournir une ressource fourragère en quantité et en qualité pour subvenir aux besoins du troupeau. Les éleveurs cherchent à optimiser les ressources foncières agricoles disponibles afin de garantir un maximum de l'alimentation du troupeau grâce à la production végétale et ainsi créer de la valeur ajoutée.

La bonne gestion des surfaces fourragères est un enjeu majeur pour les systèmes d'élevage puisque le revenu dégagé par l'agriculteur dépendra de la vente de la production animale qui elle-même est directement liée à la production végétale. Les choix de conduite et d'exploitation des prairies varient selon les objectifs et opportunités de l'éleveur.

En élevage allaitant, un système fourrager de type "herbager" domine. Le pâturage est généralement favorisé du fait de son moindre coût et de la valeur ajoutée moins importante du produit d'élevage. En revanche, les élevages laitiers utilisent un système fourrager qualifié "d'intensif" pour maximiser le rendement des surfaces fourragères et des animaux. L'ensilage de maïs est une composante essentielle de la ration des animaux qui s'ajoute au produit des prairies.

Au final, quel que soit le type d'élevage, l'agriculteur doit arbitrer constamment entre les fourrages disponibles et les besoins du troupeau en tenant compte des objectifs de production et de l'ensemble des facteurs externes qui modifient souvent cet équilibre. Des caractéristiques locales telles que le sol, le climat, les espèces implantées ou les outils de récoltes utilisés, permettent de prévoir une production des prairies à un certain niveau de qualité. Cette prévision de production lui permet de trouver le point d'équilibre dans son élevage.

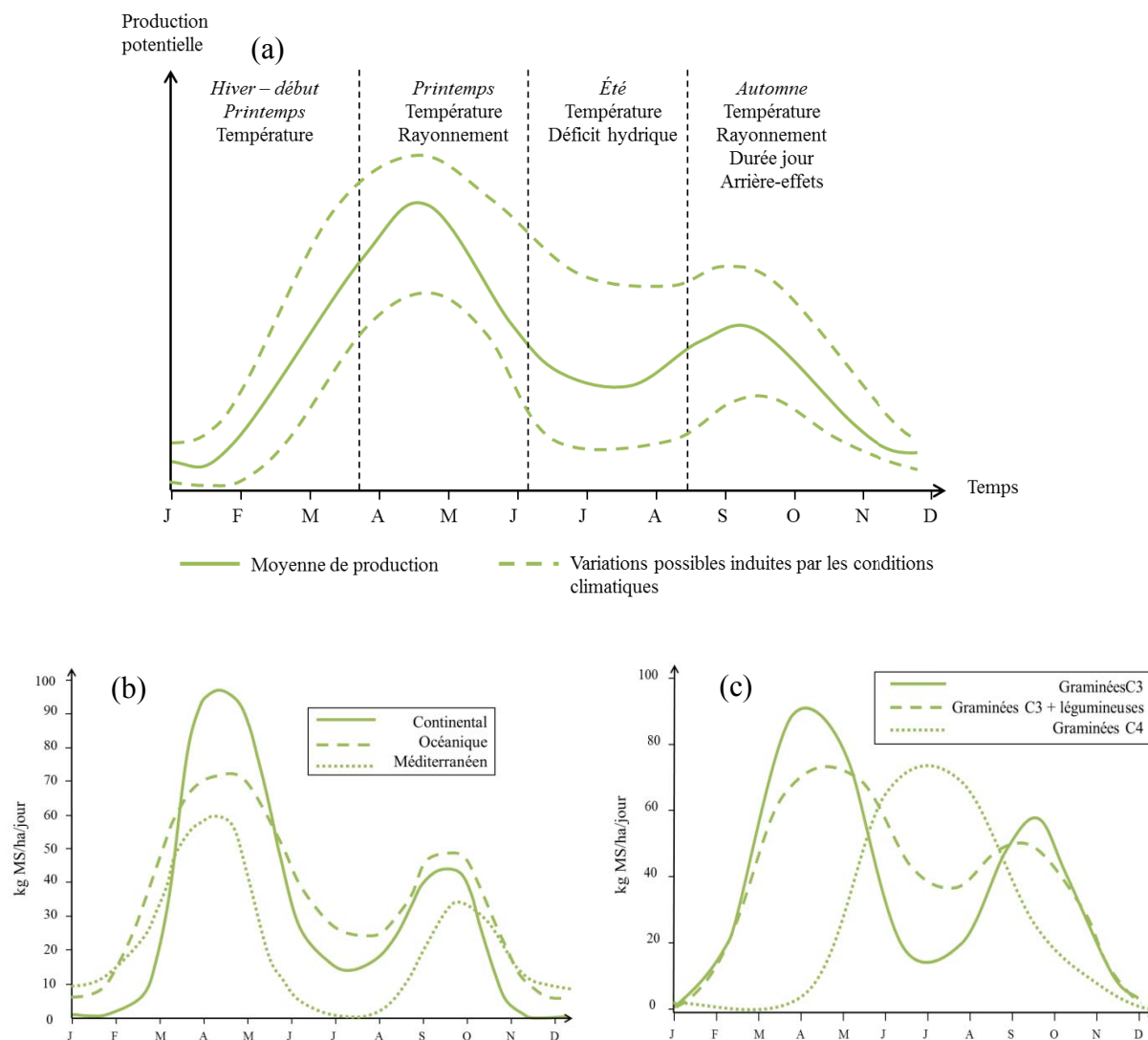
1.1.4. Une ressource fourragère hétérogène dans le temps et dans l'espace

1.1.4.1. Une ressource hétérogène dans le temps

1.1.4.1.1. *Des variations saisonnières*

La production des prairies en un lieu donné est très variable suivant la saison (Figure 1-2-a). Elle dépend directement des conditions climatiques de l'année (température, rayonnement et

précipitation). En règle générale, le pic de biomasse est atteint au printemps, période à laquelle les conditions environnementales sont non-limitantes (besoins en température et en eau couverts). Les trois-quarts de la production annuelle peuvent se réaliser au cours du printemps (Pottier *et al.*, 2012). Des variations peuvent être observées selon que l'on est en régime climatique continental, océanique ou méditerranéen (Figure 1-2-b).



Une des difficultés de la conduite des prairies est de maîtriser cette variabilité au cours du temps pour satisfaire les besoins du troupeau qui sont beaucoup moins fluctuants. Cela est rendu possible par le choix de modes d'exploitation des prairies au cours d'une année et/ou

par le choix d'espèces, ces deux facteurs agissant sur le cycle saisonnier en modifiant la vitesse de croissance de l'herbe.

On distingue, dans les modes d'exploitation, le pâturage et la récolte, en dissociant trois grands modes de conditionnement après une fauche, tous largement pratiqués, le foin (conditionnement sous forme sèche), l'ensilage et l'enrubanné (conditionnements sous forme humide).

L'avantage du conditionnement sous forme humide est qu'il permet de diminuer l'impact de l'évènement climatique, de profiter d'une valeur nutritive de l'herbe plus élevée et d'augmenter le chargement de la prairie (Huyghe et Delaby, 2013). Concernant les espèces prairiales, le mélange de graminées avec des légumineuses permet de lisser la production et d'augmenter la productivité des prairies durant la saison estivale, contrairement aux prairies uniquement composées de graminées (Figure 1-2-c).

Ainsi, l'éleveur conçoit son système fourrager en combinant les modes d'exploitation et espèces selon le régime climatique. Les climats océaniques ont des conditions favorables à la pousse de l'herbe sur une année complète et donc au pâturage. Le potentiel de production des graminées y est maximisé. A l'inverse, le climat méditerranéen conduit à des conditions limitantes et impose de prévoir un stock pour subvenir aux besoins du troupeau pour la période estivale, d'où des modes de récolte mixtes associant fauche et pâturage et des prairies plutôt en mélange graminées et légumineuses.

1.1.4.1.2. *Des variations interannuelles*

La variabilité intra-annuelle de la production des prairies est susceptible d'être modifiée d'une année sur l'autre selon les conditions climatiques (Figure 1-2-a). A l'échelle d'une exploitation agricole, le système fourrager en place est conçu pour intégrer ces variations saisonnières et interannuelles.

1.1.4.2. Une ressource hétérogène dans l'espace

En France, les conditions stationnelles et les différents types d'élevage et modes d'exploitation des prairies associées génèrent des types de prairies très divers dont la production peut être décalée dans le temps avec des quantités produites très variables (Protin *et al.*, 2009; Arranz, 2012).

Les variations de production des prairies dépendent donc principalement de facteurs d'origine climatique et peuvent être localement amplifiées ou atténuées sous l'effet d'autres facteurs

(c'est-à-dire le type de sol, les apports en éléments minéraux et le système fourrager incluant espèces et modes de gestion).

1.1.5. Impact des sécheresses sur les prairies

1.1.5.1. Définition du risque de sécheresse

Le risque de sécheresse fait partie des risques climatiques. Le déficit hydrique se définit comme une diminution marquée de la réserve en eau du sol disponible pour la végétation. Sa gravité dépend de la période d'occurrence, de l'ampleur du déficit hydrique et de sa durée. C'est un risque systémique : la probabilité qu'il affecte en même temps toutes les exploitations d'une même région est élevée. Le risque de sécheresse a une probabilité de sinistre faible mais les pertes potentielles sont fortes, il est ainsi qualifié de risque "sauvage" (Cordier *et al.*, 2008).

La mesure du risque sécheresse (ou coût technique du risque) correspond à la valeur de la perte probable multipliée par la fréquence de survenance de la sécheresse.

Les sécheresses constituent l'aléa climatique impactant les prairies le plus important, à tel point que le déficit hydrique pourrait être assimilé comme la composante unique du risque climatique pour les prairies (Boyer, 2008; Mosnier *et al.*, 2014).

Elles peuvent entraîner des pertes de production conséquentes dont l'intensité varie selon la vulnérabilité des prairies en fonction de la résistance (capacité à résister à l'aléa) et de la résilience (capacité à retrouver un fonctionnement normal après un aléa) des espèces les composant.

1.1.5.2. Réponse physiologique des espèces prairiales à la sécheresse

Les espèces prairiales se comportent comme l'ensemble des végétaux face à des déficits hydriques. Globalement, les besoins en eau sont les mêmes que ceux des grandes cultures. Cependant, il est rare que les prairies reçoivent un apport hydrique en situation de stress.

Les flux d'eau d'une plante sont régis par le phénomène de transpiration au niveau des feuilles. Plus le feuillage capte d'énergie solaire, plus il y a de chaleur latente à évacuer et donc d'évaporation au niveau du couvert végétal. En situation de rayonnement important, la demande racinaire en eau est alors accrue. Si les conditions hydriques du sol ne sont pas favorables à cet apport, la plante entre en situation de stress hydrique. Le flux d'eau dans la

plante dépend du potentiel de conductivité des racines et de la différence de pression entre les racines et les feuilles.

Afin de limiter l'effet du stress hydrique, la plante ferme ses stomates pour limiter les pertes en eau. L'entrée de CO₂ étant aussi bloquée, on assiste à une forte baisse voire un arrêt de la production. Des espèces légumineuses comme les luzernes sont capables de maintenir une pression osmotique élevée et de conserver une bonne ouverture des stomates.

Les *Fabaceae* s'adaptent mieux au déficit hydrique grâce à un développement racinaire important (Figure 1-2-c). Toutefois, dès lors que la plante ne subvient plus à ses besoins hydriques, la sécheresse ralentit la vitesse de croissance chez tous les végétaux (Durand *et al.*, 1995). Tous les organes de la plante ralentissent leur vitesse de croissance, les parties aériennes sont davantage affectées que les organes racinaires. Enfin, la résistance des végétaux à la sécheresse est favorisée par un appareil racinaire profond qui permet un captage de l'eau profonde.

En cas de situation prolongée de sécheresse, la plante diminue sa surface foliaire en entrant dans une sénescence anticipée (Tardieu *et al.*, 2006). Les échanges gazeux nécessaires à la photosynthèse diminuent et limitent nettement la production de biomasse.

1.1.5.3. Effet de la sécheresse sur la qualité de la ressource fourragère

En cas de déficit hydrique marqué, les prairies sont menacées à plusieurs niveaux. Dans un ordre décroissant d'intérêt pour l'éleveur, la production, la qualité et la diversité des espèces prairiales sont impactées.

Du point de vue de la qualité des fourrages, les situations de déficits hydriques ont tendance à modifier la morphogénèse, l'assimilation d'azote et l'utilisation et la synthèse de sucres. La qualité intrinsèque du fourrage est souvent diminuée. En revanche, du fait de l'activité photosynthétique ralentie, la taille des éléments végétaux est plus petite et accroît la digestibilité des prairies (Durand, 2007). Cette adaptation du végétal entraîne une baisse de production conséquente. En cas de mauvaise disponibilité en eau pour la plante durant la période de pousse printanière, la production peut diminuer d'un à deux tiers avec des espoirs de rattrapage variables (Pflimlin, 1997).

Enfin, selon les espèces prairiales et les pratiques de gestion, la diversité spécifique des prairies est sensible aux aléas climatiques récurrents (Alard et Balent, 2007). Certaines espèces s'adaptent plus facilement et peuvent s'installer durablement dans la parcelle à la

place de celles moins adaptées. A long terme, ces modifications de l'écosystème peuvent avoir un effet sur la qualité des fourrages si aucune intervention de l'éleveur n'est réalisée sur la composition spécifique des prairies.

Les sécheresses fréquentes, telles que rencontrées dans le pourtour méditerranéen, ont un caractère cyclique et saisonnier qui les rendent plus faciles à anticiper. A l'inverse, les sécheresses exceptionnelles sont imprévisibles et sont susceptibles d'impacter les systèmes plus fortement compte tenu qu'ils y sont moins préparés (Lemaire *et al.*, 2006; Moreau et Lorgeou, 2007).

En 2003, selon Agreste (2009), la production des prairies temporaires et permanentes a été impactée de 40 % en moyenne en France avec des conséquences économiques estimées à quatre milliards d'euros pour la France et 13 milliards d'euros pour l'Europe. Les régions les plus affectées ont subi jusqu'à 50 % de pertes (Lemaire, 2008). Cette année de production a été la plus mauvaise depuis les années 1980. Des déficits pluviométriques au printemps couplés à des hautes températures estivales furent observés sur une très large partie de la France.

Deux ans plus tard, en 2005, des températures anormales ont aussi impacté la production prairiale. La sortie d'hiver a été longue et les chaleurs estivales se sont rapidement fait sentir sur la moitié sud de la France et en zone de montagne (Agreste, 2006). Enfin le dernier épisode climatique remarquable a eu lieu au cours de l'année 2011 (Pigeon *et al.*, 2013). Sur la façade ouest de la France essentiellement, les faibles pluies printanières ont limité la pousse durant la première partie de l'année et la production manquante n'a jamais pu être rattrapée par la suite. Selon Agreste (2011), les pousses estivales et automnales des zones pyrénéennes, du Massif Central et de la façade est ont été favorables et ont permis de rattraper le déficit.

1.1.5.4. Changement climatique et conséquences de l'augmentation des sécheresses

Bien que le taux de CO₂ augmente dans l'atmosphère et conduise à un meilleur rendement photosynthétique, les scénarios envisagés concernant la pluviométrie et la température semblent défavorables à l'augmentation des niveaux de production (Durand *et al.*, 2013). Selon les travaux de modélisation entrepris par Déqué (2007), dans un futur lointain (2071-2100), la fréquence d'épisodes pluvieux hivernaux intenses va augmenter de 24 %. En période estivale, le nombre de jours de canicule (définie par une température supérieure de 5°C à une référence historique et une durée minimale de cinq jours) devrait être multiplié par dix et les jours consécutifs sans précipitation dureront dix jours de plus en moyenne. Face au

changement climatique, l'éleveur sera obligé de repenser son système de production pour s'adapter à l'environnement de son exploitation.

Les travaux du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) donnent des conclusions variables selon les hypothèses d'évolution formulées. Cependant, ils craignent que les épisodes de sécheresse printanière et estivale soient plus fréquents en 2050. Ce constat est inquiétant compte tenu du fait que l'essentiel de la production prairiale est réalisé entre avril et juin (Pflimlin, 1997).

Ainsi, l'augmentation de la variabilité des précipitations et/ou des températures amplifie la variabilité de la disponibilité en eau dans les sols. Elle occasionne des épisodes de sécheresse que l'on peut qualifier d'événements climatiques extrêmes car altérant le processus d'évapotranspiration et induisant un lessivage des nutriments se traduisant *in fine* par une perte de productivité.

Dans un contexte d'augmentation des stress d'origine climatique (que ce soit des excès ou des déficits en eau et/ou en température), la fonction de production de biomasse des prairies est remise en cause (Cherwin et Knapp, 2012). Les pertes de production sont telles que les capacités de flexibilité du système fourrager sont insuffisantes. Enfin, les pertes de production peuvent être plus ou moins fortes selon les types de sol, les communautés végétales composant les prairies et les modes de gestion (rôle d'atténuation des effets des conditions climatiques).

C'est pourquoi il n'y a pas une seule mais une multitude de réponses des prairies aux événements climatiques extrêmes rendant très difficile le processus d'uniformisation d'adaptation aux sécheresses (Beierkuhnlein *et al.*, 2011; Smith, 2011; Kreyling *et al.*, 2012).

La Figure 1-3 présente un schéma conceptuel synthétisant l'effet de la variabilité des conditions climatiques sur la disponibilité en eau du sol et la réponse des prairies quant à leur potentiel de production.

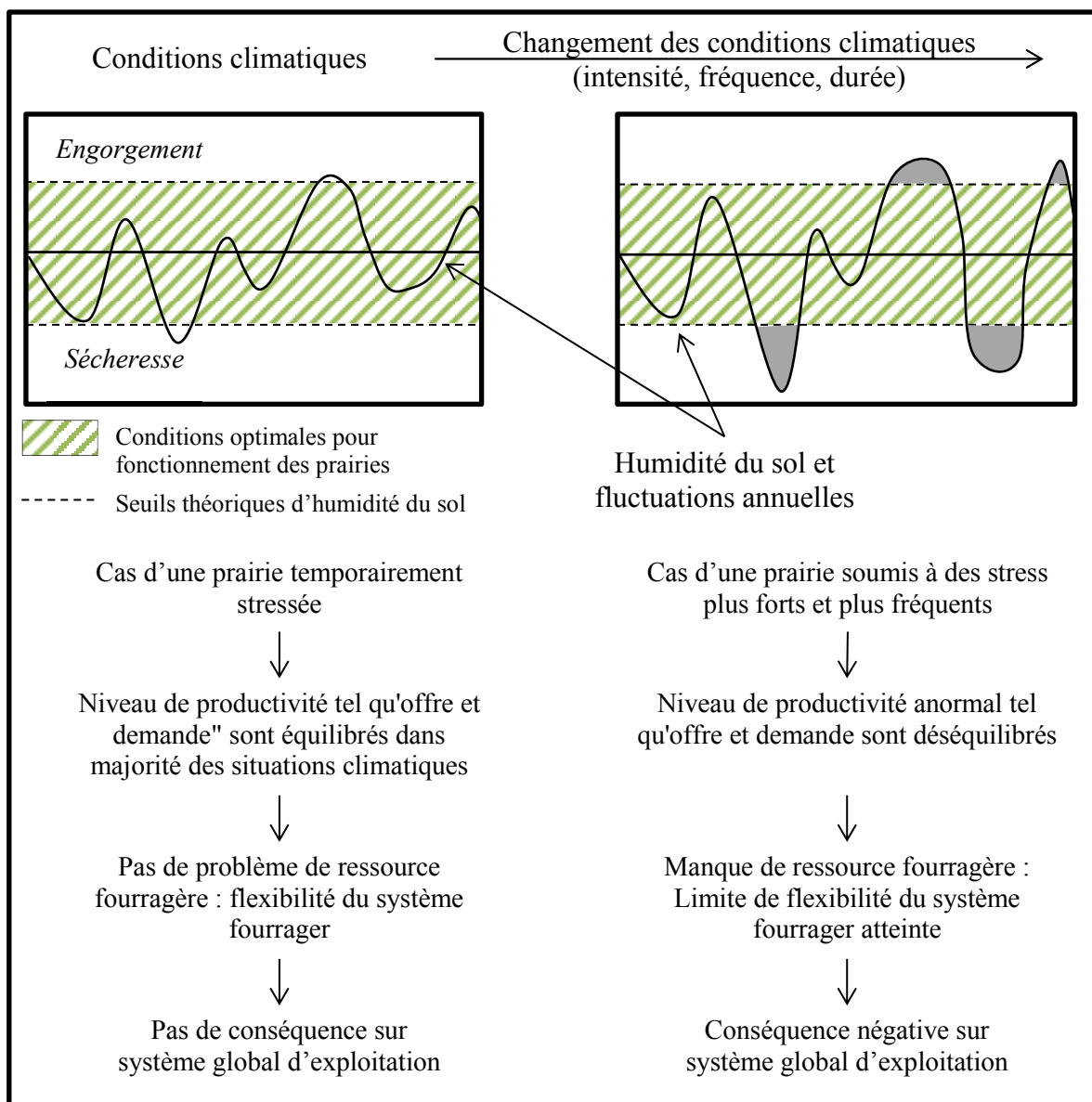


Figure 1-3. Schéma conceptuel de l'effet de la variabilité des conditions climatiques (précipitations et température) sur la disponibilité en eau du sol et réponse des prairies

En conclusion, lors d'un événement climatique extrême, pour estimer au mieux les pertes réelles de production des prairies à l'échelle d'un territoire comme la France, il faut intégrer deux dimensions :

- Les variations spatiales des conditions climatiques, des types de sol, des espèces fourragères et des modes de gestion des prairies qui vont influencer sur le niveau annuel de production ;

- Les variations temporelles des conditions climatiques et des modes de gestion des prairies qui vont influencer sur la vitesse de croissance et donc faire varier la durée de la période de production fourragère en un lieu donné.

1.2. Synthèse des stratégies existantes de gestion du risque de sécheresse

Le risque climatique est générateur d'incertitude pour les éleveurs et peut engendrer une variabilité forte de la production d'un point de vue quantitatif et qualitatif. Pour limiter cela, différentes stratégies de gestion du risque existent. Elles sont synthétisées dans le Tableau 1-2 ci-dessous.

Tableau 1-2. Synthèse des mécanismes et outils disponibles pour l'éleveur selon une stratégie de gestion du risque de sécheresse par anticipation (*ex ante*) ou en réaction (*ex post*) de la perte de production.

Solutions par anticipation (<i>ex ante</i>)	Solutions en réaction (<i>ex post</i>)
<i>Interne à l'exploitation agricole: stratégie d'assumption (auto-assurance)</i>	
<u>Sur le système fourrager :</u> Diversification des espèces prairiales Constitution de stocks fourragers <u>Sur le système de production animale :</u> Diminution du chargement animal Adaptation du calendrier de production animale au système fourrager Diversification temporelle (allongement période de vente) <u>Sur le système de production global :</u> Diversification de l'activité (revenus alternatifs) Diversification financière (déduction pour aléa)	<u>Sur le système fourrager :</u> Utilisation à des fins fourragères de cultures de vente Utilisation de stocks Achat de fourrages ou paille <u>Sur le système de production animale :</u> Baisse temporaire des performances animales Tarissement précoce Vente d'animaux avec réorientation du type d'animal produit Décapitalisation <u>Sur le système de production global :</u> Changement de système d'exploitation
<i>Externe à l'exploitation agricole</i>	
<u>Stratégie de transfert</u> Assurance	<u>Stratégie de gestion</u> Filet de sécurité public (FNGRA)

Les outils correspondant à des stratégies dites d'assumption sont adaptés pour répondre à un aléa d'une ampleur faible à moyenne. A l'inverse, les outils proposés pour les stratégies de transfert ou de gestion sont mobilisés préférentiellement en cas d'une ampleur moyenne à forte de l'événement climatique.

1.2.1. La stratégie d'assumption

Les éleveurs mettent en œuvre des solutions en anticipation (solutions *ex ante*) ou en réaction (solutions *ex post*) à la perte de production à l'échelle de leur exploitation agricole.

1.2.1.1. Les solutions *ex ante*

Les solutions *ex ante* sont basées sur une analyse de l'environnement de l'exploitation et portent sur le système fourrager, le système de production animale ou le système de production global.

1.2.1.1.1. *Solutions ex ante sur le système fourrager*

Le choix des espèces prairiales à implanter permet d'adapter la vulnérabilité des prairies (Lorgeou *et al.*, 2007). Lorsque l'offre de production fourragère est excédentaire, des stocks de sécurité sont constitués dans les exploitations d'élevages afin de se prémunir d'une pénurie de ressource fourragère dans les mois à venir (Lemaire, 2008).

1.2.1.1.2. *Solutions ex ante sur le système de production animale*

Les élevages extensifs auront tendance à diminuer le chargement des surfaces agricoles afin de conserver une meilleure flexibilité dans la gestion de la ressource fourragère. Ils pourront ainsi bénéficier des surfaces de prairies importantes (Arranz, 2012). Plus les ressources fourragères sont supérieures aux besoins d'alimentation des animaux, plus le système fourrager est sécurisant (Lemaire *et al.*, 2006). A la condition que l'outil de travail ne soit pas optimisé, les élevages disposant d'une surface fourragère importante avec la possibilité d'irriguer bénéficient d'une exposition au risque climatique plus limitée (Sautier, 2013).

Adapter le système d'élevage avec le système fourrager permet d'appréhender les périodes critiques plus sereinement. Par exemple, les vèlages en automne constituent une adaptation intéressante pour les élevages laitiers intensifs puisque les vaches tarées peuvent être alimentées avec de la paille et des concentrés ou bien de l'ensilage de céréales immatures (Lemaire *et al.*, 2006).

1.2.1.1.3. *Solutions ex ante sur le système de production global*

La diversification des activités est la solution la plus fréquemment utilisée. Elle consiste à générer des sources de revenus multiples permettant ainsi de diminuer la vulnérabilité du système d'exploitation au risque de sécheresse. Par exemple, la mise en place d'un atelier de transformation est un moyen régulièrement utilisé pour sécuriser le revenu des agriculteurs (Cordier et Debar, 2005).

Utilisés plus rarement, la Déduction Pour Aléa permet à l'éleveur de choisir un outil d'épargne réintégré. Il s'agit d'un outil fiscal permettant de placer sur un compte bancaire dédié les bénéfices d'une année favorable en vue d'une provision pour un aléa climatique. Créé par la Loi de Finances en 2002, la version actuelle de cet outil a été redéfinie en 2013 afin de le rendre plus accessible et attractif.

Le montant maximal déductible du revenu imposable est de 23 000 €. Il peut varier sensiblement selon le nombre de salariés de l'exploitation. L'éleveur dispose de cette somme durant sept ans. Il peut ainsi lisser son revenu et compenser les impacts des aléas climatiques.

1.2.1.2. Les solutions *ex post*

Tout comme les solutions *ex ante*, les solutions *ex post* portent sur le système fourrager, le système de production animale ou le système de production global.

1.2.1.2.1. *Solutions ex post sur le système fourrager*

Les exploitations de type polyculture-élevage, avec des systèmes de production plutôt extensifs, ont la possibilité de réorienter des surfaces de céréales initialement destinées à la commercialisation vers l'alimentation du troupeau (Le Gall *et al.*, 1998) ou d'utiliser les stocks de fourrages constitués les années excédentaires. En revanche, les fermes spécialisées seront plus rapidement contraintes d'acheter de l'aliment (Lemaire, 2008) ou bien de profiter d'entraide avec les agriculteurs voisins. L'achat de fourrages, pailles et concentrés extérieurs reste le levier d'adaptation plébiscité par les éleveurs en situation de sécheresse.

1.2.1.2.2. *Solutions ex post sur le système de production animale*

Diminuer les performances animales en limitant les objectifs de production (Pottier *et al.*, 2007) permet de modifier la ration alimentaire en réduisant la quantité nécessaire de fourrages à distribuer ou bien en complétant la ration avec des concentrés, de la paille ou des céréales (Lemaire *et al.*, 2006). Dans des situations extrêmes, il est possible de procéder à une

décapitalisation anticipée du troupeau afin de diminuer les quantités de fourrages à distribuer quotidiennement.

1.2.1.2.3. *Solutions ex post sur le système de production global*

Si aucune de ces solutions n'a permis de gérer le risque, un changement de système d'exploitation peut être envisagé. Néanmoins, cela reste très rare.

1.2.2. Solutions externes à l'exploitation

1.2.2.1. La stratégie de gestion

Lorsque l'événement climatique est d'une très forte ampleur, les leviers d'adaptation internes à l'exploitation peuvent s'avérer insuffisants pour appréhender cet aléa et pour en limiter les conséquences. Dans ce cas, le risque est géré, en externe à l'exploitation agricole, par un filet de sécurité public.

Suite à la loi de modernisation de l'agriculture de 2010, le Fonds National de Garantie des Risques Agricoles (FNGRA) remplace le Fonds National de Garantie des Calamités Agricoles (FNGCA) (défini par la Loi n° 2010-874 du 27/07/2010). Il a pour particularité de couvrir les risques sanitaires, environnementaux, phytosanitaires et climatiques. Depuis 1964, les dégâts causés sur les productions agricoles par des aléas climatiques sont indemnisés par le FNGRA lorsqu'il s'agit de biens non assurables par des assureurs privés. En France, le risque de sécheresse sur les prairies est assuré par ce fonds.

Le FNGRA est financé par une subvention inscrite au budget de l'Etat. Il est aussi alimenté par les exploitations agricoles cotisant à des contrats d'assurance couvrant les bâtiments, les véhicules utilitaires, les risques de cheptel mort et de responsabilité civile. Le taux prélevé s'élève à une hauteur de 11% du montant total des cotisations versées et rend les exploitations éligibles à une éventuelle indemnisation du FNGRA. Le projet de Loi de Finance 2015 prévoit une diminution de moitié de ce taux pour l'année 2016 (Valls *et al.*, 2015).

L'aléa de sécheresse est le risque le plus coûteux pour le FNGRA comme l'illustre la Figure 1-4. Il est aussi fréquent puisqu'il arrive en seconde position après le gel en termes de nombre de sinistre.

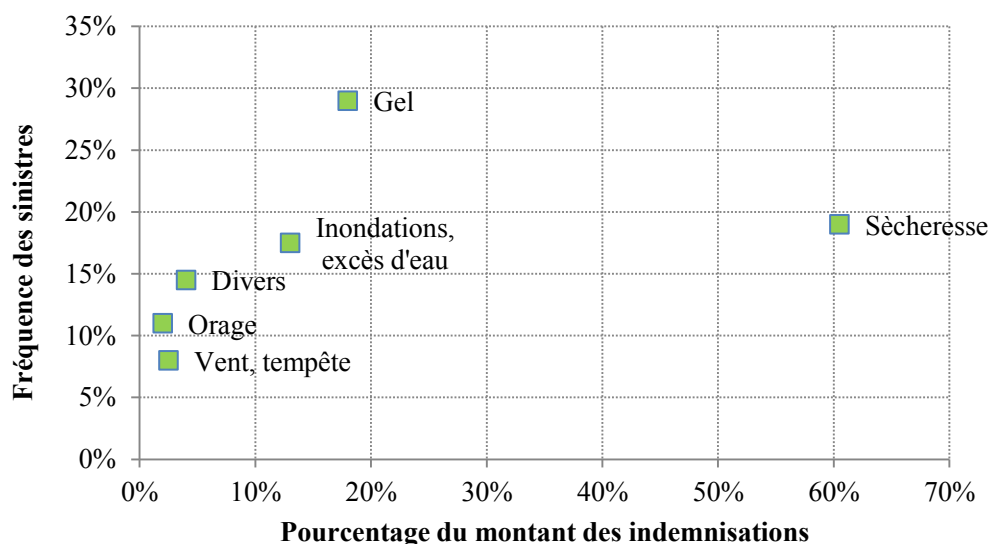


Figure 1-4. Fréquence et coût relatif de chaque sinistre enregistrés sur la France entière par le FNGRA (en % de l'ensemble des sinistres 1980-2006).
Source : (Boyer, 2008)

Le FNGRA est un outil qui présente des limites. Dans son principe de fonctionnement, il mutualise le risque climatique à l'échelle de la France. Tous les agriculteurs français abondent selon le même barème à ce fonds. Ainsi, les exploitations les moins exposées contribuent autant que celles soumises à des aléas climatiques plus fréquents et/ou intenses. Pourtant, les épisodes de sécheresse affectent principalement les zones du sud de la France et les zones d'élevage du Centre. A niveau de cotisation équivalent, les éleveurs de ces zones seront bénéficiaires de ce dispositif contrairement à ceux exploitant dans des régions présentant moins de risques. La couverture des pertes subies est limitée par les fonds récoltés et mis à disposition des agriculteurs.

Pour être éligible à une indemnisation par le FNGRA, un double seuil de 13 % de perte de valeur du produit brut théorique de l'exploitation et de 30 % de perte de la production physique doit être franchi. Cette conditionnalité est défavorable aux exploitations diversifiées, donc moins exposées au risque, puisqu'une perte supérieure à 30 % sur une culture ne se retranscrit pas nécessairement par une perte supérieure à 13 % sur le produit brut théorique de l'exploitation. Au sein d'un élevage bovin viande, une perte de la production fourragère supérieure à 30 % entraînera une baisse de marge brute de 18 % dont seulement 41 % seront couverts par l'assurance calamité à l'éleveur (Mosnier *et al.*, 2014).

Aussi, la reconnaissance de l'intensité du sinistre est généralement effectuée par département mais les versements d'indemnités sont individuels et les dossiers sont peu contrôlés

individuellement. Cette méthode d'indemnisation peut conduire à des inégalités pour les éleveurs les plus exposés à l'aléa. Le financement de ce fonds par l'Etat représente un coût pour la société qui peut s'avérer être très important lors d'évènements climatiques extrêmes. Enfin, les agriculteurs minimisant leur exposition au risque, bien qu'avantagés par le système d'indemnisations forfaitaires, se voient pénalisés par ailleurs car leur niveau de contribution au fonds est le même que ceux étant plus exposés au risque (Foucherot et Bellassen, 2014).

Actuellement, l'assumption et la gestion sont les deux stratégies utilisées dans le traitement du risque sécheresse sur les prairies. Cependant, l'augmentation en fréquence et en intensité des sécheresses a deux conséquences:

- Les outils mis en œuvre dans la stratégie d'assumption par les agriculteurs se révèlent inadaptés car ils sont développés pour des sécheresses anticipées et de moindre ampleur (Cordier et Debar, 2005).
- Le coût économique important, les problèmes de prévision des budgets et l'efficacité du FNGRA ne satisfont pas les pouvoirs publics qui réorientent cette stratégie de gestion du risque sécheresse.

Depuis quelques années, on assiste à une substitution de la stratégie de gestion du risque sécheresse par une stratégie de transfert gérée par les assureurs privés. Dans le cas des prairies, les recherches se sont portées sur une assurance récolte de type indiciel.

1.2.3. La stratégie de transfert vers des assurances privées

1.2.3.1. Les enjeux liés à l'assurance des prairies

Dans ce travail, l'assurance est considérée comme un outil de gestion des risques. Le Tableau 1-3 ci-dessous synthétise les principaux types d'assurance récolte existants.

Tableau 1-3. Typologie des assurances récolte dans l'assurance agricole.

Assurance récoltes	Assurance indemnitaire <i>Indemnise les pertes réelles ou estimées</i>	Assurance forfaitaire <i>Indemnise forfaitairement le préjudice</i>
Déclenchement de la garantie	Par l'expertise	Par l'observation de l'indice
Estimation des pertes par expertise	Oui lorsque nécessaire et possible	Non, pas d'estimation des pertes
Indemnisation	Individuelle, à hauteur du préjudice subi et sur la base de l'expertise	Individuelle ou collective, pour un montant forfaitaire défini à l'avance
Modalité de l'expertise	Humaine ou Indicielle	Indicielle
Type d'indice	Mesure directe de la perte ou fonction d'estimation	Mesure directe de la perte ou fonction d'estimation Ou Indice non lié à la production
Reconnaissance par les Pouvoirs publics et subvention possible	Possible, si la corrélation entre l'indice et la production est reconnue	Non possible

Source : (Roth et McCord, 2008; Chetaille *et al.*, 2011)

Dans l'assurance agricole, on s'intéresse à l'assurance récolte et, plus spécifiquement, à l'assurance indicielle. En effet, à ce jour, les fourrages restent couverts par les pouvoirs publics car aucun produit d'assurance n'existe, ceci pour deux raisons principales :

- L'estimation de la production annuelle des fourrages est complexe du fait de l'existence de plusieurs types d'exploitation annuelle d'une même parcelle (fauches et/ou pâturage) ;
- Les historiques de production ne sont pas accessibles : la production ne figure pas dans la comptabilité de l'éleveur car les fourrages récoltés sont largement autoconsommés (Burke *et al.*, 2010).

Ainsi, l'expertise humaine de la perte subie dans une procédure d'indemnisation par des assurances sinistres semble hasardeuse et difficile à mettre en œuvre à l'échelle de la France sans engendrer un coût économique conséquent.

Du fait de leurs spécificités, les prairies ne sont pas assurables avec les techniques traditionnelles. C'est pourquoi les recherches se sont orientées sur les méthodes d'assurance indicielle (Mahul et Stutley, 2010).

1.2.3.2. Les assurances indicielles

1.2.3.2.1. *Définition, avantages et inconvénients*

L'assurance indicielle est essentiellement mise en œuvre dans les pays en voie de développement car elle permet de résoudre deux problèmes : l'absence de données historiques pour la tarification et l'absence de réseau d'experts pour l'estimation des dommages.

Ce type d'assurance repose sur un principe d'indemnisation non individuelle, utilisant un indice local, calculé à l'échelle d'une unité géographique regroupant plusieurs exploitants. L'indice utilisé et la méthode de traitement de cette information sont primordiaux et conditionnent le succès et l'efficacité de l'assurance. Il peut s'agir d'informations directement ou indirectement relatives à la production (Burke *et al.*, 2010; Binswanger-Mkhize, 2012; Taib et Benth, 2012; de Leeuw *et al.*, 2014).

Lorsque l'indice utilisé franchit un seuil, les agriculteurs perçoivent une indemnisation pour le dommage subi. Dans le cas d'assurances forfaitaires, le montant perçu sera fixé indépendamment de la valeur de l'indice. A l'inverse, les assurances indemnitaires prévoient un dédommagement proportionnel à la variation de l'indice.

Les assurances indicielles permettent de limiter les contraintes de l'aléa moral (lorsque la protection que fournit l'assurance encourage les individus à provoquer l'événement assuré) et de l'antisélection (tendance des personnes présentant un risque plus élevé que la moyenne à vouloir s'assurer) (Barnett et Mahul, 2007), contrairement aux assurances récoltes classiques. L'indice est une mesure objective, observable et vérifiable de la production de la culture assurée (de Leeuw *et al.*, 2014). Tous les agriculteurs situés dans la même zone seront indemnisés selon la même base, sans évaluer leur perte individuelle (Ceccato *et al.*, 2008; Hazell et Hess, 2010).

Ce dispositif pousse à la bienveillance des assurés : ceux qui auront mis en place des mesures pour limiter l'impact de l'aléa climatique gagneront davantage car, leur perte est plus faible que celle de leur voisin et le montant perçu identique. De plus, les primes d'assurances, basées sur un indice neutre avec un historique fiable, limitent le phénomène d'antisélection car les

agriculteurs les plus exposés au risque ont une prime plus élevée. La bonne tarification du produit doit conduire à un potentiel de gain équivalent pour les agriculteurs.

Si les assurances indicielles présentent de nombreux avantages, des éléments viennent freiner leur développement : maîtrise du risque de base, acceptabilité, coût de développement important, changement de fréquence du risque assuré. En effet, l'enjeu majeur des assurances indicielles réside dans la précision de l'estimation de perte subie par les agriculteurs pour limiter le risque de base. L'acceptabilité du produit d'assurance en dépend.

De plus, généralement, le coût de lancement d'une assurance indicielle est important car il est nécessaire de réaliser de nombreux travaux de calibration et de validation entre l'indice et la variable d'intérêt. Cependant, une fois la méthodologie définie, le dispositif est moins lourd à administrer car la méthode d'identification des pertes est plus rapide et peut être réalisée sur de larges zones (Kellner et Musshoff, 2011; de Leeuw *et al.*, 2014).

Enfin, le caractère systémique du risque sécheresse sur les prairies rend le produit d'assurance difficile à administrer. Les montants d'indemnisation peuvent rapidement s'élever et obligent les assureurs privés à envisager des solutions de réassurance grâce à des sociétés spécialisées (Boyer, 2008). Le Tableau 1-4 ci-dessous synthétise les avantages et limites des assurances indicielles.

Tableau 1-4. Synthèse des avantages et inconvénients des assurances indicielles dans les assurances récoltes.

Avantages	Limites
Limite le risque moral	Risque de base peut être élevé : calibrage technique complexe pour rendre l'indice pertinent par rapport aux pertes réelles (problème de qualité de données et d'accès à des données historiques)
Limite le risque de fraude	Coûts très importants liés au développement de l'indice
Limite les frais fixes, surtout d'expertises sur le terrain comme dans les assurances sinistres	Acceptabilité de l'indice parfois complexe et très dépendante de la qualité de l'indice
Remboursement rapide	Changement de fréquence du risque assuré

1.2.3.2.2. *Critères de définition d'un bon indice*

La définition de l'indice et de la valeur de référence est une phase critique. Le choix de l'indice résulte d'un arbitrage complexe entre la forte corrélation à la production locale et une mutualisation suffisante des coûts.

Pour un assureur, un indice de qualité doit répondre à des caractéristiques particulières pour garantir la création d'un produit efficace. Il doit permettre de décrire le risque couvert afin de calculer la prime d'assurance du produit. L'indice doit être stable dans le temps afin qu'une variation de l'indice rende bien compte d'une variation de production, et non d'une instabilité de l'indice. Si ce n'est pas le cas, il est impossible de réaliser une tarification appropriée.

Dans la même problématique tarifaire, plus l'historique disponible de l'indice sera long, plus le calcul d'exposition au risque sera juste et cohérent avec la réalité. A titre d'exemple, grâce à la sécheresse de 2003, cette année exceptionnelle permet de réaliser une meilleure tarification car le risque est mieux défini.

S'ajoutent à ces contraintes de conception du produit les questions soulevées par la commercialisation de la solution d'assurance. Le principal enjeu consiste à minimiser le risque de base. Une mauvaise corrélation entre la perte mesurée et celle réellement constatée engendrerait une mauvaise indemnisation de l'éleveur et atteindrait l'image de l'assureur.

Trois facteurs peuvent être à l'origine du risque de base (Sandmark *et al.*, 2013) :

- Le risque de base spatial. Pour garantir une bonne mesure des pertes, la cohérence spatiale entre l'indice et l'objet assuré doit être satisfaisante. Si l'instrument de mesure de l'indice et la parcelle suivie sont éloignés l'un de l'autre, il se peut que l'information fournie ne corresponde pas à l'aléa survenu sur la parcelle.
- Le risque de base temporel. Le suivi des parcelles de prairies à travers l'indice doit être effectué avec une fréquence d'observation en lien avec la croissance et l'établissement de la production. Si l'indice est indisponible durant la phase de pousse des prairies, il y a de grande chance pour que le risque de base augmente. On peut aussi observer un décalage entre l'occurrence de l'aléa et la détection par l'indice (Wang *et al.*, 2003; Ji et Peters, 2005).
- Le risque de base méthodologique. Si la méthode d'estimation de production n'est pas aboutie, le risque de base sera toujours important. La stabilité et la robustesse de l'indice sont des critères importants pour commercialiser l'indice. Si l'instrument de mesure devient subitement inopérant, il est obligatoire qu'une solution équivalente

puisse fournir l'indice. La disponibilité quasi-immédiate de l'indice est un avantage pour l'éleveur car il est en mesure de percevoir des indemnités rapidement suite à l'aléa climatique. Du point de vue de l'assureur, il dispose d'une vision en temps réel de la situation et il peut facilement faire évoluer la tarification de l'indice d'une année sur l'autre.

1.2.3.2.3. *Typologie des indices*

Les assurances indicielles peuvent fonctionner avec trois types d'indices: les indices basés directement sur des mesures de production (Skees *et al.*, 1997) et des indices indirects utilisant des données climatiques obtenues à partir de stations météorologiques ou des données de télédétection (Vrieling *et al.*, 2014).

Concernant le premier type, une production de référence est mesurée *in situ*. La valeur de l'indice sert de base pour tous les contrats de la zone définie. Les assurances indicielles basées sur des mesures ponctuelles de production sont essentiellement limitées par l'accessibilité à un historique nécessaire pour la tarification du produit et la qualification du risque. De plus, le choix des parcelles ou des exploitations de référence est un biais méthodologique qui peut entraver l'objectivité de la mesure. Ces indices sont souvent exposés à une faible couverture spatiale qui n'est pas assez dense et ne permet pas de détecter les événements climatiques particuliers.

Les indices basés sur des données climatiques utilisent une mesure météorologique, en lien avec le niveau de production de la culture, pour calculer les indemnités perçues par l'éleveur. Il peut s'agir de précipitations, températures, humidité des sols, vents... La qualité des indices climatiques dépend de la distribution spatiale des stations d'enregistrement. Afin de fournir des mesures précises et spatialisées, il est parfois nécessaire d'augmenter leur nombre. La mise en place de nouvelles stations entraîne des dépenses élevées pour l'installation et l'entretien (Hazell et Hess, 2010).

Le troisième type d'indice exploite des données de télédétection pour estimer le niveau de production (Sandmark *et al.*, 2013). La couverture spatiale, la fréquence d'observation, le coût d'acquisition de la donnée et l'objectivité de la mesure sont des caractéristiques favorables pour exploiter de telles sources d'information (Dinku *et al.*, 2008; Makaudze et Miranda, 2010; Chantararat *et al.*, 2013; Potter, 2014).

Les avantages et les limites des trois types d'indices sont présentés dans le Tableau 1-5 selon les critères définis précédemment.

Tableau 1-5. Typologie des approches existantes selon les critères retenus pour apprécier la qualité d'un indice dans un contexte assurantiel.

Critères	Types d'indices		
	Basé sur des données de production	Basé sur des données climatiques	Basé sur des données de télédétection
Quantification du risque	Mesure directe de la production Couverture de plusieurs risques (Multirisque)	Mesure indirecte exclusive du risque climatique	Mesure indirecte de la production Couverture de plusieurs risques (Multirisque)
Disponibilité d'un historique	Disponibilité rare et peu fiable	Historique accessible généralement	Historique disponible sur de larges territoires
Stabilité de l'indice	Bonne stabilité mais dépendant de la méthode d'expertise	Bonne stabilité mais biais possible si changements d'instruments de mesure	Stabilité de l'indice dépendante de la méthode de traitement des données
Facilité de calcul	Acquisition des données longue qui peut retarder l'indemnisation	Acquisition des données rapides Indice facilement calculable Automatisation possible des process de calcul	Acquisition des données rapides Facilité de calcul de l'indice dépendante de la méthode de traitement des données Automatisation possible des process de calcul
Risque de base	Spatial	Potentiellement important selon la densité des mesures utilisées	
	Temporel	Nul car mesure directe de la production	Variable et dépendant de la fréquence d'acquisition des images satellitaires
	Méthodologique	Nul car mesure directe de la production	Potentiellement important car dépendant de la complexité de la méthode de calcul de l'indice
Autres	Coûts de vérification élevés Bonne compréhension de l'indice par les agriculteurs	Coûts de recherche et de développement élevés Limite l'aléa moral	

Source: (Barnett et Mahul, 2007; Hazell et Hess, 2010; Rao, 2010; Kellner et Musshoff, 2011; Sandmark *et al.*, 2013)

1.2.3.3. Apport de la télédétection dans les assurances indicielles

Les avantages offerts par les indices mesurés à partir de données de télédétection (disponibilité d'un historique de données sur de larges étendues, rapidité d'accès aux données et de manière gratuite, automatisation possible du calcul de l'indice) permettent de dépasser en grande partie les limites identifiées pour les deux autres types d'indices (de Leeuw *et al.*, 2014).

Le risque de base reste le principal verrou technologique pour le développement de ces assurances. D'un point de vue spatial et temporel, ce risque est directement dépendant du type d'images satellitaires utilisées. Actuellement, les séries temporelles d'images de moyenne résolution (MR) spatiale offrent la meilleure source de données avec une fréquence d'acquisition élevée à une résolution spatiale hectométrique à kilométrique. Elles permettent un suivi régulier de la croissance des prairies tout au long de l'année à une échelle proche de la taille des parcelles de prairies.

Finalement, le risque de base méthodologique lié à la méthode d'estimation de la production reste le point critique. Le choix de l'indice et de son mode de calcul doivent être des étapes réfléchies et validées.

A ce niveau, deux types d'indices dérivés d'images satellitaires sont utilisés :

- Les indices météorologiques basés sur l'exploitation d'images acquises par des capteurs passifs dans les micro-ondes (PMW : Passive Micro Wave) ou dans l'infrarouge thermique (TIR : Thermal Infra-Red) pour fournir des estimations de précipitations (Dinku *et al.*, 2008) ou d'évapotranspiration (Rosema *et al.*, 2014) ;
- Les indices de végétation, relatifs à l'activité du couvert végétal (Turvey et McLaurin, 2012; Vrieling *et al.*, 2014), basés sur l'exploitation d'images acquises par des capteurs actifs dans le visible et le proche infra-rouge, le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) étant le plus largement utilisé (Rouse *et al.*, 1974).

Le Tableau 1-6 synthétise les avantages et limites des deux types d'indices en fonction des principaux critères de qualité définis.

Tableau 1-6. Avantages et limites des indices météorologiques et des indices de végétation en fonction du risque de base, de la tarification et de l'administration du produit

Critères d'évaluation		Indices météorologiques		Indices de végétation	
		Avantages	Limites	Avantages	Limites
Risque de base	Spatial		Faible résolution spatiale (supérieure au km)	Bonne résolution spatiale (sub-km)	
	Temporel	Fréquence d'acquisition élevée		Fréquence d'acquisition élevée	
	Méthodologique		Méthode de traitement des images complexe avec besoin de calibration locale générant un niveau élevé d'incertitude dans l'évaluation de la production Niveau très variable de corrélation à la production : meilleurs estimations avec micro-ondes seules ou micro-ondes combinées au TIR	Bon niveau de corrélation à la production	Méthode de validation difficile
Tarification du produit		Capteurs TIR : Bonne disponibilité d'historique de données	Capteurs PMW : Historique de données très court	Bonne disponibilité d'historique de données Disponibilité de l'indice en quasi temps réel	
Administration du produit		Disponibilité de l'indice en quasi temps réel	Indice potentiellement difficile à comprendre pour les agriculteurs	Disponibilité de l'indice en quasi temps réel Indice facile à comprendre pour les agriculteurs	

Source: (Ceccato *et al.*, 2008; Dinku *et al.*, 2008; Gruber et Levizzani, 2008; Hellmuth *et al.*, 2009; Burke *et al.*, 2010; Makaudze et Miranda, 2010; Duan *et al.*, 2012; Chantararat *et al.*, 2013; Gommes et Kayitakire, 2013; Meng *et al.*, 2013; Muller *et al.*, 2013; Phillips *et al.*, 2013; Propastin, 2013; Risk Management Agency, 2013; Agriculture Financial Services Corporation, 2014a; Black et Stephen, 2014; Potter, 2014; Rosema *et al.*, 2014).

1.2.3.4. Synthèse des indices utilisés dans les produits opérationnels d'assurance indicielle des prairies.

Dans le cas des prairies, il a été recensé six produits d'assurance indicielle opérationnels, quatre utilisant un indice de végétation (Espagne, Mexique, Province d'Alberta au Canada et Etats-Unis jusqu'en 2015) et deux utilisant un indice météorologique (Etats-Unis à partir de 2016 et Province d'Ontario au Canada).

Le Tableau 1-7 synthétise les caractéristiques des indices utilisés dans les produits opérationnels d'assurances indicielles des prairies.

D'après ce tableau, quatre produits sur six sont basés sur l'indice de végétation NDVI. L'étude des caractéristiques des indices utilisés dans ces produits d'assurance met en exergue leurs limites par rapport à l'enjeu de maîtrise du risque de base, qu'il soit spatial, temporel ou méthodologique :

- Risque de base spatial élevé pour le produit mexicain et les deux produits basés sur des indices météorologiques du fait d'une référence utilisée pour estimer les pertes peu représentative de la situation de l'exploitation sinistrée (densité insuffisante des stations météorologiques et choix des fermes de référence qui est sujet à controverse).
- Risque de base temporel élevé pour les produits américains à cause d'un décalage possible entre la période choisie par l'assuré pour calculer l'indice et l'occurrence de l'aléa.
- Risque de base méthodologique élevé pour l'ensemble des produits. Un facteur explicatif est commun à tous : l'indice développé n'est pas spécifique aux prairies.

Tableau 1-7. Synthèse des caractéristiques des indices utilisés dans les produits opérationnels d'assurance indiciaire des prairies.

Pays	Espagne	Mexique	Etats-Unis	Etats-Unis	Canada	Canada
Date de création	2001	2007	2007	2013	2001	2001
Source du développement Commercialisation	AGROSEGURO	AGROASEMEX	Risk Management Agency (RMA)	Risk Management Agency (RMA)	Agence gouvernementale de la province d'Alberta	Agence gouvernementale de la province d'Ontario (AGRICORP)
Données sources	Images satellitaires MODIS 250 m résolution spatiale (NDVI fourni par l'Université de Valladolid)	Images satellitaires NOAA-AVHRR 1,1 km résolution spatiale (NDVI fourni par Colleague of Post Graduates Studies - COLPOS)	Images satellitaires USG-EROS 8 km résolution spatiale	NOAA Prediction Center - Réseau de stations météorologiques	Images satellitaires NOAA-AVHRR 1,1 km résolution spatiale	Réseau de stations météorologiques fédérales et provinciales
Fréquence d'acquisition	10 jours	Journalière	Journalière	Journalière	8 jours	Journalière
Bénéficiaire	Eleveur individuel	Gouvernement fédéral ou provincial	Eleveur individuel	Eleveur individuel	Eleveur individuel	Eleveur individuel
Unité géographique de calcul de l'indice	Petites régions (<i>comarcas</i>) divisant les Communautés Autonomes	Réseau de fermes de référence	Comté (<i>County</i>)	Mailles de 27km x 27km	Comté (<i>County</i>)	Station météorologique
Indice	NDVI – Non spécifique aux prairies	NDVI – Non spécifique aux prairies	NDVI – Non spécifique aux prairies	Somme de précipitations– Non spécifique aux prairies	NDVI - Non spécifique aux prairies	Somme de précipitations– Non spécifique aux prairies
Méthode d'estimation de la variation de production	Valeur décadaire de NDVI anormalement négative (d'après la franchise choisie) par comparaison à la valeur de référence de cette période. Référence = valeur moyenne décadaire de NDVI entre 2000 et 2009.	Valeur de référence de NDVI corrigée par un facteur dépendant de la quantité d'aliment supplémentaire à acheter pour assurer la production standard d'un animal. Référence = somme annuelle de NDVI de l'année n-1.	Valeur moyenne de NDVI de l'année N par rapport à la valeur de référence de la maille. Référence = valeur moyenne de NDVI pour l'intervalle défini depuis 1989.	Somme des précipitations journalières sur une période de 2 mois (définie par l'assuré) comparée à la valeur de référence. Référence = moyenne de la somme de précipitations sur 1948 - 2013	Valeur hebdomadaire de NDVI anormalement négative par comparaison à la valeur de référence. Référence = moyenne des valeurs hebdomadaires de NDVI de la période entre 2000 et 2009.	Somme des précipitations journalières inférieure à 85% de la valeur de référence. Référence = moyenne de la somme de précipitations depuis 45 ans.
Période de couverture	Divisée en 2 cycles, printemps et automne	Du 1 ^{er} Mai au 30 Novembre	Intervalle de 3 mois	Intervalle de 2 mois	Divisé en 2 cycles : mi-mai – fin juillet et mi-mai – fin août	1 ^{er} mai et le 31 août

Deux autres facteurs sont particuliers aux produits basés sur le NDVI dérivé d'images satellitaires et se traduisent par des problèmes de stabilité temporelle : *i*) la méthode de calcul du NDVI (rapport de bandes spectrales), le rendant sensible aux effets capteurs et aux conditions d'acquisition des images; *ii*) l'existence d'étape de traitement non automatisée, source d'erreur dans la production de série temporelle.

En conclusion, il semble que les indices de végétation soient plus adaptés que les indices météorologiques pour l'assurance des prairies. Du fait des images satellitaires utilisées pour leur calcul, ils couvrent de manière continue spatialement et temporellement les zones assurées.

C'est un avantage pour maîtriser le risque de base spatial et temporel. Ils offrent de meilleures capacités d'estimations de production avec des méthodes de calcul de l'indice moins complexes.

De plus, la comparaison de ces produits permet d'identifier les verrous méthodologiques à traiter pour parvenir à maîtriser le risque de base : *i*) le choix des images satellitaires (compromis entre la résolution spatiale et temporelle) ; *ii*) l'unité géographique de calcul de l'indice ; *iii*) le choix de l'indice de télédétection ; *iv*) la méthode d'estimation de production.

Pour chacun des produits, des options méthodologiques ont été prises compte-tenu des données de télédétection utilisées. L'analyse fait apparaître qu'il n'existe pas une solution unique. L'étape de validation de l'indice est alors primordiale pour mesurer sa qualité.

1.2.4. Le produit d'assurance indicielle des fourrages de Pacifica

Depuis que les pouvoirs publics ont opté pour le transfert progressif vers l'industrie privée de la gestion du risque sécheresse sur les prairies, Crédit Agricole Assurances Pacifica travaille avec la société AIRBUS Defence & Space au développement d'une assurance indicielle.

Les cultures assurables sont les prairies permanentes et temporaires, les légumineuses fourragères, les estives, landes, parcours et alpages.

L'objectif de l'indice utilisé dans le produit d'assurance est de qualifier la variation de la production de fourrage de l'année par rapport à la référence constituée de la production des années précédentes. Pour mesurer cette production fourragère, une méthodologie fournissant un indice adapté aux prairies est nécessaire. Elle est basée sur l'exploitation de série temporelle d'un paramètre biophysique, le fCover, caractérisant la fraction de végétation par

unité de surface et obtenu à partir d'images satellitaires à moyenne résolution spatiale MODIS et MERIS.

1.2.4.1. Principe général de fonctionnement et options méthodologiques choisies

Entre le mois d'octobre de l'année $n-1$ et le 31 janvier de l'année n , l'éleveur choisit une couverture adaptée à son exploitation en ajustant le capital assuré et le niveau de franchise.

Le capital assuré est fixé selon son appréciation, dans une logique de rachat d'aliments en cas d'aléa. Les franchises disponibles varient de 10 à 50 %. L'assuré souscrit un contrat couvrant l'ensemble des parcelles de prairies situées sur les différentes communes.

Entre les mois de février et d'octobre de l'année n , l'indice de télédétection est calculé afin de produire une estimation de la production cumulée de fourrage. Le taux de perte correspond au ratio entre la production de fourrage annuelle et la production moyenne des cinq dernières années, déduction faite de la meilleure et de la plus mauvaise année de la période.

Une indemnisation est perçue par l'éleveur lorsque le niveau de perte mesuré par l'indice dans la commune est supérieur à la franchise choisie. Son montant est calculé selon l'Equation 1-1.

$$\text{Indemnités} = \text{Capital assuré} * (\text{Taux de perte} - \text{Franchise}) \quad 1-1$$

Comme pour les produits existants précédemment décrits, quatre options méthodologiques ont été prises pour développer l'indice de production fourragère utilisé dans le produit d'assurance des prairies de Pacifica.

1) Le choix des images satellitaires. Les images acquises par les capteurs MERIS et MODIS ont été retenues car elles présentent l'avantage d'être temporellement continues (acquisition journalière), gratuites, avec une archive disponible sur 15 ans (depuis 2000) couvrant tout le territoire national.

2) L'unité géographique de calcul de l'indice. La résolution spatiale de 300 m présente l'avantage d'être assez proche de la taille des parcelles de prairies à observer sans toutefois permettre une identification individuelle, condition indispensable à respecter pour gérer l'aléa moral.

3) Le choix de l'indice de télédétection. C'est le paramètre biophysique fCover qui est retenu. Par sa méthode d'obtention (modélisation de la réflectance), il est plus robuste que des indices de végétation type NDVI aux variations de source de données satellitaires (Chen *et al.*, 2011), moins sensible aux conditions d'acquisition des images (voile nuageux, effet sol,

présence de végétation non photosynthétiquement active) (Brown *et al.*, 2006) et il ne sature pas lorsque le couvert végétal est parvenu à son maximum de développement (Paruelo *et al.*, 1997).

4) La méthode d'estimation de production. La méthode d'estimation de la production est spécifique aux prairies (par une méthode de changement d'échelle - désagrégation), simple (correspondant à un cumul annuel de l'indice fCover des prairies sur une période fixe auquel est déduit une valeur correspondante à la part non récoltée/pâturée et sans recours à d'autres données), automatisable et non manipulable.

L'ensemble de la chaîne de traitement de l'Indice de Production Fourragère (IPF) a été présenté dans le cadre de deux conférences :

- Conférence "Les nouveaux outils du Développement Durable" (Paris, Octobre 2013)
- Conférence "Global Vegetation Monitoring and Modeling" (Avignon, Février 2014)

Dans ce qui va suivre, nous en détaillons les principales étapes en mettant en évidence les verrous méthodologiques identifiés comme sources potentielles d'erreur d'évaluation de la perte de production fourragère.

1.2.4.2. Descriptif de la chaîne de traitement de production de l'Indice de Production Fourragère

La chaîne complète de traitement de l'IPF est présentée dans la Figure 1-5. Chaque étape est ensuite détaillée dans le texte.

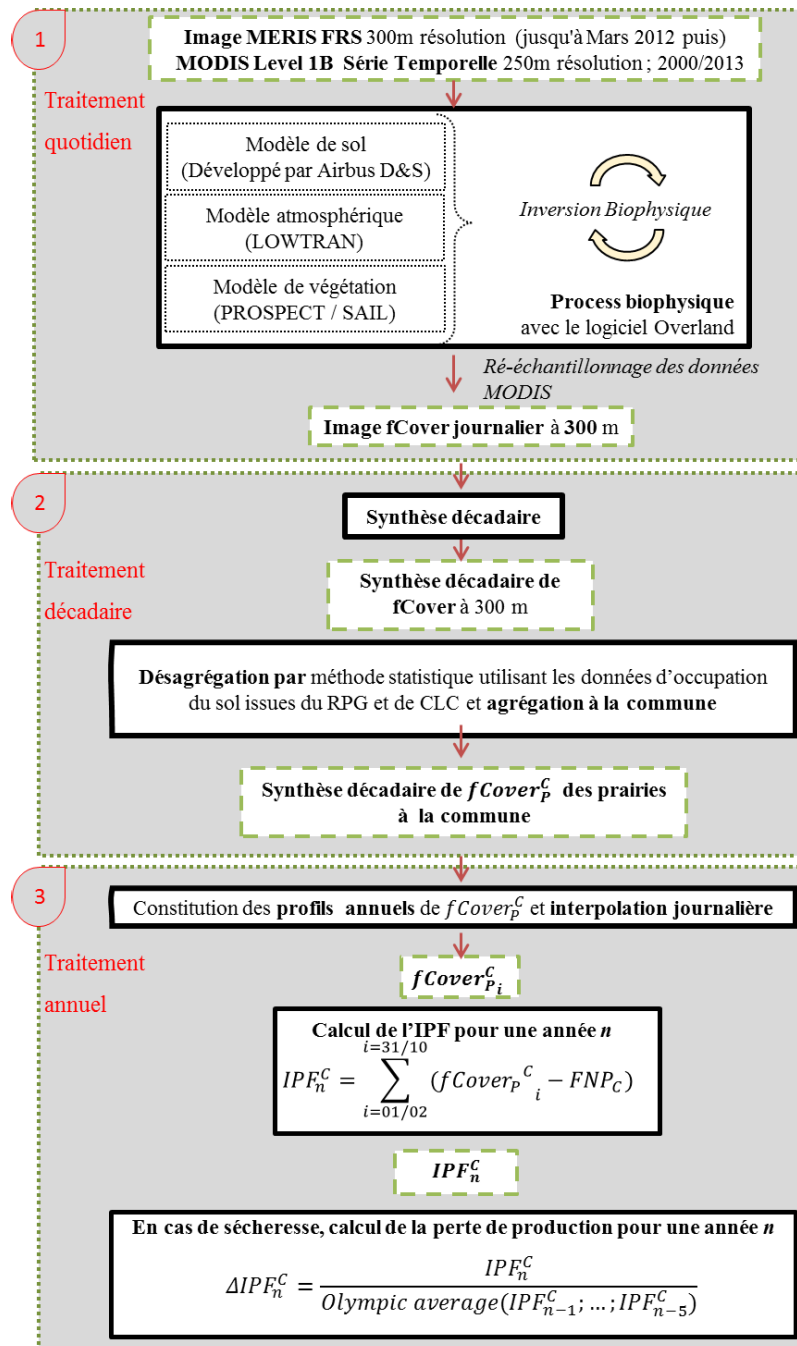


Figure 1-5. Chaîne de traitement de l'IPF mise en place par Airbus Defence & Space.

1.2.4.2.1. Etape 1 - Génération du fCover : d'un pixel MR de réflectance journalière à un pixel MR de fCover journalier

Le fCover est obtenu à partir d'une inversion d'un modèle de transfert radiatif (Poilvé, 2010a). Cela consiste à modéliser la réflectance de la végétation dans le domaine du visible et de l'infrarouge en minimisant les écarts entre les réflectances simulées et observées par le

satellite (technique d'optimisation basée sur une procédure itérative de Gauss-Newton). Dans cette approche, les caractéristiques des capteurs, les conditions d'observation et d'illumination sont intégrées afin d'apprécier correctement l'énergie lumineuse réfléchie par l'objet observé.

La réflectance mesurée est fonction du couvert végétal et du sol, perturbée par l'atmosphère, et décrite dans les bandes du capteur de télédétection. Aussi, le modèle de transfert radiatif est en fait constitué de plusieurs modèles, construits à partir d'équations basées sur des propriétés physiques de la lumière (Estève, 1998) :

- Un modèle pour les effets atmosphériques, le modèle LOWTRAN ("Low Resolution Transmission") (Kneizys *et al.*, 1988).
- Deux modèles pour les effets liés au couvert végétal, le modèle PROSPECT ("Model of leaf optical Properties Spectra") (Jacquemoud et Baret, 1990) et le modèle SAIL ("Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves") (Verhoef, 1984; Jacquemoud *et al.*, 2009).

La société AIRBUS Defence & Space a développé une solution pour appliquer ce processus biophysique aux images de télédétection (Overland), validée dans le cadre du projet geoland-2 (Poilvé, 2010a). La démarche choisie reprend les trois modèles présentés ci-dessus, avec une modification dans le modèle PROSPECT par l'ajout, dans la description de la végétation, de la contribution de la partie non photosynthétique (i.e. sèche).

Le modèle contient en fait deux composantes, l'une de végétation verte, l'autre de végétation sèche, paramétrées indépendamment, afin de caractériser les différents types de végétation que peut contenir un pixel de moyenne résolution spatiale. Un quatrième modèle est couplé pour prendre en compte la réponse spectrale spécifique du sol. Pour cela, une observation locale du sol nu permet de reconstruire son spectre dans les différentes longueurs d'onde du visible et de l'infrarouge. Cette référence, obtenue à partir d'une image, peut varier spatialement et temporellement selon les conditions locales d'humidité et de rugosité du sol.

L'inversion biophysique avec Overland est exécutée avec des images de luminance en entrée. Elle est conduite deux fois avec des paramètres différents permettant de discerner les pixels dits "non valides" contenant des éléments d'eau ou des nuages et les pixels dits "valides" correspondant à des surfaces terrestres (sol nu ou végétation) et pour lesquels uniquement seront uniquement conservés les paramètres biophysiques estimés en sortie (Poilvé, 2010b) . La Figure 1-6 illustre la solution d'AIRBUS Defence & Space pour la génération du fCover.

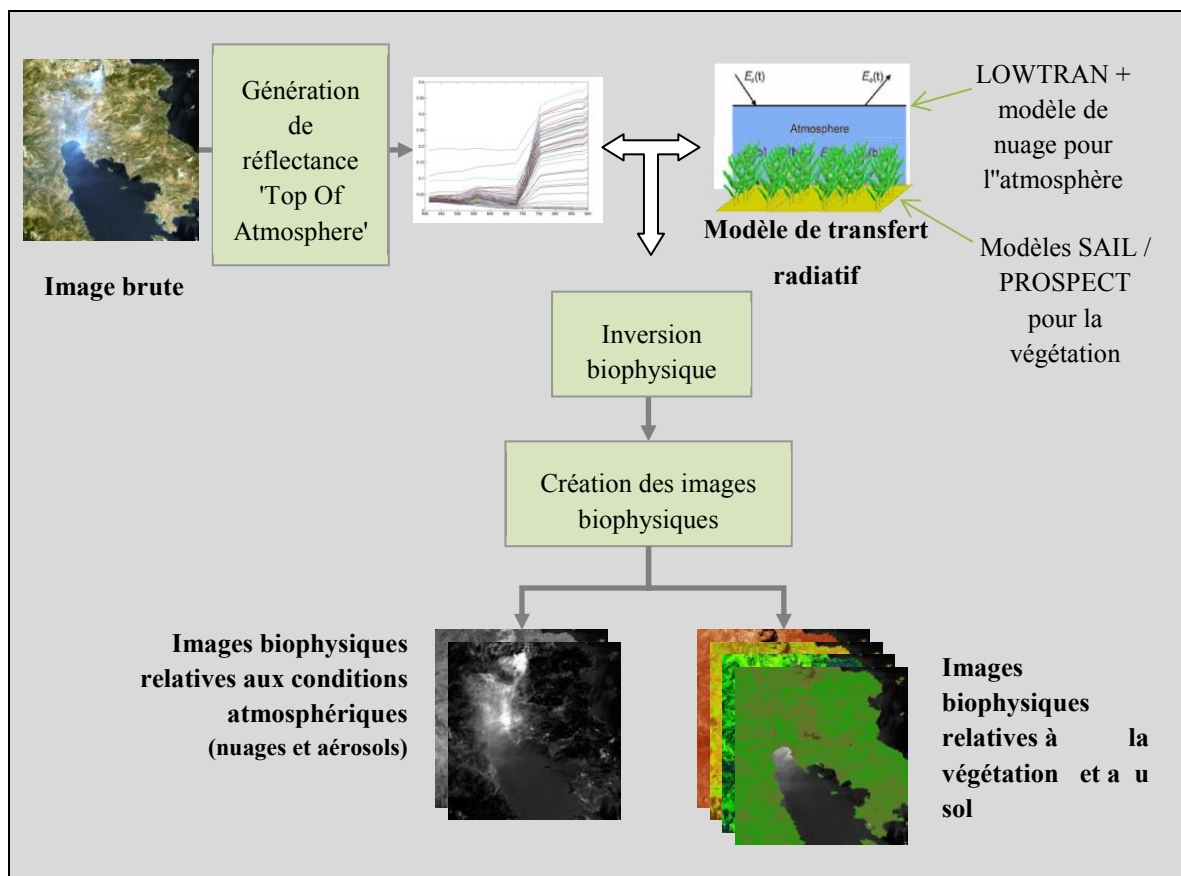


Figure 1-6 : Illustration de la solution AIRBUS Défense & Space pour la génération du fCover.
Source : (Poilvé, 2010a)

Dans le cadre du développement de l'IPF, les images satellitaires utilisées pour la production du fCover sont des images journalières de luminance acquises par les capteurs MERIS puis MODIS (suite à la perte de contrôle du satellite ENVISAT en Avril 2012), présentant une résolution spatiale de 300 m (ré-échantillonnage des images MODIS à la résolution des images MERIS pour conserver une donnée homogène) et avec une archive disponible depuis le 1^{er} janvier 2003. Les caractéristiques des capteurs MODIS et MERIS sont présentées dans le Tableau 1-8.

Tableau 1-8. Caractéristiques des capteurs MODIS et MERIS.

Produits	MODIS => MOD02	MERIS Full Resolution Full Swath => ENVISAT.MER.FRS_1P
Bandes spectrales	Produits de niveau L1B de luminances calibrées MOD02: B1 : 620 - 670 nm B2 : 841 - 876 nm B3 : 459 - 479 nm B4 : 545 - 565 nm B5 : 1230 - 1250 nm B6 : 1628 - 1652 nm B7 : 2105 - 2155 nm	B1 : 407 - 417 nm B2 : 437 - 447 nm B3 : 485 - 495 nm B4 : 505 - 515 nm B5 : 555 - 565 nm B6 : 615 - 625 nm B7 : 660 - 670 nm B8 : 677 - 685 nm B9 : 704 - 714 nm B10 : 750 - 7575 nm B11 : 758 - 7625 nm B12 : 771 - 786 nm B13 : 855 - 875 nm B14 : 880 - 890 nm B15 : 895 - 905 nm
Résolution spatiale	B1 et B2 : 250m B3 à B7 : 500m	B1 à B15 : 300m
Revisite	Quotidienne	2 jours
Fauchée	2330 km	1150 km
Emprise	1200 km x 1200 km	296 km x 296 km
Orthorectification	Logiciel MRTSwath (Land Processes Distributed Active Archive Center, 2010) + Métadonnées de géolocalisation des images à 1 km de résolution spatiale (MOD03)	Logiciel Amorgos

Source : (NASA; Bourq et Etanchaud, 2007; Land Processes Distributed Active Archive Center, 2010; European Spatial Agency, 2014)

1.2.4.2.2. *Etape 2 - Traitement du fCover : d'un pixel MR de fCover journalier à une valeur décadaire de fCover spécifique aux prairies d'une commune*

Les données obtenues en sortie du processus d'inversion biophysique sont des images journalières de fCover à 300 m de résolution spatiale.

La couverture nuageuse sur ces images peut être importante, diminuant ainsi la quantité de pixels exploitables. Pour limiter ce problème, un procédé de synthèse d'images journalières

est appliqué selon la méthode Maximum Value Composite (Holben, 1986). Pour un pixel donné et sur une période de dix jours, les valeurs journalières de fCover sont comparées pour ne conserver que la plus grande dans l'image de synthèse. Le choix d'une période de dix jours est un bon compromis pour obtenir une caractérisation de qualité des couverts végétaux malgré la couverture nuageuse tout en conservant une fréquence d'acquisition suffisamment élevée pour suivre la dynamique de la végétation (Holben, 1986; Swain *et al.*, 2011).

Cependant, compte-tenu des paysages agricoles en France, l'utilisation d'images MR induit la nécessité de gérer des pixels dits mixtes. La valeur de fCover observée dans un pixel de 300 m résulte de l'intégration des valeurs de fCover des types d'occupation du sol présents dans le pixel.

Pour chaque décade, afin d'estimer le fCover spécifique aux prairies, un traitement statistique de désagrégation est réalisé (Faivre et Fischer, 1997; Atzberger *et al.*, 2014). En s'appuyant sur une connaissance a priori de l'occupation du sol à haute résolution, cette méthode estime la contribution de chaque type d'occupation du sol (OS) sur la mesure de fCover mixte.

Pour chaque pixel mixte, une équation est définie, du type : $fCover\ mixte = fCover\ OS_1 + \dots + fCover\ OS_k$. Afin de résoudre ce système d'équation et d'obtenir le fCover de chaque type d'occupation, il est nécessaire d'avoir un nombre d'équation (unité spatiale) au moins égal au nombre de variable (fCover des types d'occupation du sol). Par conséquent, l'utilisation de la désagrégation s'accompagne d'un changement d'échelle spatiale.

Dans le cas présent, un maillage a été créé sur la zone de couverture du produit d'assurance dans le but d'associer une observation de fCover mixte à des pourcentages d'occupation du sol. Comme illustré sur la Figure 1-7, quatre pixels sont groupés dans une unité de traitement (UT) de 600 m x 600 m (soit 36 ha). Puis, 100 UT constituent une maille de 6 km x 6 km (soit 3600 ha), unité à laquelle le fCover spécifique aux types d'occupation du sol est disponible.

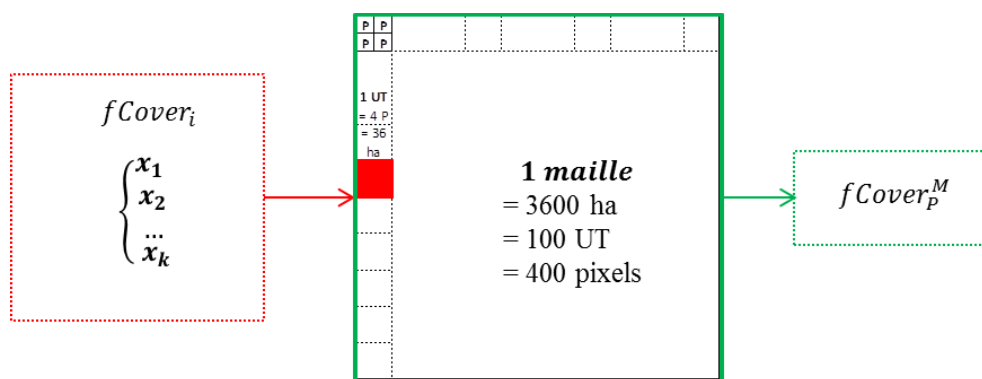


Figure 1-7. Illustration des pixels, unités de traitement, mailles et des valeurs de fCover associées.

Pour chaque UT, deux informations sont calculées :

- Une valeur de $fCover_i$ (variable par décade i) correspondant à la valeur moyenne de fCover des 4 pixels composant l'UT.
- Le pourcentage de chaque type d'occupation du sol (variable annuellement). Cette information provient d'une base de données de couverture du sol, présentée dans le Tableau 1-9, constituée à partir du Registre Parcellaire Graphique (RPG) et, complétée pour les zones non couvertes par Corine Land Cover version 2006 (CLC06).

L'Equation 1-2 illustre la relation entre la valeur de fCover de chaque type d'occupation k du sol d'une maille M ($fCover_{i,k}^M$), les proportions d'occupation du sol par type (x_k) et la valeur de fCover mixte observé par UT ($fCover_i$).

$$fCover_i = \sum_{k=1}^p x_k \times fCover_{i,k}^M + \varepsilon_i \quad 1-2$$

avec, p correspondant au nombre total de type d'occupation du sol k et ε correspondant au terme d'erreur de mesure.

La valeur désagrégée de $fCover_{i,k}^M$ avec $k = \text{Pairies}$ (notée $fCover_{i,p}^M$) s'obtient par la résolution du système de 100 équations correspondantes aux 100 UT d'une maille grâce à une pseudo-inversion Moore-Penrose¹.

¹ L'application de cette méthode nécessite de faire l'hypothèse que *i*) la valeur de fCover d'un type d'occupation du sol au sein d'une maille est la même pour tous les objets de ce type d'occupation du sol (espèces et stade de développement identiques) ; *ii*) les erreurs de mesure sont indépendantes avec une loi de distribution Gaussienne $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$.

Tableau 1-9. Source de données pour la constitution de la base de couverture des occupations du sol.

Nom des données	RPG	Corine Land Cover 2006
Constitution de la base de données	A partir des déclarations PAC des agriculteurs	Photo-interprétation réalisée à partir d'images satellitaires en s'appuyant sur d'autres données exogènes (BD ORTHO® IGN, SCAN 25®, Google-Earth, GeoPortail)
Mise à jour	Annuelle	Tous les 6 ans (2000-2006-2012)
Nombre de classe	28 classes agricoles	44 classes
Classe "Prairies"	"Prairies naturelles", "Prairies temporaires" et "Landes et parcours"	"Prairies", "Systèmes culturaux et parcellaires complexes", "Pelouses et pâturages naturels" et "Landes et broussailles"
Remarques	Informations sur le nombre et la surface des cultures par îlot. Couverture non exhaustive.	L'échelle de travail choisie pour la production de ces données est de 1/100 000 ^{ème} , la plus petite unité cartographiée est de 25 ha et la nomenclature est standardisée entre les années et les pays européens.
	La base de données Corine Land Cover 2006 est uniquement utilisée pour renseigner les zones non couvertes par le RPG.	

Source : (Ministère de l'Écologie, 2015)

Pour simplifier la gestion des contrats, un changement d'unité géographique du $fCover_{i,P}^M$ est effectué en passant des mailles aux communes. Toutes les parcelles de prairies situées dans une même commune se voient attribuer la même valeur de $fCover_{i,P}^C$ des prairies (P) de la commune (C).

Pour chaque décade i , la valeur des prairies (P) de la commune (C), $fCover_{i,P}^C$, correspond à la moyenne pondérée des valeurs de $fCover_{i,P}^M$ en fonction de la surface de prairies dans chaque maille couvrant la commune. Des communes présentent des valeurs manquantes de $fCover_{i,P}^C$ à cause d'une couverture nuageuse persistante sur plusieurs jours consécutifs ou d'une majorité de mailles avec une faible proportion de prairies (inférieure à 15%). Pour pallier ce problème, les valeurs de $fCover_{i,P}^R$ calculées à l'échelle des régions fourragères (correspondant à un regroupement de communes présentant des caractéristiques stationnelles similaires) sont utilisées (Hentgen, 1982).

Appliquée à toutes les décades d'une année, cette deuxième étape de traitement du fCover permet de générer pour chaque commune une série temporelle de synthèses décadaires de fCover spécifique aux prairies ($fCover_{i,p}^C$).

1.2.4.2.3. *Etape 3 - Calcul de l'indicateur de production fourragère : de la valeur décadaire de fCover spécifique aux prairies d'une commune à l'indicateur annuel de production des prairies*

L'IPF correspond à l'accumulation de la biomasse produite quotidiennement entre le 1^{er} février et le 31 octobre de l'année. Cette période est considérée comme représentative de la production annuelle des prairies en France (Ruget *et al.*, 2006).

Les valeurs journalières de $fCover_{i,p}^C$, sont obtenues en lissant par moyenne mobile la série temporelle des synthèses décadaires de $fCover_p^C$. Une fraction non productive (FNP_C) est soustraite à la valeur journalière de $fCover_{i,p}^C$. Cette valeur est définie localement à partir du retraitement des données de production fournies par Agreste à l'échelle départementale. Elle correspond à la fraction de biomasse qui n'est pas récoltable et qui ne sera pas valorisée lors de l'exploitation de la prairie. Ainsi, l'intégrale du profil journalier de $fCover_{i,p}^C$ est utilisée pour estimer la production annuelle de biomasse des prairies de la commune C (Equation 1-3).

$$IPF_n^C = \sum_{i=01/02}^{i=31/10} (fCover_{i,p}^C - FNP_C) \quad 1-3$$

En cas d'événement de sécheresse, basé sur les recommandations de l'Union Européenne (Commision, 2011; Finger et El Benni, 2014), le taux de perte subie par l'éleveur de la commune C correspond au ratio entre la valeur annuelle d' IPF_n^C et la moyenne Olympique des IPF_n^C des cinq dernières années (moyenne des cinq valeurs en supprimant les deux valeurs extrêmes) (Equation 1-4).

$$\Delta IPF_n^C = \frac{IPF_n^C}{\text{Moyenne Olympique } (IPF_{n-1}^C; \dots; IPF_{n-5}^C)} \quad 1-4$$

La valeur de ΔIPF_n^C , assimilée comme étant le taux de variation de la production fourragère, entre directement dans le calcul de l'indemnité. Il correspond au *Taux de pertes* apparaissant dans l'Equation 1-1 (p. 44).

1.3. Objectifs et structure de la thèse

Compte tenu des spécificités de l'assurance indicielle des prairies développée par Pacifica et Airbus D&S et présentée dans le paragraphe précédent, trois objectifs méthodologiques relatifs à l'indice de production fourragère utilisé pour estimer les pertes en cas de sécheresse sont apparus.

Le premier concerne la validation du choix de l'information issue des images satellitaires pour suivre la production fourragère des prairies, le deuxième la définition d'une méthode de validation de l'indice de production fourragère et le troisième l'exploration d'une approche alternative de calcul de cet indice pour améliorer sa qualité d'estimation.

- **Objectif 1 : Valider le choix de l'information issue des images satellitaires pour le suivi de la production fourragère des prairies.**

Actuellement, pour suivre la production fourragère des prairies, il n'existe pas de consensus pour déterminer l'information à exploiter des images satellitaires dans les domaines du visible et du proche infrarouge. Deux axes de recherche se distinguent.

Axe 1) L'exploitation d'indices de végétation basés sur des combinaisons linéaires ou des rapports de bandes spectrales. Il s'agit de l'approche historique fournissant le plus de références bibliographiques. Parmi les indices de végétation, le NDVI reste le plus largement utilisé par les solutions d'assurances existantes à ce jour pour les avantages suivants. Il est simple d'utilisation. Il caractérise bien l'activité photosynthétique de la végétation. Il est insensible aux ombres dans la canopée (Huete *et al.*, 1999; Pettorelli *et al.*, 2005). Cependant, il est dépendant du niveau de traitement de la donnée (Rowley *et al.*, 2007) et des caractéristiques du capteur utilisé (Chen *et al.*, 2011; Gao *et al.*, 2013). Il sature dès lors que le couvert végétal atteint un développement important (Gu *et al.*, 2013). Il est sensible aux voiles nuageux, à la couleur des sols et à la présence de végétation non photosynthétiquement active (Trishchenko *et al.*, 2002; Brown *et al.*, 2006; Miura *et al.*, 2006; van Leeuwen *et al.*, 2006).

Axe 2) L'exploitation directe des réflectances en utilisant des modèles de transfert radiatif pour générer des paramètres biophysiques relatifs à l'état du couvert végétal. Cette approche est plus récente et tend à supplanter la première. En effet, les paramètres biophysiques visent à une mesure précise et vérifiable des caractéristiques de la végétation (Asner *et al.*, 1998a). Ils sont stables dans le temps et robustes aux variations de capteurs et aux conditions d'acquisition des images. Ils présentent un plus grand potentiel pour suivre la végétation dans

les écosystèmes prairiaux (Baret et Weiss, 2010; Chen *et al.*, 2010; Meroni *et al.*, 2014a). Mais la complexité de mise en œuvre des processus d'inversion biophysique explique leur utilisation limitée (Dorigo *et al.*, 2007).

Dans ce travail, les développements méthodologiques ont été concentrés sur l'axe 2 et sont présentés dans le chapitre 3. Parmi les paramètres biophysiques intéressants pour suivre la production de biomasse, il en existe deux types selon qu'ils peuvent être utilisés seuls ou en combinaison avec des variables météorologiques (Baret *et al.*, 2007).

- *Les paramètres biophysiques utilisés seuls.* Il s'agit principalement de la fraction de couvert vert (fCover) et de la surface foliaire par unité de surface de sol (LAI).
- *Les paramètres biophysiques utilisés en combinaison avec des variables météorologiques.* La fraction de rayonnement photosynthétiquement actif (fAPAR) est le plus utilisé. D'après les travaux de modélisation de Monteith, ce paramètre doit être utilisé avec une information concernant le rayonnement pour estimer une production de biomasse (Monteith, 1972; Monteith et Moss, 1977). Si ce deuxième type de paramètre biophysique semble fournir de meilleures estimations de production, une des principales limites à leur utilisation réside dans l'accessibilité à une donnée spatialisée de rayonnement de qualité.

Notre objectif consiste donc à valider le choix du fCover comme information issue des images satellitaires pour suivre la production fourragère des prairies, en le comparant à la fAPAR seule ou en combinaison avec le rayonnement. Pour cela, un jeu de parcelles de prairies présentant une variabilité en termes d'espèces fourragères, de temps d'implantation, de modes d'exploitation et pour des conditions climatiques différentes a été constitué.

Les paramètres biophysiques ont été mesurés sur des images satellitaires à haute résolution spatiale (HR). Les résultats doivent permettre de quantifier les niveaux de précision atteints dans l'estimation de production fourragère avec les deux paramètres biophysiques et d'identifier les limites de la méthode utilisée pour calculer l'indice de production fourragère.

- **Objectif 2 : Définir une méthode de validation de l'indice de production fourragère produit à partir d'images satellitaires à moyenne résolution spatiale.**

La validation d'information issue d'images satellitaires à moyenne résolution spatiale consiste à comparer cette information à des données dites de référence (Justice *et al.*, 1998a). Les principaux problèmes résident dans la définition de la donnée de référence à acquérir (donnée indépendante) et dans la gestion du changement d'échelle spatiale entre cette donnée de référence et l'information satellitaire (stratégie d'échantillonnage) (Baret *et al.*, 2006).

Deux techniques de validation existent : *i*) la comparaison directe entre la donnée de référence et l'information satellitaire MR (Zhang *et al.*, 2006), et *ii*) la comparaison indirecte (Baret *et al.*, 2006; Morissette *et al.*, 2006). Ces techniques ne s'opposent pas. Elles n'apportent pas la même information. Pour la première, la donnée de référence correspond à des mesures *in-situ* (prélèvements d'herbe, mesures avec herbomètre et capteurs mobiles, tours à flux...) (Justice *et al.*, 2000). La nature indépendante de la donnée de référence utilisée confère aux résultats de validation obtenus une bonne acceptabilité. Cependant, sa mise en œuvre est souvent géographiquement limitée (Garrigues *et al.*, 2008). Selon la résolution spatiale des images satellitaires MR traitées, le nombre de données de référence à acquérir peut être très important. Le travail de collecte de données devient alors très coûteux en temps et/ou en moyens humains (Tian *et al.*, 2002a).

Dans ce contexte, la méthode de comparaison indirecte apparaît complémentaire. Elle consiste à valider le lien entre des données de référence acquises *in-situ* et l'information à valider mesurée sur des images satellitaires HR (Baret *et al.*, 2005). Ensuite, cette dernière est considérée comme la donnée de référence servant à son tour à valider l'information satellitaire MR. Avec cette méthode, les zones validées sont plus étendues. Cependant, l'acceptabilité des résultats obtenus n'est pas aussi bonne que dans le cas d'une comparaison directe. Elle suppose en effet que l'information produite à partir des images HR puisse être considérée comme une référence.

Notre objectif consiste à proposer une méthode de validation de l'indice de production fourragère en combinant les deux techniques et, à la mettre en œuvre sur un jeu de données constitué pour la circonstance.

Ces travaux sont présentés dans le chapitre 4. Les résultats doivent permettre de qualifier la capacité de l'IPF à estimer la production annuelle des prairies et ses variations interannuelles et d'identifier les sources potentielles d'erreur dans la chaîne de production de l'indice.

- **Objectif 3 : Explorer une approche alternative de calcul de l'indice de production fourragère.**

Trois approches se distinguent pour modéliser la production en agriculture (Delécolle *et al.*, 1992).

i) L'approche empirique, basée sur des modèles statistiques (équations de régression), utilise des variables relatives aux conditions climatiques (précipitations, températures, évapotranspiration potentielle) ou à l'activité photosynthétique de la végétation, de manière moyennée ou agrégée sur des périodes de temps définies pour estimer la production (Meroni *et al.*, 2014a). Les séries temporelles d'indices de végétation comme le NDVI, issues d'images satellitaires à moyenne ou basse résolution spatiale, constituent une source de données très largement employée pour une application à large échelle (Running *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2007). Dans cette approche, les modèles sont facilement mis en œuvre, mais nécessitent des travaux importants de calibration rendant leur domaine de validité restreint aux zones géographiques et/ou aux conditions climatiques considérées pour leur développement (Di Bella *et al.*, 2009; Meroni *et al.*, 2013b; Jin *et al.*, 2014; Rossini *et al.*, 2014).

ii) L'approche mécaniste fait appel à des modèles (équations déterministes) décrivant les mécanismes physiologiques impliqués dans la fonction de croissance de la végétation (photosynthèse, respiration...) et les interactions avec les facteurs environnementaux sous-jacents (humidité des sols, ressources nutritives...) (Di Bella *et al.*, 2004; Courault *et al.*, 2010).

Selon la méthode d'intégration des données de télédétection choisie, les images satellitaires HR servent de source de données pour mettre à jour (forçage) ou pour ré-estimer dans un modèle (assimilation) les variables d'état de la végétation (Launay et Guerif, 2005; Dumont *et al.*, 2012). Dans cette approche, les modèles sont bien adaptés pour une application à l'échelle de la parcelle (Cayrol *et al.*, 2000; Nouvellon *et al.*, 2001; Bsaibes *et al.*, 2009; Courault *et al.*, 2010).

Cependant, le grand nombre de données requises pour leur mise en œuvre reste le principal facteur limitant à leur utilisation à une échelle régionale ou globale.

iii) L'approche semi-empirique regroupe des modèles présentant une structure intermédiaire entre les modèles statistiques et mécanistes (Delécolle *et al.*, 1992). Ils sont développés

d'après une approche empirique mais contiennent aussi des variables agrométéorologiques pour modéliser par des équations simplifiées les mécanismes physiologiques et biologiques conditionnant la croissance de la végétation (Potter *et al.*, 1993; Seaquist *et al.*, 2003; Gilabert *et al.*, 2015).

La quasi-totalité des assurances indicielles des prairies existantes s'appuie sur une approche empirique dans laquelle l'indice estimant les pertes de production fourragère est calculé à partir d'informations extraites de séries temporelles d'images satellitaires. Si cette approche semble faire consensus, les résultats de validation montrent, lorsqu'ils existent, que des améliorations des modèles empiriques sont possibles pour minimiser les erreurs d'estimation. C'est le cas pour le produit d'assurance des prairies de Pacifica.

Notre objectif est d'explorer une approche semi-empirique pour proposer un modèle d'estimation de production des prairies, toujours basé sur une information extraite de séries temporelles d'images satellitaires (indice de végétation ou paramètre biophysique), et intégrant des variables météorologiques sur le principe d'efficacité d'utilisation de la lumière proposé par Monteith (Monteith et Moss, 1977). Ces travaux sont présentés dans le chapitre 5 de ce document.

Dans le chapitre 2, nous présentons les sites d'étude et les données utilisées pour répondre aux objectifs précédemment définis. Les résultats obtenus dans le cadre des démarches de validation de l'indice de production fourragère présentés dans les chapitres 3 et 4 servent à quantifier la qualité d'estimation du modèle actuel et à identifier des voies d'amélioration possibles développées dans le chapitre 5. La dernière partie, consacrée aux bilans des travaux réalisés, est construite en deux temps. Tout d'abord, la discussion est axée par rapport aux contributions méthodologiques et thématiques de la thèse. Dans un second temps, nous présentons les travaux qui pourraient être poursuivis dans le cadre de l'amélioration continue de l'IPF. Puis nous identifions de nouvelles perspectives de recherche, soit au niveau de l'IPF, soit au niveau des produits d'assurances indicielles et de leur potentiel d'application pour les prairies.

Deuxième partie

Sites d'étude et données

Chapitre 2 : Sites d'étude et données

Dans le chapitre 2, nous présentons de façon détaillée les sites d'étude et les données utilisées pour répondre aux objectifs définis et faisant l'objet des chapitres 3, 4 et 5. Ces informations viennent en complément des descriptions faites dans les articles des chapitres suivants. Dans le chapitre 3, les informations produites à partir de mesures *in situ* sont considérées comme des références. Elles servent à l'évaluation des résultats obtenus à partir des images satellitaires HR. En revanche, dans les chapitres 4 et 5, les informations issues des images satellitaires MR sont validées à partir soit des deux sources de données, mesures *in situ* et images satellitaires HR (chapitre 4), soit de données issues de modélisation (chapitre 5).

2.1. Sites d'étude et données : validation de l'indice de production fourragère produit à partir de données satellitaires haute résolution spatiale

Les données présentées ci-dessous sont utilisées dans le chapitre 3 pour répondre au premier objectif de la thèse : "Valider le choix de l'information issue des images satellitaires pour le suivi de la production fourragère des prairies".

2.1.1. Sites d'étude

La validation de l'indice de télédétection a été réalisée sur un ensemble de six parcelles de prairies localisées dans la région toulousaine (Figure 2-1). Le protocole a été mis en place en 2012 sur la parcelle 2, située sur le site de l'Ecole d'Ingénieurs de Purpan. Il a été étendu en 2013 à cinq autres parcelles (Figure 2-1). Pour ces deux années, le protocole a été mis en œuvre durant les mois de mars à juin uniquement afin de suivre la production printanière. Ce choix méthodologique s'explique par :

- L'importance que revêt la pousse printanière en termes de quantité et de qualité au regard des autres périodes de l'année puisque les trois-quarts de la production peuvent être réalisés au printemps (Pottier *et al.*, 2012).
- Le coût financier que représente l'acquisition d'images HR. Le nombre d'image nécessaire pour créer une série temporelle sur une année complète avec une fréquence d'acquisition suffisamment importante (une image tous les 20 jours au moins) pour suivre correctement le cycle phénologique des prairies entraînerait des dépenses importantes.
- La difficulté à identifier des parcelles de prairies exclusivement destinées à la fauche toute l'année. Dans la plupart des cas, les éleveurs présents autour de Toulouse

fauchent une première fois les prairies au printemps puis les font pâturer le reste de l'année.

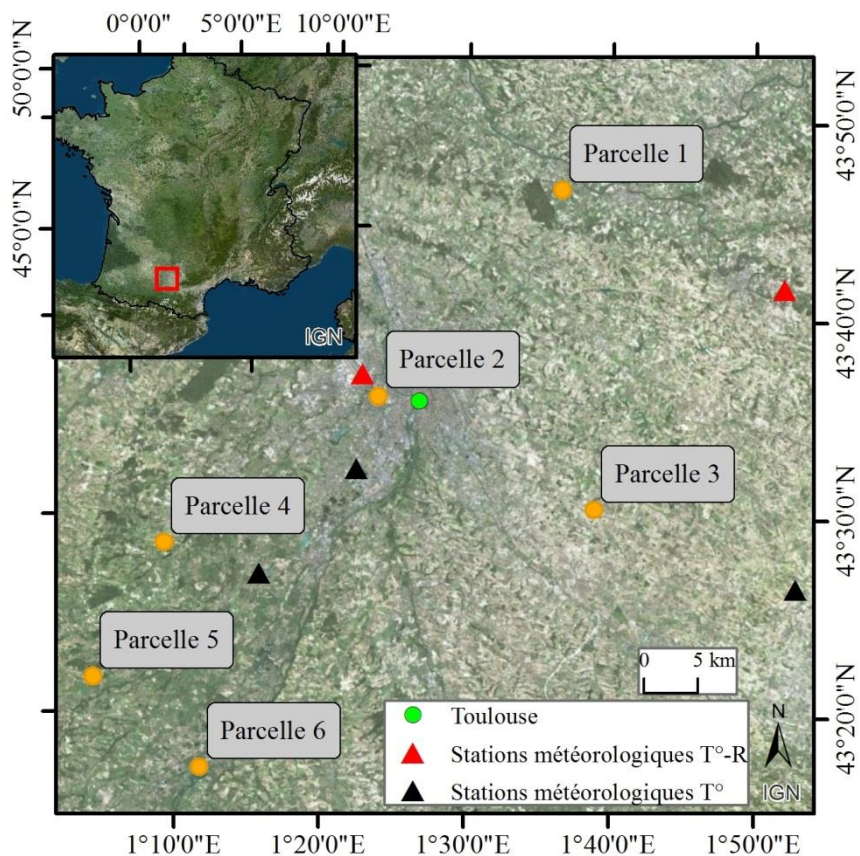


Figure 2-1. Localisation des parcelles de prairies étudiées et des stations météorologiques utilisées pour caractériser les conditions climatiques locales (T°: température; R: rayonnement).

Du point de vue des conditions climatiques, les années 2012 et 2013 se distinguent essentiellement par les quantités de précipitations et les températures au cours des mois de janvier à mars. L'hiver et le début de printemps 2012 sont secs avec des températures minimales négatives en février. En mars, mai et juin, les températures sont supérieures en 2012 ce qui contribue à accentuer le déficit de précipitations de cette année. En 2013, la pluviométrie est largement excédentaire aux mois de janvier (133 mm en 2013 pour 25 mm en 2012) et février (63 mm en 2013 pour 6 mm en 2012). Cette tendance, bien qu'atténuée, est aussi observée en mars puis les différences s'estompent au cours des mois suivants.

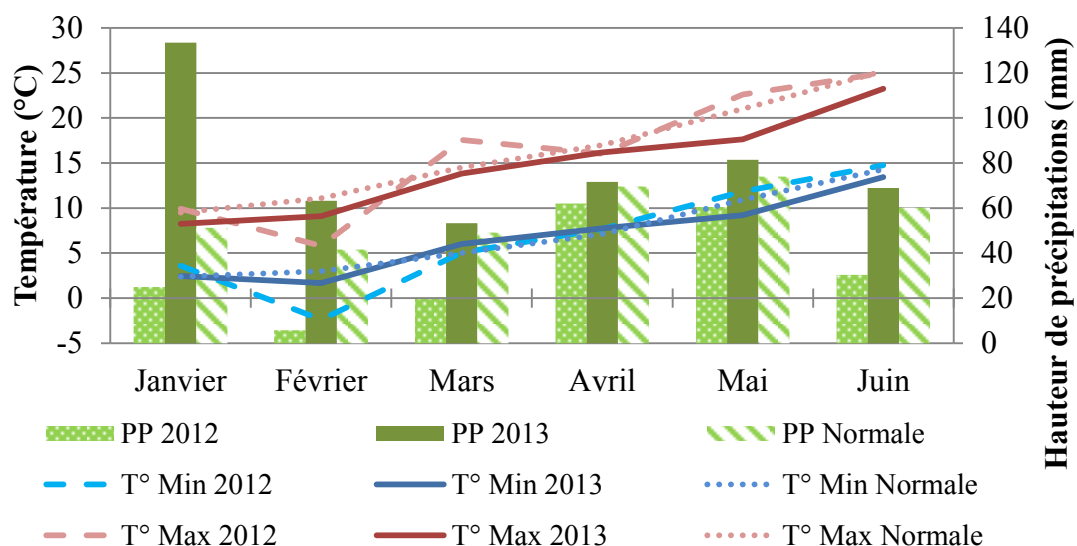
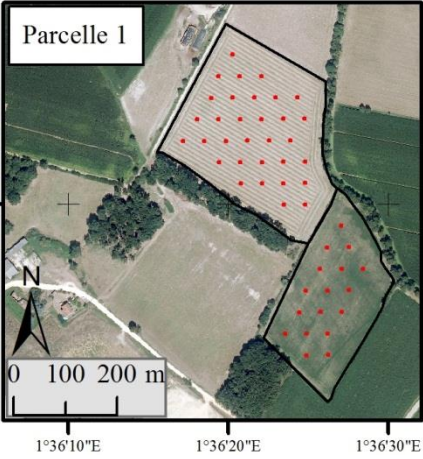
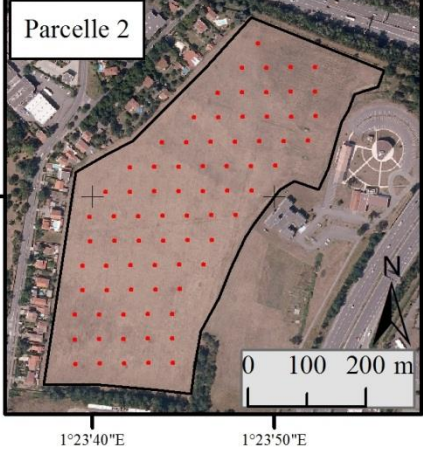
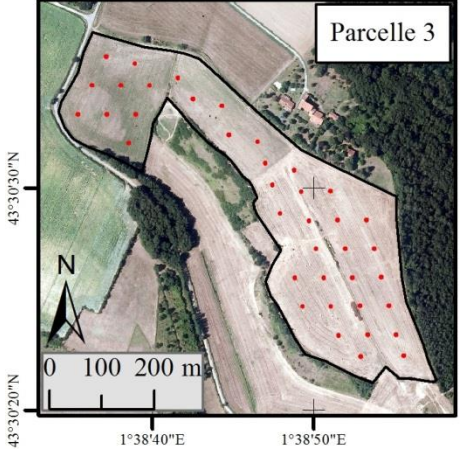
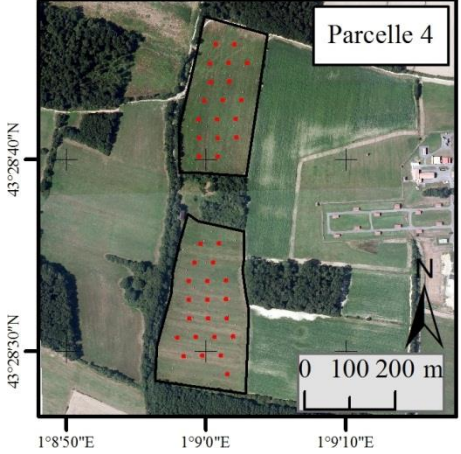


Figure 2-2. Diagramme ombrothermique du premier semestre des années 2012 et 2013 et des normales (période 1981-2010). Les données de précipitations (PP) et de températures (T°) proviennent de la station météorologique de Blagnac.
Source : (MétéoFrance)

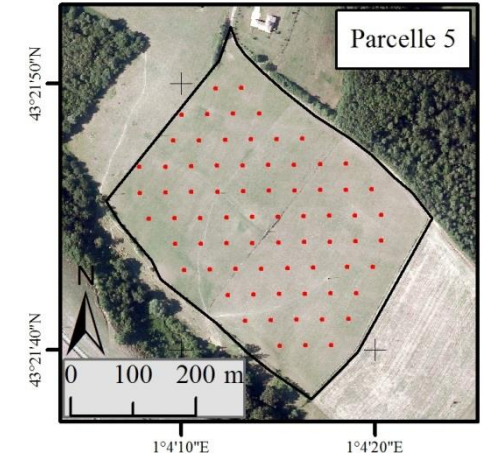
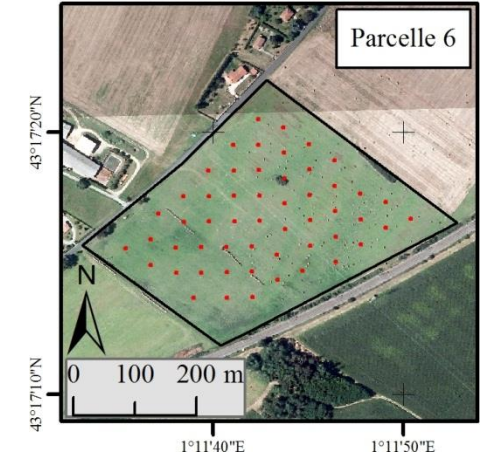
Le Tableau 2-1 présente les caractéristiques des six prairies. Elles ont été principalement choisies pour la diversité des espèces prairiales présentes et pour l'hétérogénéité en termes des modes d'exploitation (niveau de fertilisation, fauche exclusive ou bien pâturage en seconde partie de saison).

Tableau 2-1 : Caractéristiques des 6 parcelles sélectionnées.

Parcelle	Cartographie	Description	Couvert	Surface (ha)	Exploitation prairie
1		<p>Cette prairie temporaire se trouve sur une exploitation de bovin lait. Elle est en fait divisée en deux. La parcelle au nord est semée en luzerne pure. La partie plus au sud est un mélange de luzerne et de graminées. En 2013, ces parcelles ont été fertilisées en février (10 t. de fumier/ha) et en mars (N/Ca/Mg : 300 kg/ha). En période estivale, les parcelles sont irriguées.</p>	Luzerne	7,3	Fauche
2		<p>Cette prairie naturelle se trouve sur le site de l'Ecole d'Ingénieurs de Purpan. Jusqu'en 2010, la parcelle était fauchée une fois par an en été afin d'éviter le risque lié au feu et dans un souci d'entretien. A partir de 2011, un agriculteur récolte le fourrage de la parcelle. Le rendement moyen a été de 3,5 t. MS/ha en 2011. C'est la première année où le fourrage a été exporté. Cette parcelle n'a jamais eu d'apports NPK ou de traitements phytosanitaires.</p>	Prairie naturelle	9,4	Fauche

<p>3</p>		<p>Cette prairie temporaire appartient à une exploitation de polyculture-élevage. Il s'agit d'une zone de coteau exposée vers le Sud. Le Ray-Grass Italien a été semé cette même année. Elle a été fertilisée avec du fumier. Des manques et de mauvais départ en végétation sont observables sur la partie au sud de la parcelle. La parcelle a été ensilée le 6 mai puis fauchée à la fin du mois de juin.</p>	<p>Ray-Grass Italien</p>	<p>8,6</p>	<p>Ensilage début mai Fauche fin juin</p>
<p>4</p>		<p>Cette prairie naturelle appartient à un éleveur dont le siège d'exploitation est situé à une vingtaine de kilomètres. Seule la production printanière est récoltée, parfois, la production estivale/automnale est pâturée. La parcelle présente beaucoup d'adventices.</p>	<p>Prairies naturelles</p>	<p>6,0</p>	<p>Fauche fin juin</p>

Chapitre 2 : Sites d'étude et données

<p>5</p>		<p>Il s'agit d'une parcelle de prairie temporaire sur une zone de coteaux, avec une exposition sud-ouest. La parcelle est fauchée au printemps puis pâturée par un troupeau de bovin allaitant le reste de l'année. Un apport de Calcium a été réalisé en novembre de l'année précédente (Oxyfertil Ca 94% : 300 kg/ha) et un apport d'azote a été effectué fin Mars (46/0/0 : 100 kg/ha)</p>	<p>Fétuque / Dactyle / Trèfle Blanc</p>	<p>11,5</p>	<p>Fauche puis pâturage</p>
<p>6</p>		<p>Cette parcelle est une prairie temporaire de 3 ans située sur une exploitation de bovin lait. Elle est exclusivement fauchée. Pour l'année 2013, aucune fertilisation n'a été réalisée.</p>	<p>Fétuque / Dactyle</p>	<p>6,8</p>	<p>Deux fauches, pas de pâturage</p>

2.1.2. Données de production fourragère

2.1.2.1. Principe du protocole de mesure de production fourragère au champ

Le protocole "terrain" de mesure de production utilisé est inspiré d'ARVALIS - Institut du végétal (Protin *et al.*, 2009).

Le principe de la mesure au champ consiste à réaliser des prélèvements de biomasse, à l'aide d'une motofaucheuse, sur tous les points de prélèvement définis (Figure 2-3). Ainsi, à une date donnée, plusieurs mesures sont effectuées à différents endroits de la parcelle. Les prélèvements ont lieu toutes les semaines (en 2012) ou tous les 15 jours (en 2013).

A chaque point de prélèvement identifié grâce à un GPS, le protocole indique de suivre les étapes suivantes :

- Faucher l'herbe sur une distance de 2 m environ, selon l'orientation est/ouest pour réaliser un front d'attaque. Enlever l'herbe coupée afin de nettoyer le front d'attaque (située au Nord de la bande fauchée).
- Faucher selon l'orientation nord/sud (c'est-à-dire perpendiculaire au front d'attaque) sur une distance de 4 à 7 m selon la quantité observée de biomasse (hauteur de coupe de 7 cm) et récolter la totalité de l'herbe fauchée.
- Mesurer la longueur de la coupe à l'aide d'un décimètre. La feuille de terrain utilisée pour ce protocole est présentée en annexe (p.227).



Figure 2-3. Prélèvements de biomasse à l'aide d'une motofaucheuse.

- Réaliser le travail de pesée et séchage en étuve pour déterminer une production de matière sèche : pour chaque point de prélèvement, la totalité de la biomasse récoltée est pesée. Puis, un échantillon (100 à 500 g) est pesé et placé en étuve (105 °C pendant 48 h). Ensuite, les échantillons sont à nouveau pesés.

Ce protocole permet d'estimer de façon précise la production d'une parcelle de prairie. Un taux de matière sèche (MS), noté t_n , et une production en tonne de MS/ha, notée P_n , sont calculés grâce aux équations 2-1 et 2-2.

$$t_n = \frac{PSE_n}{PVE_n} \quad 2-1$$

avec t_n : taux de matière sèche sur le prélèvement n [%]; PSE_n : poids sec de l'échantillon "étuve" du prélèvement n [kg]; PVE_n : poids vert de l'échantillon "étuve" du prélèvement n [kg].

$$P_n = PV_n * t_n * \frac{10\ 000}{l_n * 1,1} \quad 2-2$$

avec P_n : production du point de prélèvement n [t. MS/ha]; PV_n : poids vert récolté après la fauche sur le prélèvement n [t.]; t_n : taux de matière sèche sur le prélèvement n [%]; l_n : longueur de fauchage sur le prélèvement n [m].

Le Tableau 2-2 présente le matériel nécessaire et quelques éléments de méthodologie pour la mise en place du protocole expérimental.

Tableau 2-2. Descriptif du protocole expérimental proposé pour l'estimation de la quantité d'herbe sur pied dans des prairies de fauche.

Matériel nécessaire pour le prélèvement	Motofaucheuse / Balance avec précision à 1g / Etuve / Compartiment de conservation des prélèvements / Décamètre / GPS
Mode de prélèvement dans la prairie	Utilisation d'une motofaucheuse (barre de coupe d'une largeur 1,10m – hauteur de coupe à 7cm). Longueur de fauche par point de prélèvement = 4 m à 7 m.
Nombre de prélèvements à réaliser	1 prélèvement/ha tous les 7 à 15 jours.

2.1.2.2. Définition des points de prélèvements – Principe d'échantillonnage

Pour chaque parcelle, un plan d'échantillonnage a été défini dans un souci de représentation homogène de la production fourragère de la parcelle.

La méthode choisie est celle de l'échantillon aléatoire systématique. Grâce à un système d'information géographique, une grille a été projetée sur la photographie aérienne de la parcelle. La dimension des carrés de la grille correspond à la résolution spatiale choisie pour calculer l'IPF à partir des images satellitaires HR (pixels). Des règles prédéfinies ont ensuite permis de placer les futurs points de prélèvements :

- Un point de prélèvement doit se situer à l'intersection des lignes horizontales et verticales de la grille.
- Afin de limiter l'effet "bordure" sur les images satellitaires, un éloignement minimal de la dimension d'un pixel est obligatoire avec le bord de la parcelle.
- Un point de prélèvement doit se trouver à une distance minimale de trois pixels d'un autre point de prélèvement. Ceci permet de se prémunir des erreurs de localisation avec le GPS sur le terrain et lors de l'analyse avec les images HR dû à une mauvaise correction géométrique. La précision du calage des images est de l'ordre d'un demi pixel.

Afin de prélever de façon homogène toute la surface d'une parcelle à chaque date de prélèvement, des blocs d'une surface moyenne de 0,8 ha ont été créés. Au sein de chacun de ces blocs a été identifié l'ordre de prélèvement des points au fil des semaines.

Ce choix s'est opéré en essayant de maximiser la distance entre les prélèvements effectués à des dates proches.

A titre d'illustration, la Figure 2-4-a montre l'échantillonnage et la répartition des blocs de la parcelle 2 durant l'année 2013 avec un zoom sur les points de prélèvements du bloc F (Figure 2-4-b). Les points sont identifiés de la façon suivante : "chiffre & lettre". Le chiffre correspond à l'ordre chronologique du prélèvement prévu dans le calendrier du protocole. La lettre correspond au bloc de la parcelle. Enfin, la Figure 2-4-c illustre la surface fauchée au sein du pixel.

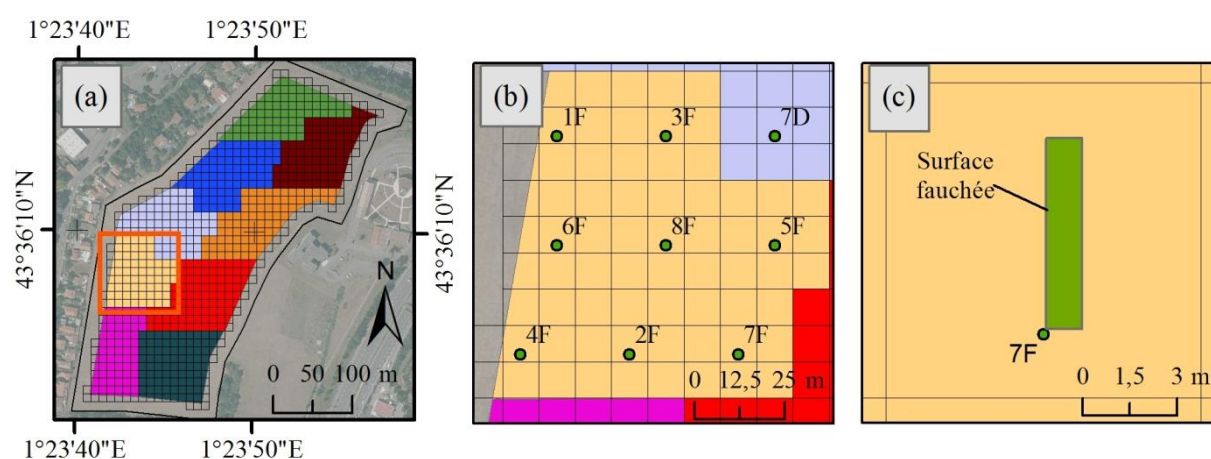


Figure 2-4. Illustration de l'échantillonnage et la répartition des blocs de la parcelle 2 durant l'année 2013 avec un zoom sur les points de prélèvements du bloc F.

Ainsi, l'application de ce protocole en 2012 sur la parcelle 2 et en 2013 sur les six parcelles a permis de collecter 488 points de mesures de biomasse.

2.1.3. Données satellitaires

En 2012 et 2013, des séries temporelles d'images HR ont été constituées simultanément à l'acquisition de données de production fourragère au champ, soit entre le 1^{er} mars et le 30 juin.

La première année, la programmation du satellite Formosat-2 a permis d'exploiter 8 images sur les 46 acquisitions réalisées. En 2013, les 6 parcelles étudiées se situaient sur la zone "SudMipy" définie dans le programme d'acquisition SPOT-4 Take Five. Ainsi il a été possible de bénéficier des images acquises dans le cadre de ce programme pour constituer les séries temporelles de chaque parcelle.

Compte tenu des conditions climatiques du printemps 2013 (longue période de couvert nuageux), le jeu d'images SPOT-4 Take Five a été complété avec des données acquises par les capteurs Landsat-8, SPOT-6 et Formosat-2. Les caractéristiques des capteurs exploités pour la constitution des séries temporelles HR sont données dans le Tableau 2-3.

Toutes les images ont été traitées avec le logiciel Overland afin de produire les paramètres biophysiques fCover et fAPAR.

La chaîne de traitement est similaire à celle qui est décrite dans la partie 1.2.4.2.1 (p. 46). La seule différence provient des images satellitaires utilisées en entrée du traitement. Le traitement des données de télédétection est développé dans le chapitre 3 (3.2.2; p. 106).

Tableau 2-3. Caractéristiques des capteurs des images constituant les séries temporelles HR.

Capteurs	Formosat-2	SPOT-4	SPOT-6	Landsat-8
Produits	N&B : 2 m Couleur : 2 m (produit fusionné) Multispectral (B1, B2, B3, B4) : 8 m	Monospectral : 10 m (B2) Multispectral (B1, B2, B3) : 20 m	Panchromatique : 1,5 m (0,45-0,76 μm) Multispectral (B1, B2, B3, B4) : 6 m	Panchromatique : 15 m (B8) Multispectral (B1 à B7 et B9) : 30 m
Bandes spectrales (μm)	P : 0,45 – 0,90 B1 : 0,45 – 0,52 B2 : 0,52 – 0,60 B3 : 0,63 – 0,69 B4 : 0,76 – 0,90	B1: 0,50 – 0,59 B2 : 0,61 – 0,68 B3 : 0,78 – 0,89 B4 : 1,58 – 1,75	B1 : 0,45-0,52 B2 : 0,53-0,59 B3 : 0,63-0,70 B4 : 0,76-0,89	B1 : 0,43-0,45 B2 : 0,45-0,51 B3 : 0,53-0,59 B4 : 0,64-0,67 B5 : 0,85-0,88 B6 : 1,57-1,65 B7 : 2,11-2,29 B8 : 0,50 - 0,68 B9 : 1,36 - 1,38
Emprise	24 km x 24 km	60 km x 60 km	60 km x 60 km	170 km x 183 km
Revisite	Quotidienne	2 à 3 jours	1 à 3 jours	16 jours
Angles de visée	+/- 45°	+/- 31.06°	+/- 45°	0°

Source : (Airbus Defence & Space - site internet)

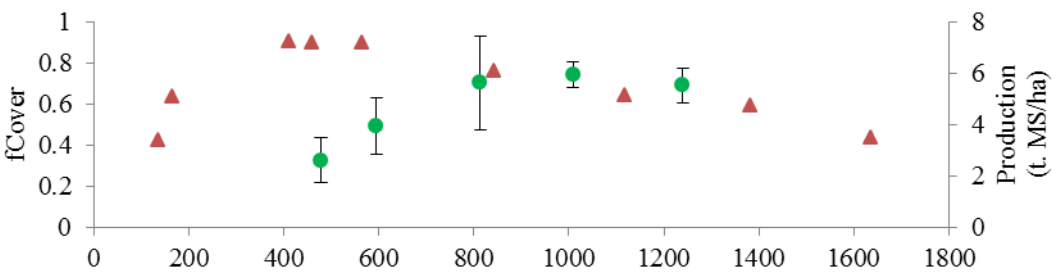
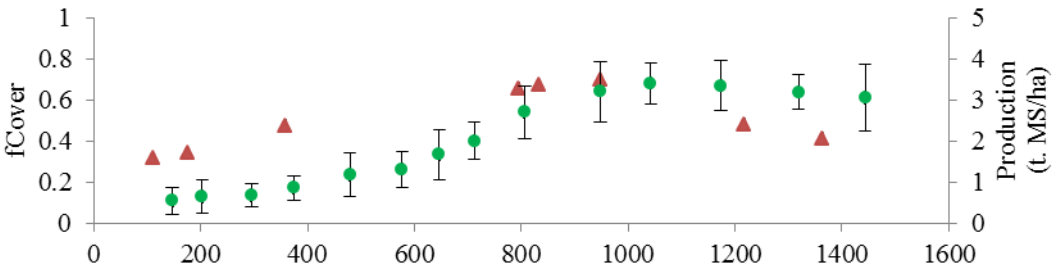
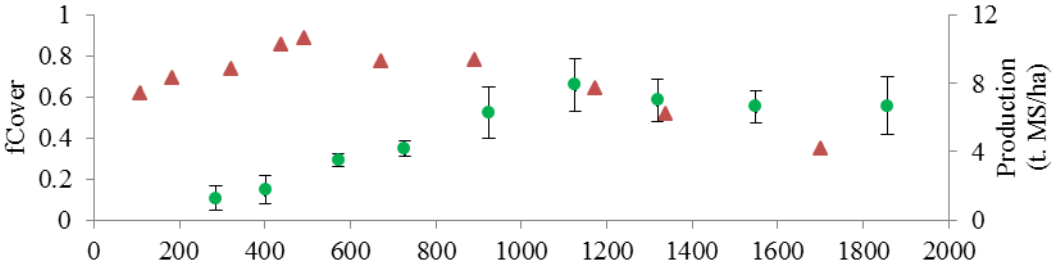
2.1.4. Bilan des acquisitions terrain et satellitaires

Il a été possible d'exploiter pour chaque parcelle de prairie une image tous les 15 jours environ, soit la même fréquence d'acquisition que les mesures de biomasse au champ. Le

Tableau 2-4 présente un bilan par parcelle des acquisitions de données terrain et satellitaires utilisées pour réaliser la validation de l'IPF à partir d'images HR, détaillant :

- Le nombre d'image HR et les capteurs utilisés pour le calcul de l'IPF;
- Le nombre et la fréquence des mesures de biomasse;
- Les graphes illustrant l'évolution du fCover et de la production mesurée *in situ*.

Tableau 2-4. Bilan des acquisitions terrain et images satellitaires. Evolution des valeurs de fCover (▲) et des productions mesurées (■) sur les 6 parcelles. Les barres représentent les valeurs d'écart-type des prélèvements réalisés à la date considérée.

Parcelle	Années	Couverture images satellitaires	Nombre de prélèvements	Valeurs de fCover et de productions mesurées aux dates d'acquisition
1	2013	SPOT-4 Take 5 : 6 SPOT-6 : 2 Landsat-8 : 1	7 points / 15 jours => 35 prélèvements répartis sur 5 dates	
2	2012	Formosat-2 : 8	12 points / 7 jours => 168 prélèvements répartis sur 14 dates	
	2013	SPOT-4 Take 5 : 4 SPOT-6 : 1 Landsat-8 : 1 Formosat-2 : 4	10 points / 15 jours => 75 prélèvements répartis sur 9 dates	

Chapitre 2 : Sites d'étude et données

3	2013	SPOT-4 Take 5 : 5 SPOT-6 : 3 Landsat-8 : 1	7 points / 15 jours => 43 prélèvements répartis sur 7 dates	
4	2013	SPOT-4 Take 5 : 7 SPOT-6 : 2 Landsat-8 : 1 Formosat-2 : 1	6 points / 15 jours => 44 prélèvements répartis sur 8 dates	
5	2013	Take-5 : 5 SPOT-6 : 2 Landsat-8 : 2 Formosat-2 : 1	10 points / 15 jours => 66 prélèvements répartis sur 7 dates	
6	2013	SPOT-4 Take 5 : 3 SPOT-6 : 2 Landsat-8 : 1 Formosat-2 : 1	7 points / 15 jours => 57 prélèvements répartis sur 8 dates	

2.1.5. Données météorologiques

Pour la validation, les données ont été analysées sur une échelle de temps exprimée en degrés-jours (°C) car le développement des prairies est directement piloté par les sommes de températures. Cette variable est obtenue à partir des températures journalières. Aussi, un indice d'efficacité d'interception de la lumière, couplant des données de fAPAR et de rayonnement, a été testé en substitut au fCover ou à la fAPAR utilisés seuls.

Pour ces deux variables, il a été nécessaire d'acquérir les données météorologiques journalières provenant de postes synoptiques situés à proximité des parcelles de prairies (Figure 2-1). Il s'agit de données journalières de rayonnement et température minimale/maximale, récupérées auprès de MétéoFrance. Les stations ne sont pas équipées des mêmes technologies et ne permettent pas de suivre tous les paramètres. Parmi celles situées à proximité des parcelles de prairies, seulement deux postes (Blagnac et Lavour) mesurent le rayonnement.

La température moyenne journalière Tm_i est obtenue grâce à l'équation 2-3 afin de calculer les sommes de degrés-jours DD_i (Equation 2-4).

$$Tm_i = \begin{cases} 0, & \text{Si } \frac{Tmax_i + Tmin_i}{2} < 0 \\ \frac{Tmax_i + Tmin_i}{2}, & \text{Si } \frac{Tmax_i + Tmin_i}{2} > 0 \end{cases} \quad 2-3$$

$$DD_i = \sum_{i=01/02}^I Tm_i \quad 2-4$$

avec $Tmax_i$: Température maximale journalière; $Tmin_i$: Température minimale journalière.

L'ensemble des données présentées ci-dessus sont utilisées dans le cadre du chapitre 3, concernant la validation de l'indice de production fourragère produit à partir de données satellitaires haute résolution spatiale.

2.2. Sites d'étude et données : validation de l'indice de production fourragère produit à partir de données satellitaires à moyenne résolution spatiale

Les données présentées dans cette section sont utilisées dans le chapitre 4 pour répondre au deuxième objectif de la thèse : "Définir une méthode de validation de l'indice de production fourragère produit à partir d'images satellitaires à moyenne résolution spatiale". Elles sont de deux types :

- Des mesures de biomasse acquises sur le terrain sur un échantillon de prairies situées dans les départements du Lot et de l'Aveyron pour une comparaison directe avec l'IPF mesuré à moyenne résolution spatiale.
- Des mesures de l'IPF réalisées à partir de série d'images satellitaires HR sur toutes les surfaces identifiées en prairies d'après le Registre Parcellaire Graphique dans le Lot pour une comparaison indirecte avec l'IPF mesuré à moyenne résolution spatiale.

2.2.1. Sites d'étude et données pour la comparaison directe de l'IPF mesuré à moyenne résolution spatiale avec des mesures de biomasse au champ

2.2.1.1. Sites d'étude

La collecte au champ des mesures de biomasse a été réalisée en 2012, 2013 et 2014 sur un échantillon de 1074 prairies, naturelles ou temporaires, localisées dans les départements du Lot et de l'Aveyron (Figure 2-5).

Le choix de ces deux départements s'expliquent par :

- La proximité de Toulouse, permettant de minimiser les frais de déplacement compte-tenu du nombre de mesures à effectuer chaque année (une série de mesures après chaque fauche) ;
- La forte proportion d'exploitations de type polyculture-élevage avec des pourcentages importants de prairies dans le paysage (respectivement 66% et 90% pour le Lot et l'Aveyron) ;
- La présence d'un grand nombre d'agriculteurs du réseau de maîtres de stage de l'EI Purpan, avec des systèmes de production variés (bovin viande, bovin lait, ovin viande, ovin lait et systèmes mixtes) parmi lesquels 28 ont répondu positivement à la sollicitation pour participer à ce travail et facilitant ainsi les conditions d'accès aux données de production des prairies.

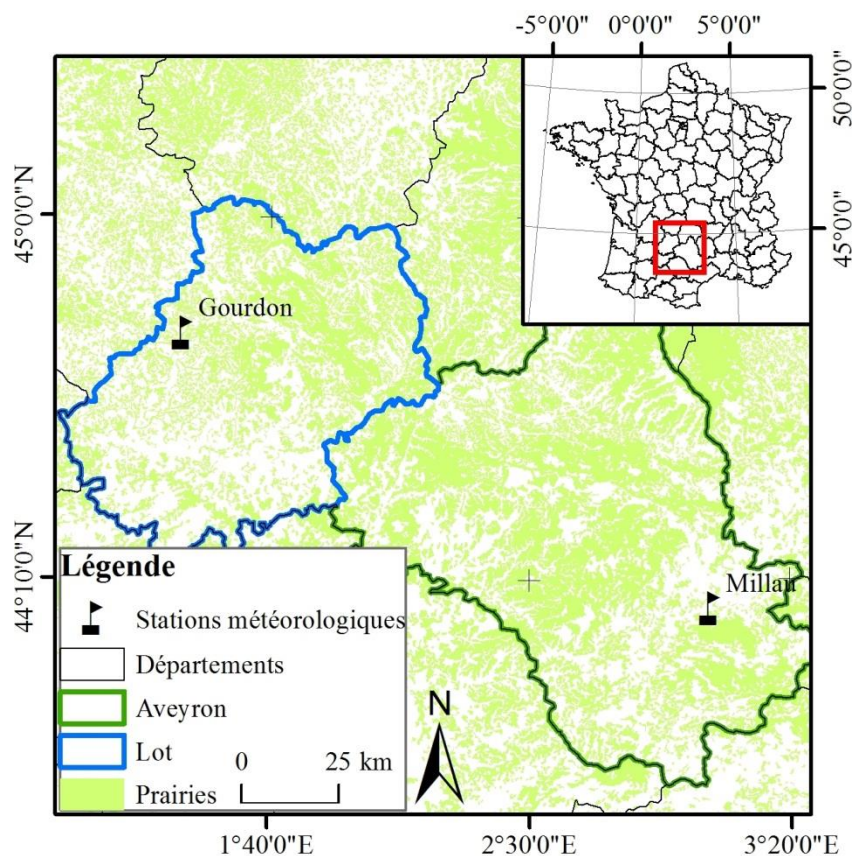


Figure 2-5. Sites d'étude pour la validation par comparaison directe. La localisation des stations météorologiques de Millau et Gourdon apparaît sur la figure.

Les prairies sélectionnées se caractérisent par un même mode d'exploitation au printemps, exclusivement en fauche avec un mode de conditionnement en balles de foin ou en enrubannées. Le respect de ces critères permet de définir un protocole unique d'estimation de biomasse et de garantir l'obtention de données comparables. En revanche, cela restreint le nombre potentiel de prairies à étudier.

Le site d'étude se caractérise globalement par des conditions climatiques favorables à la pousse de l'herbe tout au long de l'année avec des précipitations bien réparties (Figure 2-6) permettant plusieurs périodes d'exploitation des prairies.

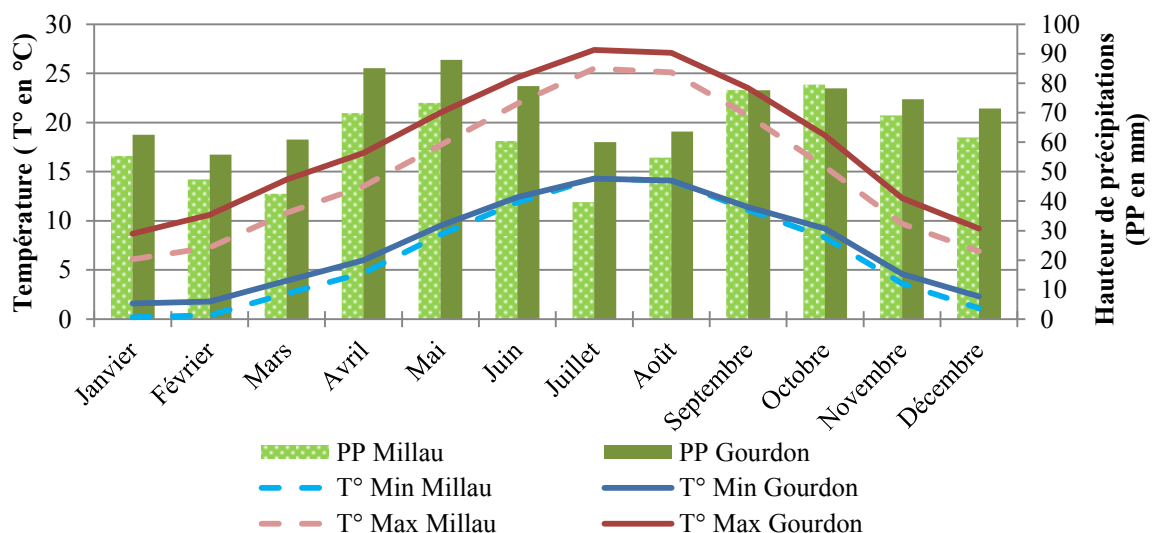


Figure 2-6. Diagramme ombrothermique des villes de Millau (sud-est de l'Aveyron) et Gourdon (nord-ouest du Lot) réalisé à partir des données climatiques moyennes calculées sur la période 1981-2010.
Source : (MétéoFrance)

Néanmoins, à l'échelle du site, la Figure 2-7 montre qu'il existe un important gradient altitudinal (de la plaine - 60 m - à l'étage subalpin -1460 m) impliquant des variations locales des conditions climatiques (température, précipitation, rayonnement) influençant les niveaux de production des prairies.

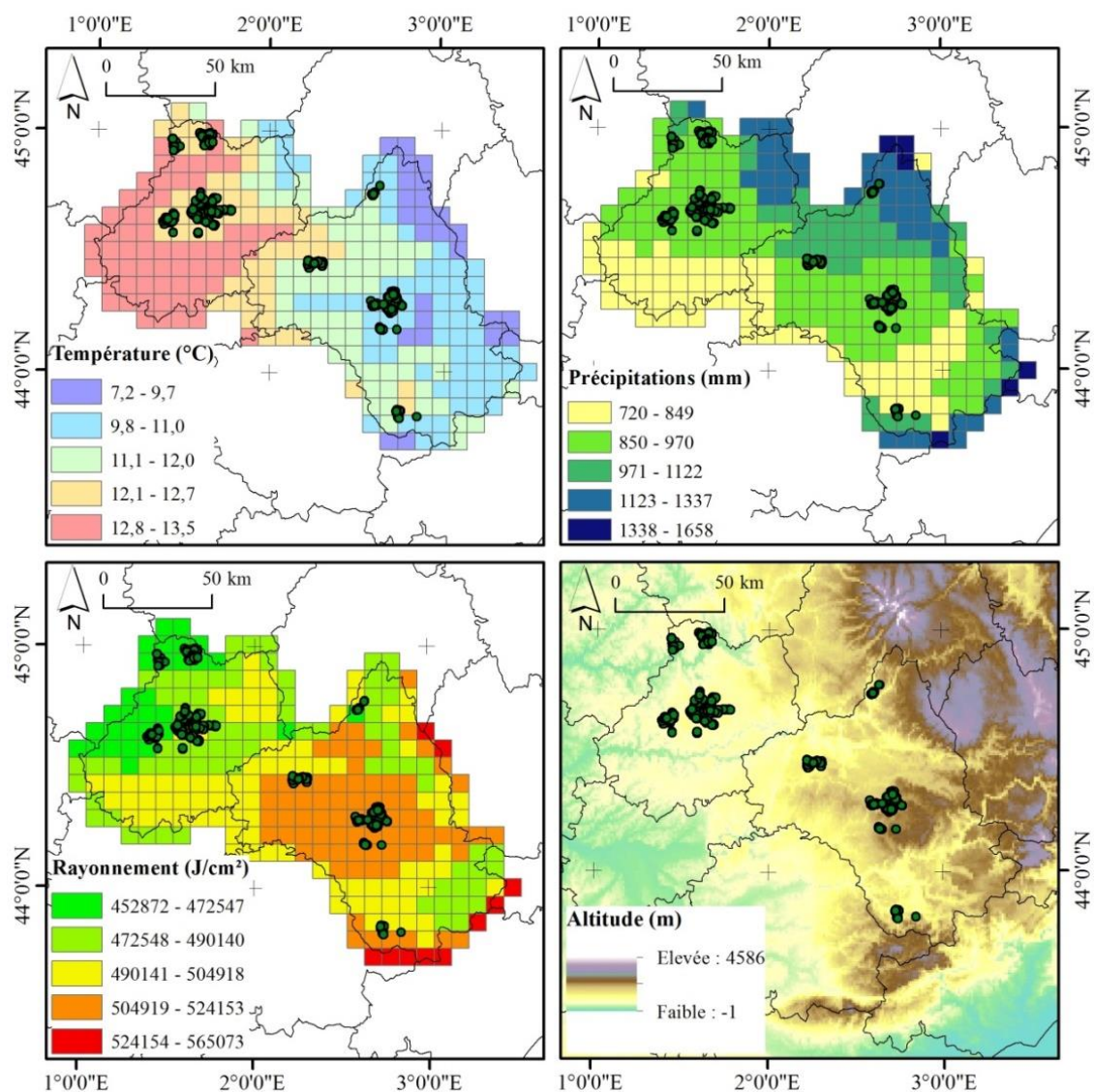


Figure 2-7. Caractérisation des départements du Lot et de l'Aveyron en fonction des conditions topographiques et climatiques (température moyenne, précipitations annuelles, cumul de rayonnement). Les données climatiques sont des moyennes calculées sur la période 2000-2011. Les parcelles de prairies échantillonnées sont symbolisées par des points.

Source : (SAFRAN)

Les trois années de collecte des données se distinguent principalement par les quantités d'énergie solaire reçues (cumul du rayonnement), les températures et les précipitations calculées à partir des données SAFRAN de MétéoFrance et cumulées sur la période comprise entre le 1^{er} février et le 31 juillet (Figure 2-8).

L'année 2012 se caractérise par un déficit hydrique (-14% de précipitations) et un excédent d'énergie solaire (+9% de rayonnement) par comparaison avec les années 2013 et 2014, conduisant à des niveaux moyens de production des prairies plus faibles pour cette année-là.

Malgré des précipitations excédentaires en 2013 (+14%), les températures sensiblement plus faibles (-7%) ont conduit à des niveaux de production des prairies similaires à 2014.

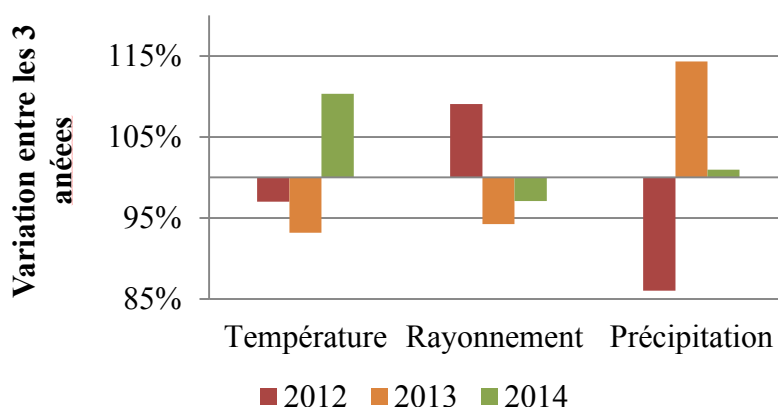


Figure 2-8. Variations en pourcentage de la somme des températures [$^{\circ}\text{C}$], du rayonnement [$\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$] et des précipitations [mm] du 1^{er} février au 31 juillet dans la zone d'étude. La variation d'une année est exprimée par rapport à la moyenne des deux autres.

Source : (SAFRAN)

2.2.1.2. Données de production fourragère

Un protocole a été défini pour estimer la production de biomasse d'une parcelle de prairie et appliqué sur les prairies sélectionnées après chaque fauche en 2012, 2013 et 2014. Il comporte trois étapes :

- Comptage du nombre de bottes par parcelle de prairie et par fauche et report sur une cartographie des parcelles avec mention des dates de fauche et de la surface de la parcelle (étape effectuée par les agriculteurs) ;
- Pesée d'un échantillon de bottes (environ 15, nombre peu variable pour rester dans des temps de collecte de données acceptables pour les agriculteurs) avec mesures du taux d'humidité, dix répétitions par botte (étape effectuée par l'EI Purpan avec l'aide des agriculteurs) à l'aide de matériels spécifiques (pèse-palette en forme "U" et humidimètre) dont les caractéristiques sont présentées dans le Tableau 2-5.

Tableau 2-5 : Caractéristiques des matériels utilisés pour l'estimation du poids des bottes.

Pèse-palette	Capacité : 600 kg Précision 50/100/200 g Cet appareil a été étalonné par une société habilitée.
Humidimètre	Humidité inférieure à la limite de mesure: 8,5 % Humidité supérieure à la limite de mesure: 60 % Cet appareil a été calibré individuellement et affiche une précision de $\pm 1,5$ % (dans des conditions de fonctionnement et d'humidité normales, et avec utilisation des moyennes et du calibrage)

- Calcul de la production de biomasse par parcelle de prairie exprimée en tonne de matière sèche par hectare [t. MS/ha] d'après les Equations 2-5 et 2-6.

$$\bar{p}_n = \frac{\sum p * (1 - \bar{h})}{n'} \quad 2-5$$

avec n' : nombre bottes pesées; p : poids humide d'une botte [t.]; \bar{h} : humidité moyenne d'une botte [%]; \bar{p}_n : poids moyen sec d'une botte d'un type de fourrage [t. MS].

$$j_i = \frac{n * \bar{p}_n}{a} \quad 2-6$$

avec a : surface de la parcelle i [ha]; j_i : production de la parcelle i [t. MS/ha]; n : nombre total de bottes récoltées sur la parcelle i .

A partir de ces données de production fourragère, l'Equation 2-7 permet d'estimer la production de biomasse des prairies à l'échelle de la maille utilisée pour calculer l'indice de production fourragère à partir des images satellitaires à moyenne résolution spatiale.

$$J_k = \sum_{i=1}^m j_i * \frac{a_i}{\sum a_m} \quad 2-7$$

avec m : nombre de parcelle dans la maille dont la production est estimée; k : période fourragère; J_k : production moyenne des parcelles d'une maille [t. MS/ha] pour une période fourragère k .

2.2.1.3. Bilan des acquisitions de données de production fourragère

Au total, 1553 mesures de production, provenant de 1074 parcelles de prairies ont été acquises entre 2012 et 2014, avec un nombre de fauches très variable selon les années et les

régions. Elles couvrent au total 2196 ha de prairies en première coupe. Nous présentons en annexe 2 (p. 228) l'ensemble des données de productions calculées sur les mailles expérimentales durant les années 2012, 2013 et 2014.

Cependant, bien que conséquent, ce nombre de parcelles de prairies échantillonnées et la surface couverte restent limités. Le taux moyen d'échantillonnage des surfaces de prairies échantillonnées est faible comparé aux surfaces de prairies présentes dans les mailles analysées. A titre d'exemple, pour la première coupe en 2013, période pour laquelle l'effort d'échantillonnage a été le plus fort, le taux d'échantillonnage moyen est de 0,8% sur 35 mailles de 3600 ha (6km x 6km).

Dans le travail de validation, ce problème a pu être en partie résolu en redéfinissant des mailles pour le calcul de l'indice de production fourragère avec deux règles (Figure 2-9) :

- Diminution de la surface de l'unité géographique de 3600 ha à 1152 ha ;
- Forme de l'unité géographique pas nécessairement carrée (6km x 6km à l'origine) et positionnement centré autour des parcelles de prairies échantillonnées.

Ainsi, le taux d'échantillonnage moyen de ces nouvelles mailles est de 13 % en première coupe pour les trois années. Cela permet d'analyser 13 mailles définies pour le calcul de l'IPF, un nombre pouvant être qualifié de faible d'un point de vue statistique.

Ces éléments illustrent la difficulté de mettre en œuvre le protocole d'acquisition de données de production fourragère à ce niveau d'échelle pour obtenir un nombre suffisant de données à comparer avec des mesures issues d'images satellitaires MR.

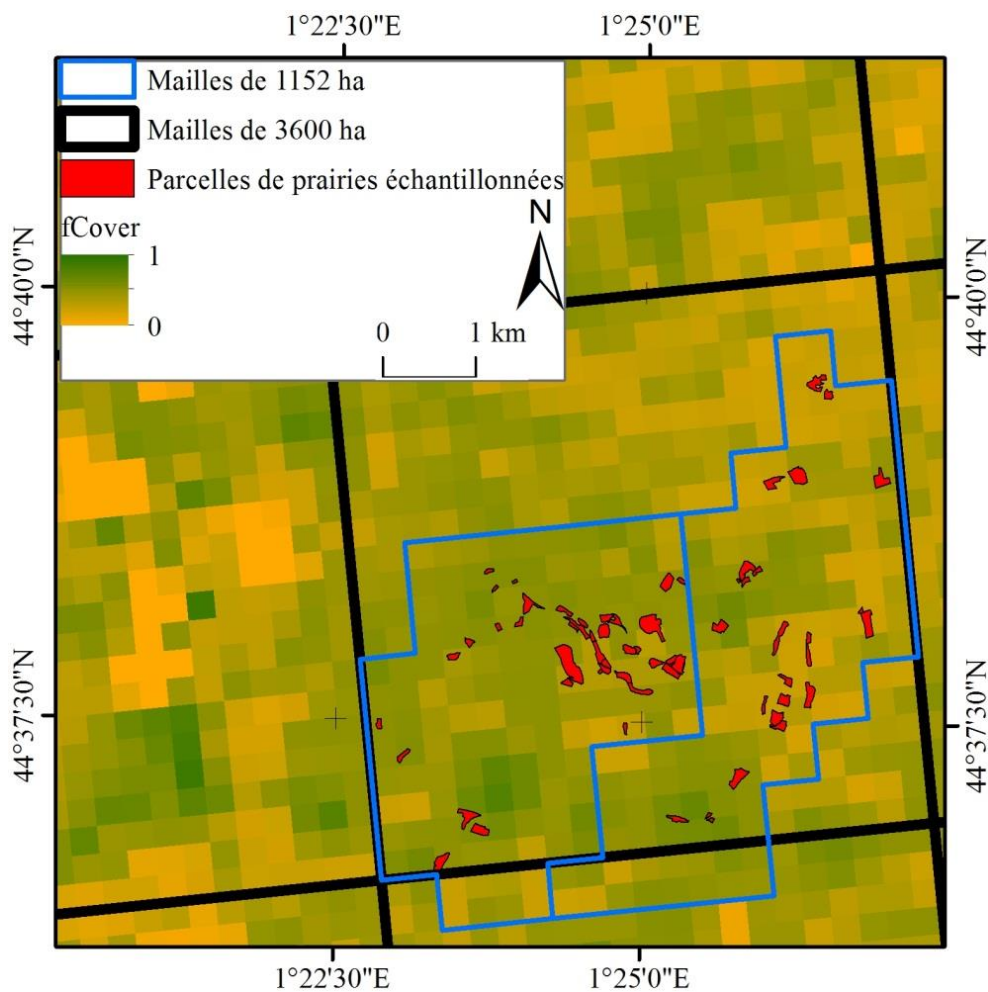


Figure 2-9. Illustration des mailles de 3600 ha et des mailles de 1152 ha redéfinies pour la validation par comparaison directe avec des mesures de biomasse.

2.2.2. Sites d'étude et données pour la comparaison indirecte de l'IPF mesuré à moyenne résolution spatiale avec l'IPF mesuré à haute résolution spatiale

L'objectif de cette comparaison, réalisée durant les années 2013 et 2014, est de qualifier la corrélation entre les IPF calculés à partir de séries temporelles d'images MR et HR.

2.2.2.1. Sites d'étude

Le site d'étude utilisé pour la comparaison directe a dû être modifié et restreint aux limites du département du Lot compte-tenu de l'emprise des images satellitaires HR disponibles pour calculer l'IPF.

La Figure 2-10 caractérise, à l'échelle du département :

- Les variations des conditions climatiques : il existe un gradient nord/sud marqué, avec une partie au nord plus fraîche et davantage arrosée que le sud où le rayonnement est plus important.
- Les variations du pourcentage de prairies présentes dans les 178 mailles couvrant le Lot et utilisées pour le calcul de l'IPF : de 10 % à 70 %, avec une zone au centre et au nord où les prairies dominent dans le paysage et correspondent à une zone d'élevage (contrairement au sud du département, avec peu de prairies et davantage propice à la culture de céréales et à la viticulture).

Les surfaces en prairies considérées dans cette étape de validation de l'IPF sont extraites du Registre Parcellaire Graphique de 2012. Elles correspondent aux îlots (groupe de parcelles) contenant plus de 97 % de prairie et classées en "Prairies Naturelles", "Prairies Temporaires" et "Landes et Parcours".

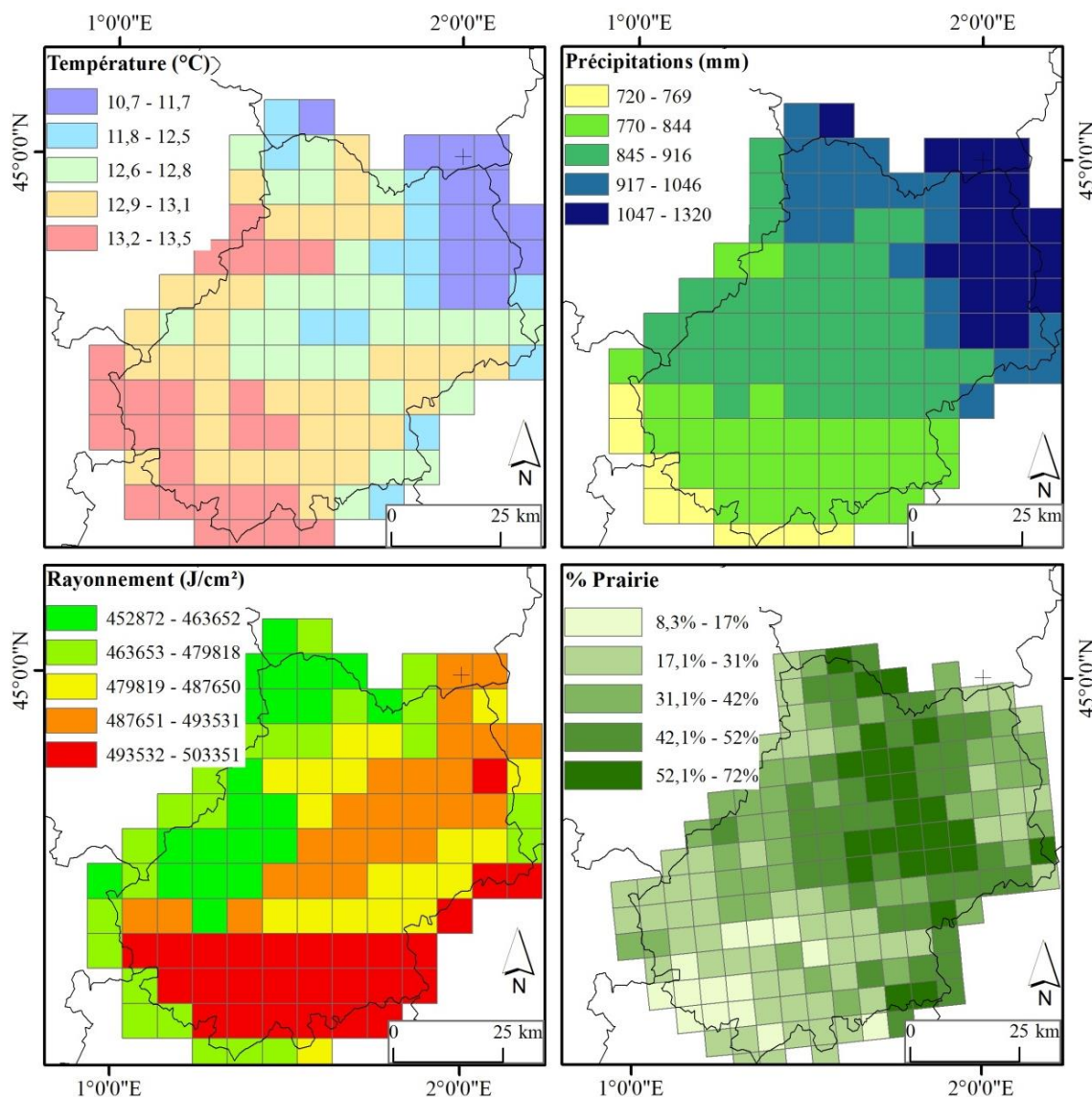


Figure 2-10. Caractérisation du département du Lot en fonction des conditions climatiques (température moyenne, précipitations annuelles, cumul de rayonnement) et du pourcentage de prairie dans les mailles utilisées pour le calcul de l'IPF à haute et moyenne résolution spatiale. Les données climatiques moyennes couvrent la période 2000-2011. Les mailles sur la figure en bas à droite sont celles utilisées dans la chaîne de production de l'IPF.

Source : (SAFRAN)

2.2.2.2. Données satellitaires pour le calcul de l'IPF à haute résolution spatiale

Dans la comparaison indirecte, l'IPF calculé à partir de séries temporelles d'images satellitaires à haute résolution spatiale représente la donnée de validation.

Sur les trois années étudiées, deux séries ont pu être constituées en 2013 et 2014 en exploitant les images provenant de cinq capteurs : SPOT-4, SPOT-6, Landsat-8 (caractéristiques techniques présentées dans le Tableau 2-3; p. 70), Landsat-7 et Deimos (caractéristiques techniques présentées dans le Tableau 2-6).

Tableau 2-6. Caractéristiques des capteurs Deimos et Landsat-7 constituant les séries temporelles HR.

Capteurs	Deimos	Landsat-7
Produits	Multispectral (B1, B2, B3) : 22 m	Panchromatique : 15 m (0,52-0,90) Multispectral (B1 à B5) : 30 m
Bandes spectrales (μm)	B1 : 0,52-0,60 B2 : 0,63-0,69 B3 : 0,77-0,90	B1 : 0,45-0,52 B2 : 0,53-0,61 B3 : 0,63-0,69 B4 : 0,75-0,90 B5 : 1,55-1,75 B6 : 10,40-12,50 (60m) B7 : 2,09-2,35
Emprise	650 km x 650 km	185 km
Revisite	3 jours	16 jours
Angles de visée	0°	0°

Source : (sites Internet Airbus D&S - DeimosImaging)

Les images provenant des capteurs SPOT-6 et Deimos sont commandées auprès d'AIRBUS D&S et celles de Landsat sont téléchargées sur le site de l'USGS (NASA).

Ce sont des images orthorectifiées en valeurs de luminance. Les images de SPOT-4 sont fournies par le CNES dans le cadre du programme Take-5 (Niveau 1C - version 2) et correspondent à des données de réflectance "Top Of Atmosphere" (TOA).

2.2.2.3. Bilan des acquisitions de données satellitaires à haute résolution spatiale

Au total, les deux séries temporelles d'images satellitaires utilisées pour le calcul de l'IPF à haute résolution spatiale se composent de 26 images en 2013 et 22 images en 2014 provenant respectivement de quatre et trois capteurs différents. Elles sont présentées dans le Tableau 2-7 avec le détail des dates d'images par année et par capteur.

Tableau 2-7. Bilan des acquisitions de données satellitaires à haute résolution spatiale pour la constitution des séries temporelles en 2013 et 2014 dans le cadre de la validation d'IPF par comparaison indirecte.

Capteurs	Dates des images		Total images
	2013	2014	
SPOT-4	16/02; 21/02; 03/03; 03/04; 13/04; 17/04; 22/04; 27/05; 06/06; 12/06; 16/06		11
SPOT-6	17/05; 08/07		2
Deimos	23/09	15/05; 07/06; 03/07	4
Landsat-8	14/04; 23/04; 26/06; 12/07; 19/07; 04/08; 13/08; 20/08; 29/08; 05/09; 07/10; 23/10	12/02; 09/03; 01/04; 10/04; 17/04; 19/05; 28/05; 13/06; 20/06; 15/07; 31/07; 16/08; 01/09; 17/09; 03/10; 19/10; 26/10; 20/11	30
Landsat-7		04/05	1
Total images	26	22	48

L'ensemble de ces données est traité avec le logiciel Overland d'après la chaîne de traitement décrite en 1.2.4.2 (p. 45) afin de produire les séries temporelles de fCover sur les surfaces identifiées en prairies.

La Figure 2-11 illustre le profil temporel moyen de fCover pour les parcelles de prairies du Lot en 2013 et 2014. Les losanges sur les profils correspondent aux dates d'acquisitions des images satellitaires. Les profils mettent en évidence des différences dans la phénologie des prairies attribuables à des conditions climatiques variables entre les deux années.

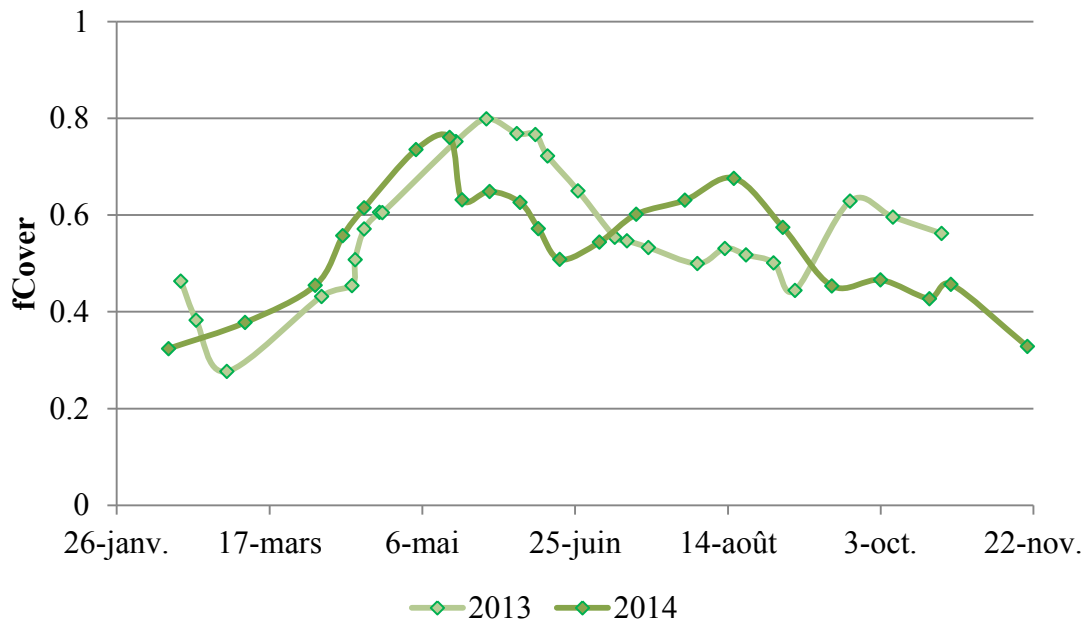


Figure 2-11. Séries temporelles de fCover sur les parcelles de prairies du Lot en 2013 et 2014. Les losanges sur les profils correspondent aux dates d'acquisitions des images satellitaires.

La méthode de calcul de l'IPF à haute résolution spatiale est expliquée dans le chapitre 4, plus précisément dans la partie "Méthode" de l'article faisant référence à ces travaux (4.2.2.2; p. 140).

2.3. Sites d'étude et données : proposition d'une nouvelle modalité de calcul de l'indice de production fourragère

Les données présentées dans cette section sont utilisées dans le chapitre 5 pour répondre au troisième objectif de la thèse : "Explorer une approche alternative de calcul de l'indice de production fourragère". Plus précisément, l'option méthodologique choisie consiste à explorer le potentiel d'un modèle d'estimation de production des prairies basé sur une approche semi-empirique, c'est-à-dire intégrant à l'indice de télédétection des variables climatiques.

Ce travail a été réalisé à partir de données collectées sur un échantillon de régions fourragères et pour cinq années représentant des conditions climatiques particulières. Deux types de données ont été mobilisés :

- Des données satellitaires et climatiques pour le développement des modèles ;
- Des données d'estimation de production des prairies pour la validation.

2.3.1. Sites d'étude

La définition des sites d'étude découle de l'échelle à laquelle sont produites les données de validation utilisées, à savoir la région fourragère (Hentgen, 1982). Un échantillon de 25 régions fourragères parmi les 228 existantes en France a été constitué en poursuivant trois objectifs :

- Représenter au mieux les zones de production présentes sur tout le territoire ;
- Représenter la diversité des conditions stationnelles où sont implantées les prairies ;
- Intégrer les 13 régions fourragères utilisées par Di Bella *et al.* (2004) pour la validation des estimations de production, dans le cadre du développement du dispositif national pour le suivi de la production des prairies (ISOP).

Pour ce faire, nous avons caractérisé les régions fourragères en nous appuyant :

- Sur des données topographiques (altitude moyenne calculée à partir d'un Modèle Numérique de Terrain à 1 km de résolution spatiale ; source : IGN-BD ALTI),
- Sur des données climatiques (moyenne des cumuls annuels de précipitations et moyenne des températures annuelles calculées à partir de la base de données SAFRAN de MétéoFrance pour la période 2003 – 2012),
- Sur des données d'occupation du sol (décrites en p.49) permettant de calculer le pourcentage de prairies par régions fourragères.

La Figure 2-12 illustre les 25 régions fourragères sélectionnées d'après ces données. Ces régions fourragères couvrent bien une grande diversité de conditions stationnelles (gradient altitudinal de 90 m à 950 m, températures moyennes annuelles de 7,9°C à 13,3°C, cumuls annuels de précipitations de 732 mm pour les régions fourragères en zone méditerranéenne à 1456 mm pour celles en zone de montagne) et des zones de production fourragère (de 19 % de prairies par régions fourragères pour les régions céréalières à 65 % pour les zones d'élevage).

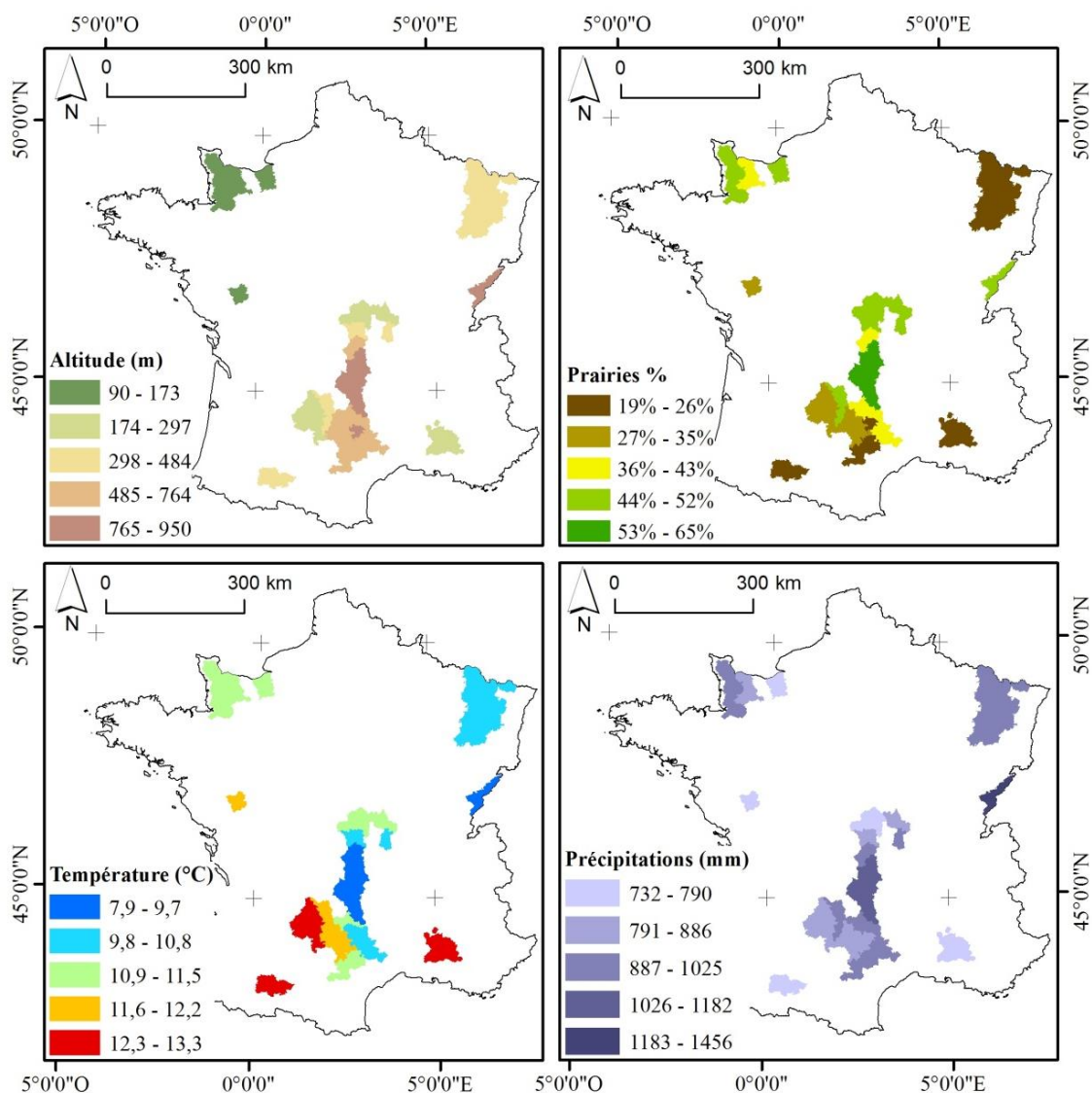


Figure 2-12. Caractérisation des 25 régions fourragères sélectionnées selon l'altitude, le pourcentage de prairie, la température annuelle et le cumul annuel des précipitations moyennes sur la période 2003-2012.

Source : (SAFRAN – modèle numérique de terrain IGN-BD ALTI – RPG 2010 et Corine Land Cover 2006).

De plus, d'après la Figure 2-13, elles permettent également de représenter 14 modes d'exploitation des prairies parmi les 30 observés en France et issus d'un travail d'enquête réalisé par le SCEES en 1998.

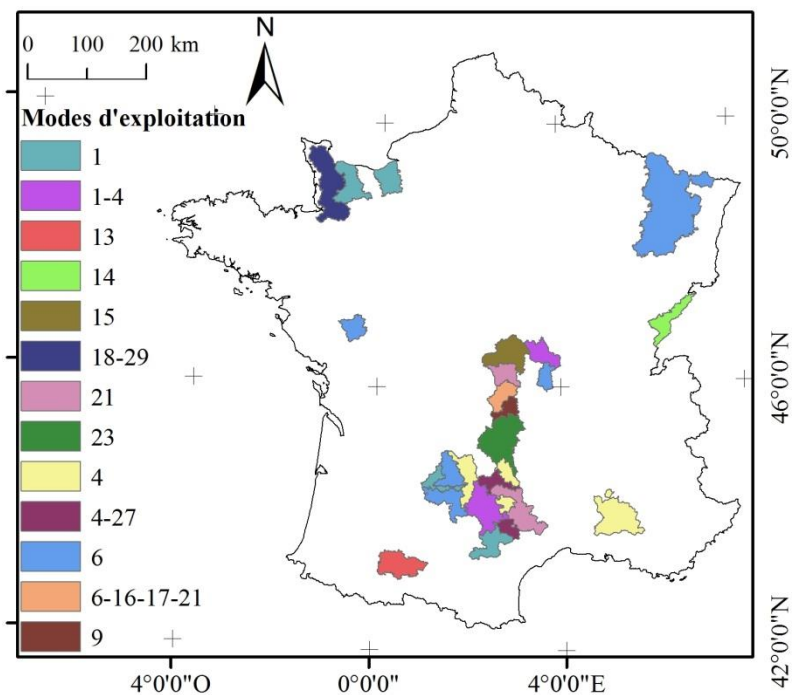


Figure 2-13. Caractérisation des 25 régions fourragères sélectionnées selon le ou les modes d'exploitation les plus recensés dans chaque région fourragère d'après l'enquête du SCEES en 1998
Source : (F. Ruget, communication personnelle).

Chaque mode d'exploitation des prairies est caractérisé en fonction de la durée de croissance de la végétation (exprimée en somme de températures depuis le 1^{er} février), du nombre de coupes, de l'intervalle entre coupes et des niveaux de fertilisation (Figure 2-14).

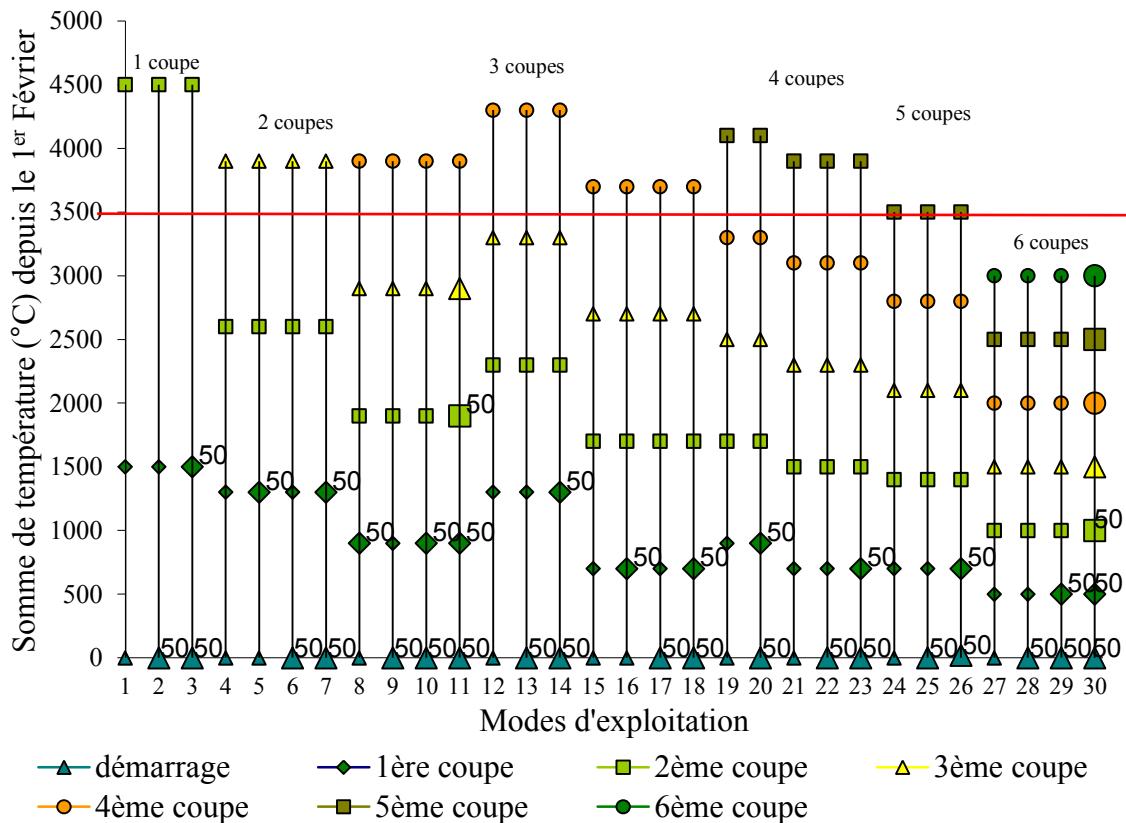


Figure 2-14. Présentation des 30 modes d'exploitations issus de l'enquête du SCEES en 1998 selon le niveau de fertilisation, le nombre de coupes et les intervalles entre coupes. Le trait horizontal rouge indique la somme de température généralement disponible, et le symbole supérieur indique la possibilité d'une coupe supplémentaire si la température est particulièrement élevée. Le niveau de fertilisation est représenté par une taille plus importante du symbole ; le chiffre placé à côté renseigne sur la quantité apportée.

Source : (Ruguet *et al.*, 2006)

2.3.2. Données satellitaires et climatiques pour le développement des modèles

2.3.2.1. Données satellitaires

Trois indices extraits des images satellitaires acquises par les capteurs MERIS et/ou MODIS (Tableau 1-8; p. 49) sont testés pour le développement d'un nouveau modèle d'estimation de production des prairies :

- Le paramètre biophysique fCover, utilisé actuellement pour l'indice de production fourragère ;
- Le paramètre biophysique fAPAR, étant celui utilisé dans les modèles d'efficience de production sur lesquels nous nous sommes appuyés pour développer notre approche semi-empirique ;
- L'indice de végétation NDVI, étant celui majoritairement employé dans les assurances indicelles pour les prairies recensées en bibliographie.

Le fCover et la fAPAR ont été produits à partir des images journalières de luminance acquises par les capteurs MERIS et MODIS, à partir de la chaîne de traitement de l'IPF décrite dans la partie 1.2.4.2 (p. 45) fournissant en sortie des synthèses décennales présentant une résolution spatiale de 300 m.

Le NDVI est directement obtenu à partir de synthèses à 16 jours d'images satellitaires acquises par le capteur MODIS à une résolution de 250 m (produit MOD13Q1) fournies par la NASA (Didan, 2015). Il est corrigé des effets atmosphériques et masqué des surfaces en eau, des nuages, des aérosols et des ombres de nuages (Huete *et al.*, 1999).

2.3.2.2. Données climatiques

Quatre variables climatiques (températures minimales et maximales, rayonnement et précipitations) ont été testées pour le développement d'un nouveau modèle d'estimation de production des prairies. Elles proviennent de la base de données SAFRAN de MétéoFrance (Vidal *et al.*, 2010) qui couvre l'ensemble de la France avec une archive remontant à 1958. Elles sont obtenues à partir de mesures de stations météorologiques et livrées par maille de 8 km x 8 km après une étape de spatialisation basée sur une méthode d'interpolation par pas de 300 m d'altitude. Elles sont produites à un pas de temps journalier.

Parmi la période commune couverte par l'archive des images satellitaires utilisées pour le calcul de l'IPF (2003-2014) et l'archive des données SAFRAN (1958-2012), cinq années (2003, 2007, 2009, 2011 et 2012) ont été sélectionnées pour représenter au mieux la diversité des conditions climatiques observables et plus ou moins propices à la production des prairies. Pour cela, nous avons calculé la variation annuelle de la moyenne des températures et des précipitations cumulées pendant l'année, au printemps (entre janvier et mai) et en été (entre juin et août) par rapport à la moyenne établie sur la période 2003-2012.

La Figure 2-15 illustre les cinq années sélectionnées d'après ces données. Les années 2003 (pour les fortes températures estivales simultanément à un déficit hydrique) et 2011 (pour les fortes températures printanières simultanément à un déficit hydrique) sont considérées comme des années de sécheresse.

A l'inverse, l'année 2007 avec un excédent de précipitations sur l'année, plus important en été qu'au printemps, et des températures fortes au printemps et fraîches en été, représente une année dite "favorable" à la pousse de l'herbe.

Enfin, les années 2009 et 2012 se situent dans la moyenne et sont donc qualifiées de "normales".

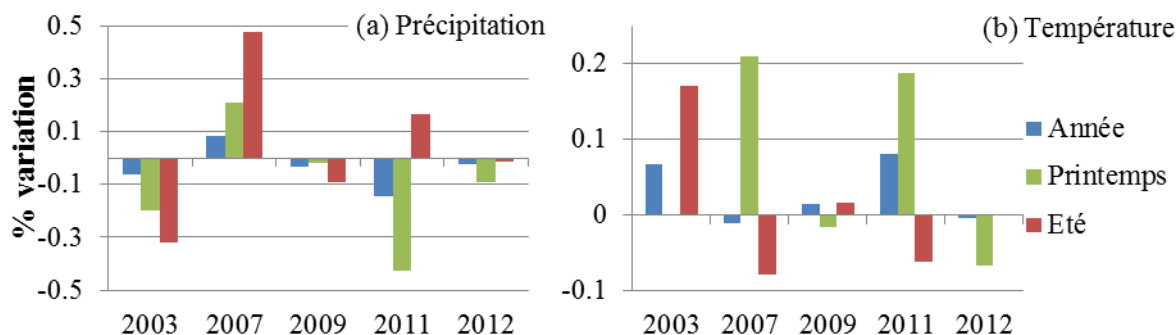


Figure 2-15. (a) Précipitations et (b) températures annuelles, printanières et estivales pour les cinq années sélectionnées comparées aux moyennes (2003/2012) observées sur les 25 régions fourragères. Source : SAFRAN

2.3.3. Données d'estimation de production des prairies pour la validation

Les données d'estimation de production des prairies, utilisées pour la validation des nouveaux modèles testés, proviennent du dispositif national d'Informations et Suivi Objectif des Prairies (ISOP) résultant d'une collaboration entre l'INRA, MétéoFrance et le Service de la Statistique et de la Prospective (SSP) (Donet *et al.*, 2000).

Ce dispositif repose sur le couplage d'un modèle de croissance de l'herbe, STICS Prairies, avec une base de données agro-pédo-climatiques spatialisées pour fournir chaque mois et annuellement une estimation de la production moyenne des prairies à l'échelle d'une région fourragère.

STICS est un modèle dynamique et mécaniste qui a pour but de simuler les variations du système sol-culture-climat à l'échelle d'une parcelle.

A un pas de temps journalier, le modèle calcule des informations relatives au développement de la culture et des bilans azotés et hydriques. Le milieu physique et l'itinéraire technique sont fixés en début de simulation. Les paramètres météorologiques (température, rayonnement, précipitation et évapotranspiration) sont ensuite utilisés en variables d'entrée du modèle. Ce modèle a été adapté pour les prairies, STICS-Prairies, en modifiant les principes de modélisation pour répondre aux spécificités de la fonction de production de ce type de couvert (Rugé *et al.*, 2006).

Dans le cadre d'ISOP, les simulations STICS-prairies sont réalisées à l'échelle des régions fourragères (Hentgen, 1982). On distingue les données invariables quelle que soit la région fourragère (paramètres de la plante), les données variables d'une région fourragère à l'autre mais fixes quelle que soit l'année (paramètres de sol, de modes d'exploitation) et les données variables d'une région fourragère à l'autre et chaque année (paramètres climatiques).

Le Tableau 2-8 récapitule les données utilisées pour l'estimation de la production des prairies dans le dispositif ISOP et présente leurs principales caractéristiques.

Chaque région fourragère est caractérisée par :

- Un ou plusieurs types dominants de prairies (artificielles, temporaires ou permanentes) d'après les données de l'enquête TERUTI ;
- Un ou plusieurs modes dominants d'exploitations des prairies (maximum 5 modes) d'après l'enquête du SCEES de 1998 (Figure 2-14, p. 91) ;
- Un ou plusieurs types dominants de sol (maximum 5 sols) d'après les données de l'INRA d'Orléans.

Les valeurs de référence ou annuelle de production des prairies d'une région fourragère proviennent de la moyenne des combinaisons possibles "sol x mode d'exploitation". A partir des enquêtes effectuées par le SCEES en 1998, les 5 modes d'exploitation les plus récurrents au sein de la région fourragère ont été conservés.

- Cette caractérisation est faite en identifiant le nombre et la fréquence d'exploitation des prairies et les niveaux de fertilisation (Figure 2-14, p. 91).
- L'accessibilité aux données climatiques sur la période 1981-2009 permet de calculer la production annuelle des prairies.

Tableau 2-8. Données utilisées pour le dispositif ISOP et principales caractéristiques.

Données	Source	Variable exploitée dans ISOP	Résolution spatiale	Acquisition	Traitement de l'information
Données sur les prairies	TERUTI	<ul style="list-style-type: none"> • Type de prairies 	Régions fourragères	1997	-
Données de sol	INRA Orléans	<ul style="list-style-type: none"> • La profondeur du sol • La réserve en eau • La densité apparente • La teneur en argile • L'albédo • La teneur en carbonate de calcium 	Régions fourragères	1998	Règle de pédotransfert – d'expert
		<ul style="list-style-type: none"> • La teneur en azote organique • La profondeur d'humification 	National	Définie à l'initiative d'ISOP	Fixer arbitrairement
Données sur les modes d'exploitation	Enquêtes SCEES	<ul style="list-style-type: none"> • Quantité initiale d'azote • Taux de légumineuses 	Régions fourragères	1998	Une valeur moyenne est calculée pour caractériser les prairies de la région fourragère
		<ul style="list-style-type: none"> • Fertilisation • Modes de récolte • Fréquence de coupes 	Régions fourragères	1998	Des modes d'exploitation sont définis par région fourragère
Données climatiques	Météo France	<ul style="list-style-type: none"> • Températures min et max • Hauteurs de précipitations • Rayonnement Global • Evapotranspiration Potentielle 	Grille de 0,125° (~14 km)	Depuis 01/02/1981, acquisition journalière	Interpolation des données de stations puis moyenne par région fourragère afin d'obtenir une série temporelle de chaque paramètre

Une note de synthèse décrivant le dispositif ISOP est placée en annexe (p.231). Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé les estimations de production des prairies pour les 25 régions

fourragères et 5 années sélectionnées, soit 125 données (F. Ruget, communication personnelle). La Figure 2-16 illustre la variabilité spatiale et temporelle importante des niveaux de production des prairies qui est prise en compte dans l'échantillon étudié.

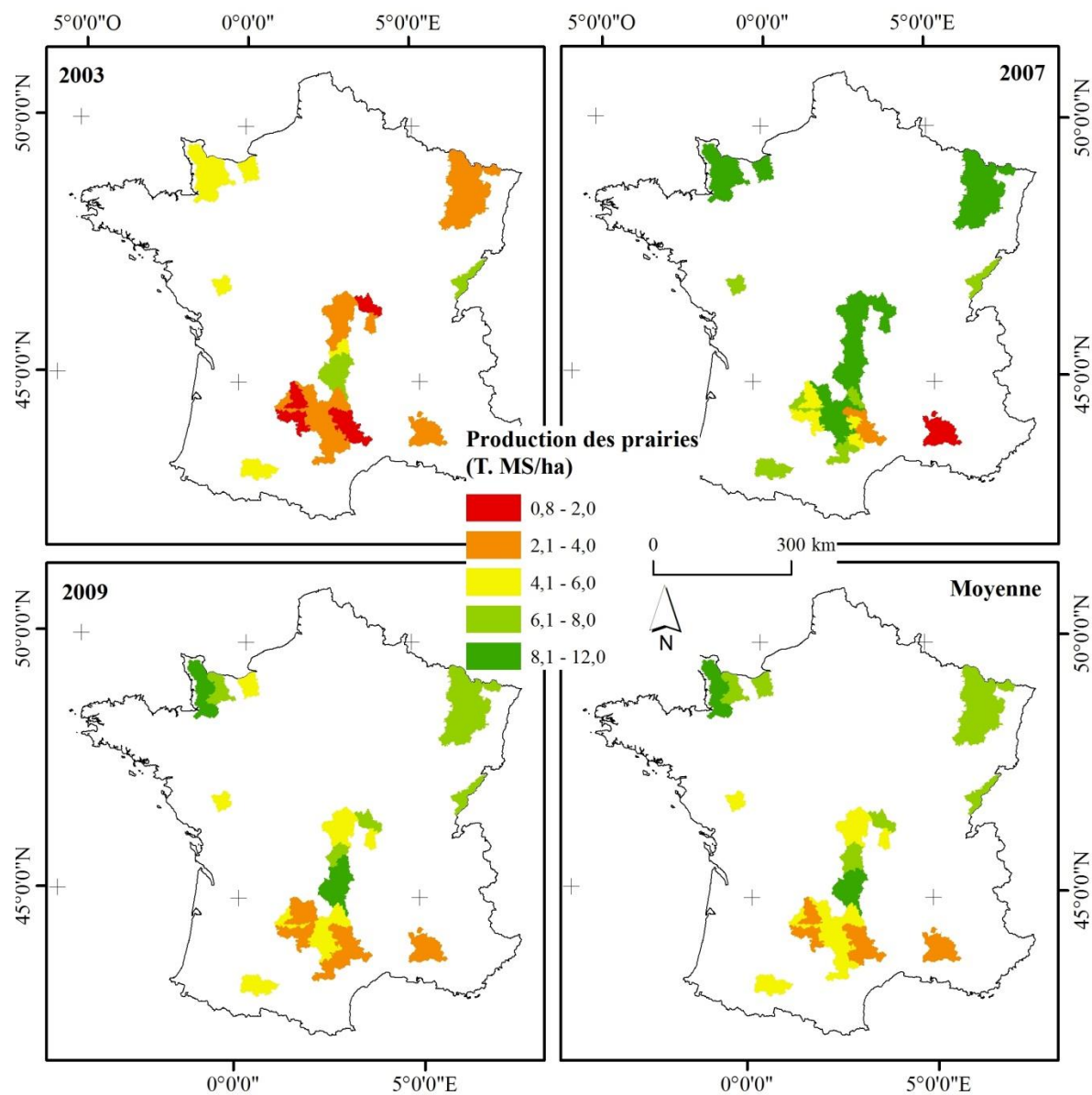


Figure 2-16. Production des prairies selon le dispositif ISOP des 25 régions fourragères en 2003, 2007, 2009 en moyenne pour les cinq années sélectionnées.

Troisième partie

Développements méthodologiques et résultats obtenus

Chapitre 3 : Validation de l'indice de production fourragère produit à haute résolution spatiale

L'indice de production fourragère (IPF) utilisé dans le produit d'assurance des prairies de Pacifica s'appuie sur l'utilisation d'un paramètre biophysique, le fCover, calculé à partir d'images satellitaires. Or, actuellement, il n'existe pas de consensus pour déterminer quelle information exploiter dans les domaines du visible et du proche infrarouge pour suivre la production de biomasse des prairies. Dans ce contexte, il nous est apparu nécessaire de valider le choix du fCover.

Les choix méthodologiques

La méthode définie a pour objectif :

- De s'assurer que le fCover, parmi les indices de végétation, présente un potentiel élevé pour le suivi de la dynamique des prairies ;
- De quantifier la qualité de l'estimation de production par comparaison avec des données de production mesurées au champ.

Un premier choix méthodologique a été de travailler à l'échelle de parcelles de prairies sélectionnées pour la diversité des couverts représentés. Cela a permis d'évaluer les performances des indices de végétation testés pour des caractéristiques des prairies variables.

Un deuxième choix méthodologique a porté sur la méthode de mesure de la production de biomasse des prairies étudiées. Parmi, les méthodes existantes, nous avons préféré celle dite destructive (coupe d'herbe) à celle qualifiée d'indirecte (mesure de hauteur d'herbe). Bien qu'elles soient plus chronophages et fastidieuses, elles permettent de lever des incertitudes sur la qualité de la donnée de référence produite.

Un troisième choix a concerné les indices de végétation à confronter à l'indice fCover. Nous avons opté pour la fAPAR, qui est le paramètre biophysique d'état du couvert végétal utilisé dans les modèles d'efficience de production à la base du développement de l'IPF.

Enfin, celui d'utiliser des séries temporelles d'images HR pour le calcul de l'IPF constitue le quatrième choix méthodologique important de ce travail. En effet, la résolution spatiale de ces images permet de diminuer les erreurs rencontrées avec les images à moyenne résolution spatiale, à savoir : les méthodes d'échantillonnage pour gérer l'hétérogénéité des surfaces et la cohérence spatiale entre les images satellitaires et les données de référence. Il est plus facile

de comparer une mesure *in situ* avec un pixel de quelques dizaines de mètres plutôt qu'avec un pixel de l'ordre de la centaine de mètres.

Les principaux résultats

Les séries temporelles d'images satellitaires à haute résolution spatiale utilisées pour calculer les indices de végétation proviennent de quatre capteurs différents. L'analyse des profils de fCover et de fAPAR montre que les valeurs obtenues pour ces indices ne sont pas affectées par des effets relatifs aux caractéristiques des capteurs, offrant une réponse à une des limites évoquées à l'utilisation de l'indice de végétation NDVI pour ce type d'application. Ce résultat permet :

- De valider le choix du paramètre biophysique comme variable descriptive pour le suivi de la production de biomasse des prairies ;
- De valider la méthode développée par AIRBUS D&S pour l'obtention des paramètres biophysiques.

Le jeu de données constitué couvre la période allant du début de la pousse de l'herbe en mars à la date de récolte pour chaque parcelle qui, selon les cas, correspond à la fin de la période de croissance active de l'herbe ou survient pendant la sénescence.

La relation établie entre l'IPF et les mesures de biomasse en utilisant l'ensemble du jeu de données montre un niveau de corrélation bon ($R^2 = 0,75$). Elle est meilleure ($R^2 = 0,81$) si l'on considère dans le jeu de données uniquement les mesures de biomasse acquises pendant la période de croissance active des prairies.

Une analyse plus détaillée est réalisée en regroupant les données par parcelle, par type de couverts prairiaux, par période de récolte ou selon les conditions climatiques. La relation entre l'IPF et les mesures de biomasse n'est pas stable : les coefficients de pente varient. Ce résultat met en évidence que d'autres variables explicatives doivent être intégrées dans la méthode de calcul de l'IPF pour augmenter la qualité de l'estimation de production de biomasse.

Ce travail, publié dans une revue de rang A, est décrit en détail dans l'article qui suit.

GIScience & Remote Sensing, 2015
Vol. 52, No. 1, 94–113, <http://dx.doi.org/10.1080/15481603.2014.993010>



Development of an index-based insurance product: validation of a forage production index derived from medium spatial resolution fCover time series

Antoine Roumiguié^{a*}, Anne Jacquin^a, Grégoire Sigel^b, Hervé Poilvé^b, Bruno Lepoivre^c and Olivier Hagolle^d

^a*Ecole d'Ingénieurs de Purpan, Université de Toulouse, INPT, UMR 1201 DYNAFOR, 75 voie du TOEC, BP 57611, F-31076 Toulouse Cedex 03, France;* ^b*Airbus Défense and Space, 5 rue des satellites, 31400 Toulouse, France;* ^c*Marchés de l'Agriculture et des Professionnels, Crédit Agricole Assurances Pacifica, 8/10 boulevard de Vaugirard, 75724 Paris Cedex 15, France;* ^d*CESBIO, UMR 5126 CNES-UPS-CNRS-IRD, 18 avenue Edouard Belin, 31062 Toulouse Cedex 09, France*

(Received 28 July 2014; accepted 25 November 2014)

Abstract: An index-based insurance is being developed to estimate and monitor forage production in France in near real-time based on a Forage Production Index (FPI) derived from the Fraction of green Vegetation Cover (fCover) integral, obtained from medium spatial resolution time series. This paper presents the first step of the scientific validation implemented. The grassland parcels, the field protocol established to collect biomass production data, and the method used to get the fCover are described. Local ground measurements of biomass production are compared with FPI values obtained from high resolution space-based images. Discrepancies between the two variables are quantified by the coefficient of determination, the mean square error and the normalized root mean square error. First, fCover derived from the four sensors are coherent demonstrating the ability of the algorithm used to provide a consistent way of calculating fCover. Second, for the whole dataset, the scatter plot between FPI and biomass shows an acceptable correlation ($R^2 = 0.75$) improved when only taking into account data recorded up until the production maximum ($R^2 = 0.81$). Third, the analysis carried out on the scale of the parcels, grass species, period of mowing or climatic conditions reveals variability on the regression coefficients indicating that other explanatory variables should be integrated to better compute the FPI.

Keywords: Validation; fCover; grassland production; time series; index-based insurance.

3.1. Introduction

In France, grasslands cover 44% of arable land, or 12.8 million ha (Agreste, 2014), and are crucial for supporting livestock. However, they are very sensitive to climatic events (Grime *et al.*, 2000; Knapp *et al.*, 2002): with drought representing a major production peril faced by hay growers. Depending on the amount and timing of rainfall, the quantity and quality of the hay will change significantly (Yang *et al.*, 2008; Ma *et al.*, 2010). Long dry periods are one of the biggest threats to hay yield and quality (Stampfli et Zeiter, 2004; Craine *et al.*, 2012a).

In the case of grasslands being deteriorated after an extreme climatic event, compensation provided to farmers are calculated based on an assessment of their losses of hay production. The data used by the French Ministry of Agriculture for this purpose are taken from the ISOP (Informations et Suivi Objectif des Prairies) model (Ruguet *et al.*, 2009). Since 2010, the French State has gradually transferred risk coverage to the private sector to realize savings (Ministère de l'Agriculture, 2013; Mosnier *et al.*, 2014).

For private insurers, this represents guaranteed capital amounting to approximately €10 billion. For forage, the traditional insurance systems used for cereals, oil and protein crops, vegetables, vineyards, fruit, and maize silage are not applicable for three major reasons. First, grassland production is not easily measurable. The grassland management system may vary highly from one farm to another and according to annual weather conditions. Second, the grasslands are harvested several times a year and/or are grazed. Finally, it is difficult to estimate forage production losses. The forage produced is usually largely consumed by animals (around 90% of total production). This information does not appear in farm accounts and a historical reference of production does not exist. Because of these reasons, accurate loss estimates are difficult to achieve even when relying on costly, and time-consuming, human expertise.

To overcome these difficulties, Index-Based Insurance (IBI) was developed (Mahul et Stutley, 2010). Unlike traditional insurance schemes which assess losses on an individual basis, IBI offers payouts based on an external indicator, or index, which triggers a payment to all insured farmers within a geographically defined space (Ceccato *et al.*, 2008; Hazell et Hess, 2010). In this system, the index used should be closely associated with the event being insured and not prone to manipulation by either the insured party or the insurer. It exists different kind of IBI according to the data used to derive the index: weather-based, yield-based and satellite-

based index (SBI) (Burke *et al.*, 2010; Binswanger-Mkhize, 2012; de Leeuw *et al.*, 2014). For the latest, "rainfall" and "vegetation estimates" indexes are differentiated.

Table 3-1 shows their strengths and weaknesses regarding three criteria: the basis risk (that is the probability that the index-based payout will not accurately reflect a farmer's loss), the availability of data and the simplicity of product/administration.

For the "vegetation estimates", two types of remote sensing derived index are currently used: vegetation index and biophysical variable. Regarding application of the first, a consensus exists for NDVI (Turvey et McLaurin, 2012). Several operational commercial grassland insurance programs have adopted this approach: in Spain, Agroseguro (2012); in Mexico, Agroasemex (2006); in the USA (Risk Management Agency, 2012); and in Canada (Agriculture Financial Services Corporation, 2014). Other pilot projects are also active: in Argentina (World Bank, 2012); in India (Agriculture Insurance Company Of India Limited, 2010); in Kenya (Chantararat *et al.*, 2013; Vrieling *et al.*, 2014); in Mongolia (Mahul et Skees, 2007); in Zimbabwe (Makaudze et Miranda, 2010) and in Ethiopia (Turvey et McLaurin, 2012).

Even if used on an operational basis, NDVI still presents limits (Rowley *et al.*, 2007). It is a unitless index obtained with respect to reflectance or band Digital Numbers. It is also sensitive to sensor effects, lighting conditions, atmospheric conditions, and soil effects (Trishchenko *et al.*, 2002; Brown *et al.*, 2006; Miura *et al.*, 2006). Unless the same sensor is always used and atmospheric corrections are made for each image, it is not stable over time and in space (Chen *et al.*, 2011; Gao *et al.*, 2013).

The second category of index is based upon vegetation biophysical variables, especially the Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation fAPAR and the fraction of green cover fCover. On the contrary of the vegetation index, these parameters provide physically-meaningful measures of the vegetation (Asner *et al.*, 1998b; Running *et al.*, 2004).

fAPAR corresponds to the fraction of photosynthetically active radiation absorbed by the canopy and depends on canopy structure and illumination conditions (Baret *et al.*, 2007). It is a very useful input to a number of primary productivity models based on simple light use efficiency considerations (Gower *et al.*, 1999). To better estimate biomass production, it is meaningful to associate it with climatic variable, the most important being the solar radiation (Monteith et Moss, 1977).

fCover corresponds to the proportion of ground covered by active vegetation when the scene is observed vertically. Computed from leaf area index LAI and other canopy structural information, it does not depend on variables such as geometry of illumination. For these reasons, vegetation biophysical parameters are very good candidates for replacing classical vegetation indices for monitoring green vegetation in grassland ecosystems (Baret et Weiss, 2010; Chen *et al.*, 2010; Meroni *et al.*, 2014a).

Table 3-1. Strengths and weaknesses of "rainfall" and "vegetation estimates" indexes regarding three criteria: the basis risk, the availability of data and the simplicity of product/administration.

Criteria	SBI insurance using Satellite Rainfall estimates		SBI insurance using Satellite Vegetation estimates	
	Strengths	Weaknesses	Strengths	Weaknesses
Basis risk	Production loss measured objectively ¹ PMW sensors give better estimations than TIR sensors ²	Calculated from Thermal Infrared (TIR) or Passive Microwave (PMW) sensors : high level of uncertainty in estimates ¹⁻³⁻⁴	Vegetation Indices sensitive to drought ⁵⁻⁶ Production loss measured objectively ⁷⁻⁸⁻⁹ Good correlation with energy uptake by growing and senescent plants ⁵⁻¹⁰⁻¹¹⁻¹²	Not easily verifiable Validation is complex ¹³
Availability of data	For TIR sensor : Spatially continuous acquisition of data over most of the globe ¹ Availability of long archive ²	PMW sensors not geosynchronous: acquisition with low repetition rate ¹⁻³ Short period of record associated with newer satellites ¹ For PMW sensors : coarse spatial resolution ¹	Optical sensors: global spatial coverage with spatial resolutions between 250m and 8km and acquired continuously on a daily basis. ⁴⁻¹⁰⁻¹⁴	Cloud contamination ¹⁵
Simplicity of product / Administration	For PMW sensor : method is more direct than TIR techniques ²		Good potential of acceptance from farmers ¹⁶	Mixed land cover types in pixels requires complex data process ³

Source : 1 : (Dinku *et al.*, 2008); 2 : (Gruber et Levizzani, 2008); 3 : (Hellmuth *et al.*, 2009); 4 : (Gommes et Kayitakire, 2013); 5 : (Gao *et al.*, 2013); 6 : (Black et Stephen, 2014); 7 : (Makaudze et Miranda, 2010); 8 : (Chantararat *et al.*, 2013); 9 : (Potter, 2014); 10 : (Ceccato *et al.*, 2008); 11 : (Duan *et al.*, 2012); 12 : (Phillips *et al.*, 2013); 13 : (Burke *et al.*, 2010); 14 : (Propastin, 2013); 15 : (Meng *et al.*, 2013); 16 : (Binswanger-Mkhize, 2012).

Within France, a research consortium of three partners – Crédit Agricole Assurances Pacifica, AIRBUS Defence & Space, and Grameen Micro-Assurance – was formed in 2010 to develop an IBI using fCover derived from Medium Resolution (MR) satellite image.

The insurance product is based on the hypothesis that the annual integral of vegetation indexes constitutes an indirect measurement of grassland biomass production (Pettorelli *et al.*, 2005). fCover is preferred over NDVI because of its robust properties (Camacho et Torralba, 2010). Using fCover, a Forage Production Index (FPI) is constructed using Equation 3-1.

$$FPI_n = \sum_{i=01/02}^{i=31/10} (fCover_i - NPf) \quad 3-1$$

The FPI is calculated for year n and is the sum of daily fCover ($fCover_i$) between February 1st and October 31st from which a part characterising the proportion of non-productive vegetation (NPf) is subtracted. This last parameter is calculated by forage region (a breakdown of France into homogeneous regions based upon farming practices and levels of production carried out by Hentgen (1982) and from regional production estimates provided by the Ministry of Agriculture's Statistics Department.

In the case of a drought event, farmers are indemnified based on the variation observed within a 6*6 km grid (ΔFPI_n) between the annual FPI and the Olympic average of annual FPI of the last five years (that is the average removing the highest and lowest FPI values) and given by Equation 3-2.

$$\Delta FPI_n = \frac{FPI_n}{Olympic\ average(FPI_{n-1}; \dots; FPI_{n-5})} \quad 3-2$$

This measurement scale makes it possible to monitor local variations in grass production without taking into account the stock-breeders' individual cultural practices. A complete description of the processing chain is described in Roumiguié *et al.* (2015a).

Internal validations at AIRBUS Defence & Space have been performed to test whether fCover provides good estimates of vegetation status observed at the fieldplot scale. These works were generally carried out on cereal crops in the framework of the FARMSTAR product (Coquil et Bordes, 2005; Douche *et al.*, 2008). Furthermore, experiments were performed to validate fCover used in applications to monitor development of plant cover at the global scale (Baret *et al.*, 2005; Poilvé, 2010a).

However, a validation step is required because in the development of the SBI for the grasslands, the fCover application scale is more local and the end-use highly specific. So, an ad hoc two-step validation protocol has been defined.

The first step consists of checking whether the FPI derived from fCover time series can be used to estimate the production of grassland biomass by comparing it to measurements in the field and with index measurements from HR images. The second validation step consists of assessing whether FPI measured from MR images can be used to estimate variations in grassland production. The purpose of this article is to present the results of the first step in FPI validation.

3.2. Methodology

3.2.1. Experimental sites

The study site is centered on the city of Toulouse, France (43° 37'N, 1° 27'E) (Figure 3-1). The region's climate is subject to Mediterranean, oceanic and continental influences. This characteristic means summers tend to be hot and dry while winters are mild and relatively damp.

The average temperature is 6°C in winter and 22°C in summer and the average rainfall over the 1981/2010 period is 638 mm/year. Six grassland parcels are selected according to the following criteria: length of grassland establishment, diversity of grassland species, and types of farming. The characteristics for each of these parcels are detailed in Table 3-2.

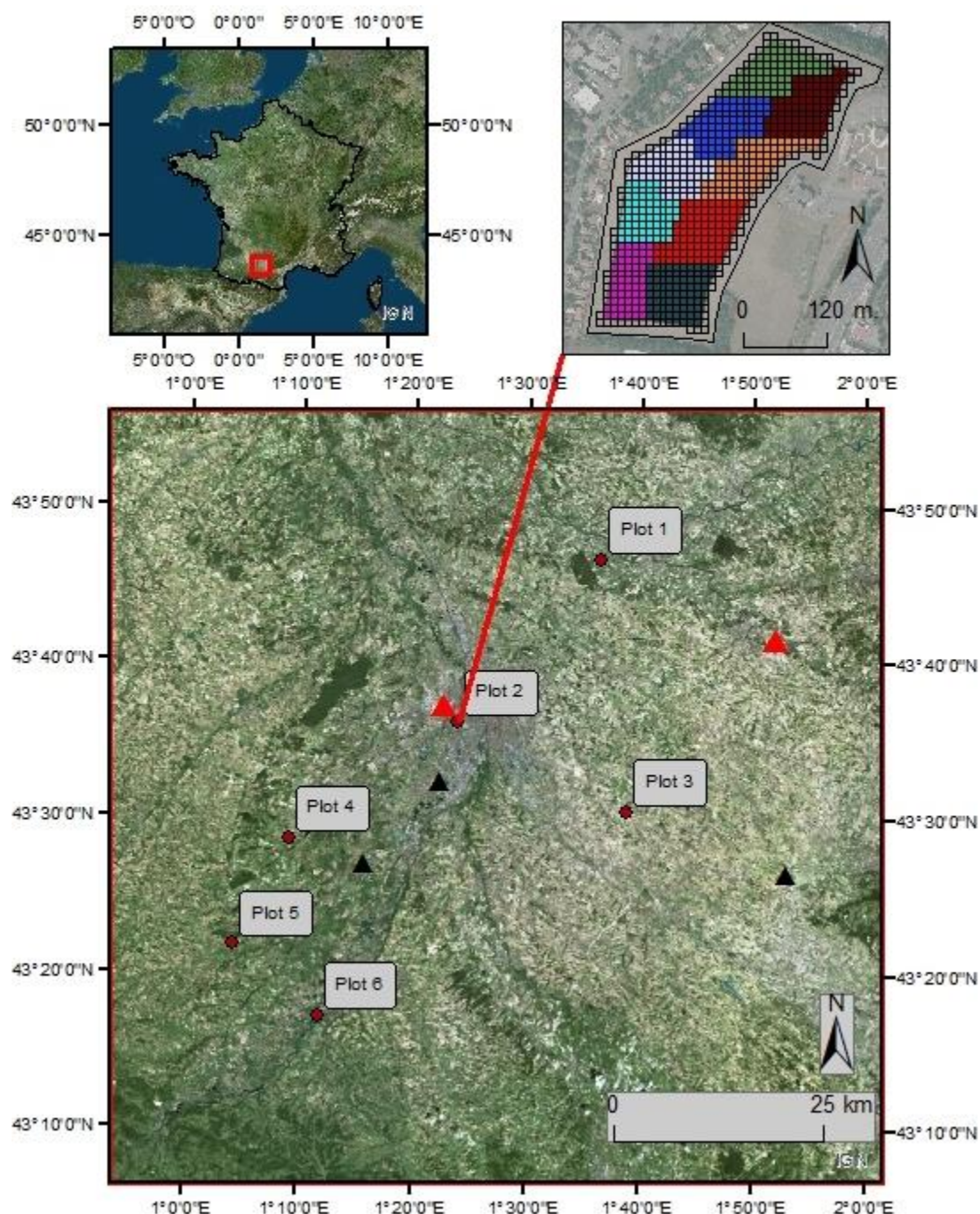


Figure 3-1. Location of the studied plots (●) with meteorological tower (▲ : weather stations for temperature and rainfalls; ▲ : weather stations for temperature, rainfalls and radiation). Top right: example of the sampling methodology with the grid pixel and the colored plots on parcel 2.

3.2.2. Remote sensing data and processing

In 2012, 9 Formosat-2 images acquired between 01/03 and 01/06 are analyzed. In 2013, 24 images from 4 different sensors acquired between 16/02 and 26/06 are processed. SPOT-4 images (14 in all with a spatial resolution of 20 m) are supplied by Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) in the framework of the Take-Five program. Formosat-2 (9 images in 2012

and 5 in 2013 with a spatial resolution of 8 m) and SPOT-6 (3 images with a spatial resolution of 10 m) images are delivered by AIRBUS Defence & Space and Landsat-8 (2 images with a spatial resolution of 30 m) by USGS. All images – supplied orthorectified – are re-projected in Extended Lambert-2 and, for those from 2013, re-sampled to a resolution of 10m.

Table 3-2. Overview of the characteristics of the 6 studied parcels

Parcel number	Year	Grassland type and main species	Area (ha)	Pasture management	Sampling repetition	Plots sampled
1	2013	Temporary with Alfalfa	7.3	Exclusively cut for hay production	7 plots / 15 days	35
2	2012	Permanent with mixed Poaceae species	9.4	1 cut in June	12 plots / 7 days	168
	2013				10 plots / 15 days	75
3	2013	Temporary with Ray-Grass	8.6	Silage in May and cut in June	7 plots / 15 days	43
4	2013	Permanent with mixed Poaceae species	6.0	1 cut in June	6 plots / 15 days	44
5	2013	Temporary with Fescue / Dactyl /White clover	9.5	1 cut in June then pasture	10 plots / 15 days	66
6	2013	Temporary with Fescue / Dactyl	6.8	Exclusively cut for hay production	7 plots / 15 days	57

For all images, fCover and fAPAR are calculated with the OverlandTM software application developed by AIRBUS Defence & Space. This tool extracts biophysical parameters from vegetation by inverting a radiative transfer model while simultaneously considering scene and atmosphere models (Poilvé, 2010b). Overland is inspired by recognized biophysical models (Jacquemoud *et al.*, 2009) such as Lowtran (Kneizys *et al.*, 1988), Prospect (Jacquemoud et Baret, 1990) and Sail (Verhoef, 1984). It is also completed by a "soil" model that simulates the soil effects on reflectance measured by the sensor. This processing makes it possible to obtain biophysical parameter images of vegetation while taking into account characteristics of

both sensors and directional conditions (Sun and viewing angles). The output parameter used here is fCover and fAPAR. For the specific case of the SPOT-4 images that are pre-processed in “top of atmosphere” reflectance (Level 1C) in the framework of the Take Five program, a modification to the OverlandTM processing algorithm is required. Since this software uses radiance data as input, it is necessary to convert the SPOT-4 images from TOA reflectance to radiance before producing the biophysical variables. This conversion is performed taking into account Earth-Sun distance and the solar zenith angle.

Next, an interpolation function is applied between each processed-image date to obtain daily fCover or fAPAR at pixel scale. Interpolation is appropriate here given the dense frequency of data acquisition and the limited time autocorrelation effect in the series processed compared to canopy structural dynamic models (Koetz *et al.*, 2005; Bsaibes *et al.*, 2009; Duveiller *et al.*, 2013). The calculation of FPI is carried out using Equation 3-1 with a null value for NPf given that the 6 parcels are located in the same forage region. To evaluate the performance of fCover, two others methods of FPI calculation using fAPAR are tested (Equations 3-3 and 3-4). Equation 3-3 is constructed like Equation 3-1 except that daily fAPAR ($fAPAR_i$) substitutes daily fCover.

$$FPI_n = \sum_{i=01/02}^{i=31/10} (fAPAR_i - NPf) \quad 3-3$$

In Equation 3-4, the daily fAPAR ($fAPAR_i$) is combined with daily solar radiation (Rg_i) as it is better to associate fAPAR with climatic variable when estimating biomass production (Monteith et Moss, 1977). This analysis is pursued to approximate biomass production with FPI towards a physiological and agronomical point of view. Hereafter, the product ($fAPAR \times Rg$) is named Efficiency index. The effectiveness of adding the solar radiation variable to fAPAR is evaluated.

$$FPI_n = \sum_{i=01/02}^{i=31/10} (fAPAR_i \times Rg_i) \quad 3-4$$

Finally, these three indexes are compared with biomass field measurement.

3.2.3. Biomass field measurements and Spatial sampling strategy

In parallel with the High Resolution (HR) image acquisition period, a sampling strategy is established for each parcel according to the following principle. A grid set on the processed images and corresponding to their spatial resolution (8m for 2012 and 10m for 2013) is created using the ArcGIS software. Sampling points are positioned on the grid using three rules:

- A sampling point has to be centered within one of the grids;
- In order to limit edge effects, a mandatory minimum distance from the parcel edge equivalent to the resolution of one pixel is enforced.
- Sampling points are required to be at least 2 grid cells from any other sampling point.

This makes it possible to take into account any positional errors associated with the GPS in the field and the HR image setting accuracy estimated by AIRBUS Defence & Space at one half-pixel on average. The sampling points by date are selected according to a stratified and systematic method (Martínez *et al.*, 2009) in order to span the spatial variability of fCover at the intra-parcel scale. Parcels are stratified into blocks each with an equivalent surface area. Within each of these blocks, a systematic draw of the points' sampling order is performed with the constraint that the distance must be maximized between the samplings made on close dates. This sampling method, put in place in 2012 on parcel 2, is applied to the 6 parcels in 2013. In total, 488 points are acquired (168 in 2012 and 320 in 2013). The detail for each parcel is shown in Table 3-2.

The method used to measure biomass at the sampling points is based on the protocol put in place by ARVALIS – Institut du Végétal (Protin *et al.*, 2009). The farm machinery used consisted of a motorized mower with a 110 cm cutting bar placed 7 cm above the ground. Grass is cut over a strip approximately 7 m wide, depending upon the amount of standing biomass, over a measured length. The above-ground biomass harvested is then weighed. A sample is taken, weighed, and then placed in an oven at 105°C for 48 hours to calculate a dry weight and deduce the humidity rate. Yield is expressed as the amount of dry matter per unit surface area and is calculated for each sampling point.

3.2.4. Meteorological data

During the parcel monitoring period, temperature data are recorded using MétéoFrance weather stations located close to the parcels (Figure 3-1). Variables collected are daily

minimum and maximum temperature. Using these data, a daily average temperature (T_{avg}) is calculated using Equation 3-5:

$$T_{avg} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad 3-5$$

T_{max} and T_{min} are respectively the maximum and minimum temperatures given by the recording stations close to the experiment parcels. Because grassland development stages are controlled by Degree Days (DD), the data are analyzed on a time scale expressed as a sum of degree days received by the plant cover. The addition of positive daily average temperatures is done with the method used by Al Haj Khaled et al. (2005), Duveiller et al. (2013), and Stöckle et al. (2003). Only positive temperatures from 1st February are accumulated. This 0°C threshold is recommended by de Beurs et Henebry (2010) and Duru et al. (2009) for monitoring grassland biomass in temperate zones.

For computation of the Efficiency Index, solar radiation is also recorded during the parcel monitoring period. The data come from two MétéoFrance weather stations (Blagnac and Lavaur) located close to the parcels (Figure 3-1).

3.2.5. Statistical analysis

The agreement between FPI calculated from the series of HR images (fCover, fAPAR and Efficiency Index) and the production of grassland biomass is quantified using the coefficient of determination R^2 , normalized RMSE (NRMSE), and MSE (Systematic Bias). The resulting model is characterised by the regression coefficient (a). NRMSE (Equation 3-6) is obtained by dividing the RMSE with the average of the FPI (FPI_{avg}):

$$NRMSE = \frac{RMSE}{FPI_{avg}} \quad 3-6$$

The relationship is tested at different levels: all the parcels over the whole biomass measurement period, including the growth and possibly the grass senescence periods (level 1), all the parcels without the data acquired during the senescence period (level 2), the different parcels independently with the effects attributable to weather variations, types of cover, and the length of establishment analyzed simultaneously (level 3), the parcels aggregated into 3 groups to isolate the effects of the species and length of grassland establishment (level 4), parcel 2 only with data acquired in 2012 and 2013 to study the effect of inter-annual weather

variations (level 5) and parcel 3 only where the effect of the farming type was examined with two cuts in the spring (level 6). Table 3-3 presents the six levels of analysis defined. Scatterplot analyses are perfectly suited to illustrate correlation between two datasets (Meroni *et al.*, 2013a).

Table 3-3. Description of the 6 levels of analysis carried out.

Level of analysis	Description	Effect analysed
1	Data from all parcels over the whole biomass measurement period (growth period and possibly the grass senescence period defined according to the production maximum observed)	
2	Data from all parcels without the data acquired during the senescence period	Senescence effect
3	Parcels independently analysed	Weather variations Types of cover Length of grassland establishment
4	Parcels aggregated into 3 groups according to the species and length of grassland establishment <u>Group 1</u> : Permanent grassland with Poaceae species (Parcels 2 and 4); <u>Group 2</u> : Temporary grassland with mono-species or mixed Poaceae species (Parcels 3, 5, 6 and half of Parcel 1); <u>Group 3</u> : Temporary with Fabaceae Species (Alfalfa) (half of Parcel 1)	Species and length of grassland establishment
5	Parcel 2 with distinction between data acquired in 2012 and 2013	Inter-annual weather variations
6	Parcel 3 with distinction between data acquired during the first and the second period of growth	Farming type

3.3. Results

Table 3-4 presents the results of the statistical analyses. Figure 3-2-a shows the scatterplots obtained for Level 1, Level 2 (Figure 3-2-b), Level 4 (Figure 3-2-c), Level 5 (Figure 3-2-d) and Level 6 (Figure 3-2-e). Overall, the different levels of analysis show that the fCover,

fAPAR and Efficiency Index have the same level of correlation with field measured biomass. The values of R^2 and NRMSE indicate that, in each case, the fCover is more effective than the other indices tested. For example, at level 2 of the analysis, R^2 is equal to 0.81 for the FPI calculated with fCover and decreases to 0.77 for both of the other indexes. Values of NRMSE increase with fAPAR and Efficiency Index (fCover = 0.226; fAPAR = 0.228; Efficiency index = 0.262). Based upon this observation, only the FPI computed with fCover are presented and discussed in the following results.

Indicators of the relationship between FPI and field measured biomass calculated for Levels 1 and 2 are good. The quality of the relationship improves (increase in the value of R^2 of 0.06 and decrease in the NRMSE and MSE of 11 % and 36%) when data acquired during the grass senescence phase (shown in red in Figure 3-2-a) are omitted. In Level 1, FPI values overestimate production since FPI calculation method takes into account the fraction of plant cover that becomes senescent or that is exported. Given this result, for the following analysis levels, all data acquired during the senescence period were excluded (this concerns data for parcels 1 and 2).

The results obtained on Level 3 (different parcels) confirm those observed for the whole dataset for the coefficient of determination ($0.71 < R^2 < 0.90$). The variability observed with the other indicators ($0.131 < \text{NRMSE} < 0.203$; $4.3 < \text{MSE} < 65.0$; $3.5 < a < 12.4$) demonstrates that FPI, calculated only from the sum of fCover, cannot fully explain the variability in the biomass production observed between parcels. Furthermore, amongst the parcels of grasses with only a single cut during the study period (P2; P4; P5; P6), an inverse relationship exists between levels of production and the magnitude of the regression slope.

Concerning the analysis by group of grasslands (Level 4), results for the grass fields (Groups 1 and 2) show a good relationship ($R^2 > 0.81$) and a probable effect of the length of grassland establishment (variation of a). In the case of temporary grasslands (Groups 2 and 3), the difference in observation numbers (Group 2: $n = 176$ vs Group 3: $n = 18$) prevents examination effects linked to the nature of the grassland cover (grass vs leguminous plants).

The influence of the weather variations can be seen by comparing the data collected on parcel 2 (Level 5). A significant difference can be observed in the maximum production between 2012 and 2013, which can be attributed to differences in the sums of rainfall accumulated between February 1 and June 15 (178 mm in 2012 vs 296 mm in 2013). In Figure 3-2-d, this variation reflected in the FPI with slope " a " of 11.4 in 2012 and 6.5 in 2013.

Table 3-4. Results of the linear regression between field measured biomass and FPI derived from fCover (green), fAPAR (light green) and Efficiency Index (in italic). All regressions are significant to the Fischer test ($\alpha < 0.001$). *= without data acquired during the senescent period. Figures in brackets indicate the total number of observations in the dataset. NRMSE and MSE are in FPI unit.

Level of analysis	Nature of dataset	N	R ²	NRMSE	MSE	Slope (a)	Max. production (t. of DM/ha) average -std dev
Level 1	All parcels 2012+2013	488	0.75	0.256	135.9	8.1	
		488	0.71	0.257	170.8	8.1	
		488	0.68	0.308	458230291.7	12422.2	
Level 2	All parcels 2012+2013 *	426	0.81	0.226	87.5	7.6	
		426	0.77	0.228	112.4	7.6	
		426	0.77	0.262	264066135.8	11598.8	
Level 3	P1*	28 (35)	0.71	0.139	56.4	6.5	5.96 - 0.51
		28 (35)	0.63	0.151	70.4	6.1	
		28 (35)	0.62	0.188	190284187.5	9712.0	
Level 3/5	P2 – 2013 *	56 (75)	0.85	0.135	53.6	6.8	7.91 - 1.25
		56 (75)	0.85	0.136	60.1	7.2	
		56 (75)	0.85	0.162	140582593.2	11107.0	
	P2 – 2012 *	132 (168)	0.81	0.202	37.2	11.4	3.41 - 0.51
		132 (168)	0.80	0.195	51.0	12.8	
		132 (168)	0.80	0.227	121089715.4	20037.9	
Level 3/6	P3 First harvest	31	0.72	0.203	52.0	5.4	5.22 - 2.09
		31	0.68	0.210	64.8	5.4	
		31	0.65	0.258	146089867.1	7708.1	
	P3 Second harvest	12	0.89	0.131	4.3	3.5	3.49 - 1.49
		12	0.87	0.134	5.5	3.6	
		12	0.86	0.149	25534344.0	7388.5	
Level 3	P4 All plots	44	0.86	0.202	55.2	12.4	4.66 - 0.92
		44	0.84	0.192	77.2	13.7	
		44	0.86	0.220	189777472.1	22488.4	
	P5 All plots	66	0.88	0.151	65.0	7.3	7.28 - 1.04
		66	0.87	0.150	74.6	7.6	
		66	0.86	0.185	203922548.0	11924.6	
	P6 All plots	57	0.90	0.166	60.7	7.0	9.17 - 1.59
		57	0.90	0.160	70.9	7.3	
		57	0.90	0.184	179020148.7	11835.4	
Level 4	Natural grassland *	232 (287)	0.84	0.208	59.9	9.1	
		232 (287)	0.79	0.213	85.1	9.2	
		232 (287)	0.75	0.268	235390619.5	13568.0	
	Temporary Grassland *	176 (178)	0.81	0.224	103.6	7.2	
		176 (178)	0.80	0.218	117.0	7.5	
		176 (178)	0.83	0.229	235678566.2	11749.4	
	Alpha *	18 (23)	0.64	0.144	66.1	6.9	
		18 (23)	0.62	0.149	71.1	6.8	
		18 (23)	0.62	0.183	183438720.4	10873.6	

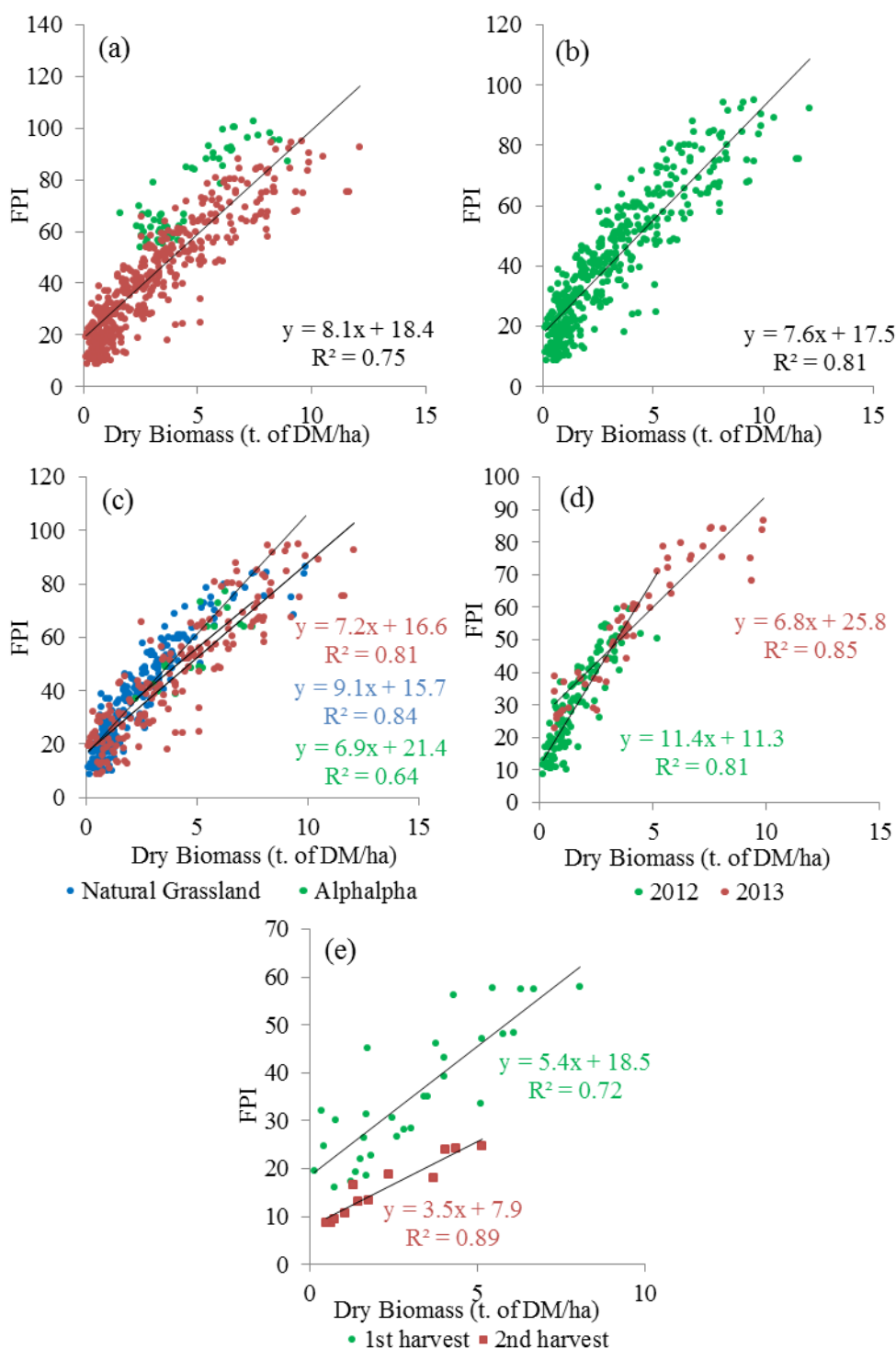


Figure 3-2. Scatterplots showing the correlations between field measured biomass (T of Dry Matter/ha) and FPI derived from fCover (a) for all plots (n=488) - Data collected during senescence are in red; (b) for only the growing period data (n=488); (c) for the data grouped according grassland types (Permanent Grassland with *Poaceae* species n=232; Temporary with *Fabaceae* Species (Alfalfa) n=18; Temporary grassland with mono-species or mixed *Poaceae* species n=176); (d) for the data acquired in 2012 and 2013 on parcel 2 (respectively, n= 132 and 56); (e) for the data acquired during the two growing periods on parcel 3 (n = 31 and n=12).

Lastly, analyses of the data for parcel 3 (Level 6) shows that for an equivalent biomass value with the first or second cut, the value of FPI varies (Figure 3-2-e). Furthermore, the quality of the relationship is better with the second cut as the MSE decreased by 92 % between the two cuts (Table 3-4). Indeed, the plant cover when production resumes after the first cut, with favorable temperatures and without any water deficit, is more homogeneous than that observed coming out of winter.

All of these results show that FPI measured from HR satellite images can be considered a good indicator of grassland biomass production. However, the conclusions drawn from the different levels of analysis suggest an opportunity to introduce additional variables (e.g., agronomical, physiological, and climatic) in the calculation of FPI to improve biomass estimates (Polley *et al.*, 2011).

3.4. Discussions

This paper presents the validation of FPI calculated from HR images. Results from all analysis levels indicate that it can be successfully used as a proxy of grassland biomass production, as suggested by Baret *et al.* (2005).

3.4.1. Interest of the fCover as a vegetation estimate for SBI

In the framework of the validation protocol, fCover is calculated from a series of multi-sensor HR images (SPOT-4, SPOT-6, Formosat-2 and Landsat-8). The quality of results obtained show that this biophysical parameter, produced by OverlandTM, provides a measurement that is not sensitive to image acquisition conditions and that is stable over time and in space (Figure 3-3) unlike NDVI (Brown *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2011; Herbold, 2013; Meroni *et al.*, 2013a). These two characteristics mean that FPI provides a good "vegetation estimate" for developing an SBI.

3.4.2. Discrepancies between biomass estimate methods

The differences between FPI (given by Equations 3-1; 3-3; 3-4) and biomass production remain. Results obtained from Level 2 of the analysis show a decrease in correlation once plant cover enters senescence. This can be explained by the methods used to estimate the biomass, either *in situ* or by remote sensing, which do not measure the same phenomena. The FPI calculation method corresponds to the green biomass accumulated over a given period without taking into account the senescent matter, changes in plant physiology, and the decline

in the grass's unit weight resulting from drying (Cayrol *et al.*, 2000; Camacho et Cernicharo, 2011) whereas the *in situ* biomass measurements integrates all these phenomena.

3.4.3. Evolution of FPI computation

To improve biomass production estimates derived from remote sensing data, it is necessary to integrate new weather, phenological and agronomical variables in the FPI calculation. This is confirmed by results from the other levels of analysis. This type of approach has already been considered by Di Bella *et al.* (2004) and Courault *et al.* (2010) through coupling with a vegetation model (STICS-Grasslands type).

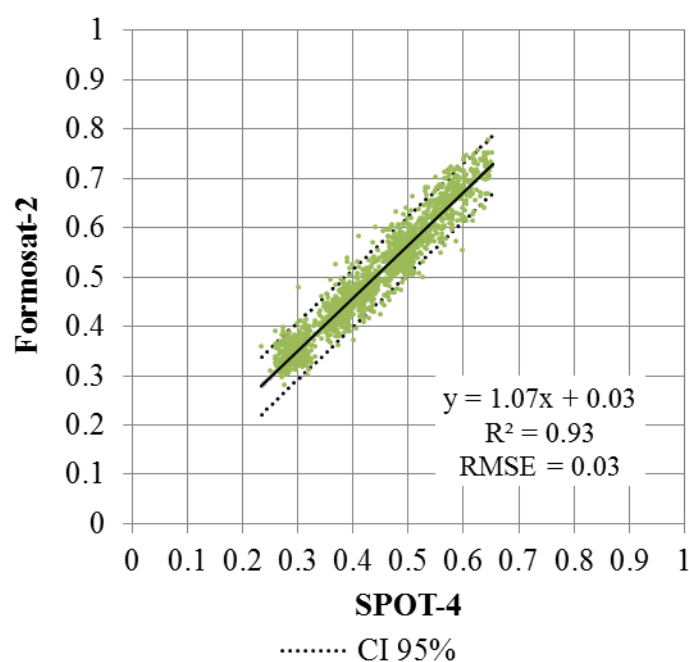


Figure 3-3. Comparison of fCover produced by OverlandTM from multi-sensor HR images: e.g., SPOT-4 and Formosat-2 acquired March, 4th 2013.

Results for the Efficiency Index are not better than the FPI computed only with fCover or fAPAR. This may be explained by the lack of information and the omission of mandatory variables like radiation use efficiency (RUE) and temperature effects on biomass production. Also, radiation data are only recorded from 2 meteorological stations. Because of the weather station distribution and characteristics, five of the six plots received the same radiation data for the Efficiency Index calculation. This could have caused a decrease in variability in this parameter and an underestimated correlation with biomass.

In this framework, a modification to the FPI calculation (Equation 3-7), based on the work of Monteith et Moss (1977), is proposed.

$$FPI(i) = \int_{i=\frac{01}{02}}^{i=\frac{31}{10}} RUE_i \times fT^{\circ}_i \times \varepsilon_c \times Rg_i \times fAPAR_i \times di - \int_{i=01/02}^{i=31/10} (1 - \alpha) \times W_{to} \times \frac{T_{avg_i}}{LLS} \times di \quad 3-7$$

With respect to Equation 3-4, in the first term – transcribing the biomass produced – daily fAPAR and solar radiation ($fAPAR_i$ and Rg_i) are enriched with three new physiological and meteorological variables: the daily RUE (RUE_i), the effect of the temperature on photosynthesis (fT°_i) and the proportion of solar radiation that can be used by the plant cover light-use (ε_c). Based on the work of Duru *et al.* (2010), RUE_i is adjusted according to the different phenological phases (vegetative and reproductive) of the cover and fT°_i is modelled by a quadratic function. ε_c is a constant.

Besides this, a second term corresponding to the senescent fraction of the plant cover is added, which is in line with the works of Duru *et al.* (2009). It consists of an accumulation of the senescent biomass depending on the daily average temperature (T_{avg_i}), the leaf life span (LLS), the remobilization through leaf senescence (α) and an initial level of residual biomass (W_{to}). This last factor requires knowledge of the type of grassland farming (cutting or grazing) whose value is fixed by experts (Duru *et al.*, 2010).

The utilization of the fCover profiles represents an interesting alternative for improving the way this factor is determined in Equation 3-7 by making possible to characterize the type of farming by analyzing intra-annual variations of fCover. Figure 3-4 gives two examples of mean fCover and production profiles observed in a cut parcel (Parcel 3 – cut at X=775°C) and in an uncut parcel during the same period (Parcel 4 – cut at X>1650 °C).

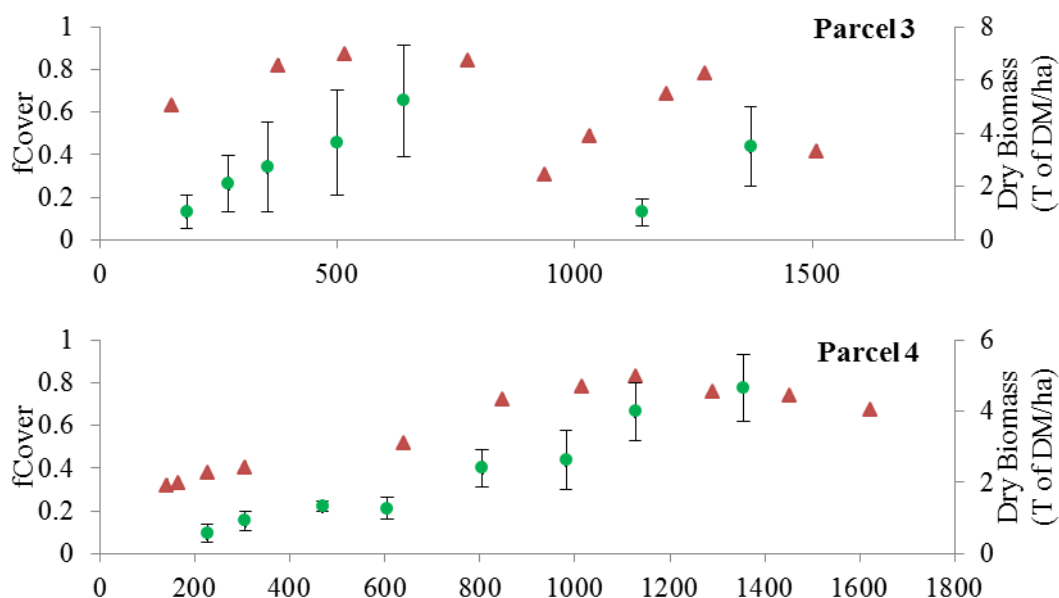


Figure 3-4. Example of fCover (in red) and field measured biomass profiles (in green) for parcels 3 and 4. Parcel 3 was harvested at $x=775^{\circ}$ (06/05/2013). Y-bar lines correspond to standard deviation values.

3.5. Conclusions and perspectives

Analysis of the results makes it possible to identify means to improve the FPI calculation, notably by adding new variables (Equation 3-7). However, implementation of this change may be too complex in operation since it would require access to three types of data with well-defined constraints.

- Spatially continuous meteorological data available in near real-time with an archive that has existed for at least 6 years: databases do exist (e.g. SAFRAN -(Vidal *et al.*, 2010), AGRI4CAST) but their accessibility conditions mean that they cannot be used in an operational context.
- Annually updated national coverage of grassland areas for which the nature of the species and types of farming are known: the compilation of CAP declarations made by farmers in which a distinction is only made between their permanent and temporary grasslands could be used but mandatory information would be still missing.
- Spatially continuous, high time resolution series of fCover: this type of data is only available with MR sensors, as long as sensors providing images with both high spatial resolution and temporal frequency are not operational (Drusch *et al.*, 2012).

Continuing validation of the HR index will make it possible to evaluate the cost and benefits of integrating each variable of interest. These efforts will be conducted in parallel with those

aiming to evaluate the capacity of the FPI, obtained from MR images, to estimate variations in inter-annual productions (second step of the FPI validation protocol).

The protocol was defined according to Baret *et al.* (2005) to take into account the problems of scale change between MR data and field data and has been put in place in Lot and Aveyron (south-west France). Biomass production measurements were taken on mowed grasslands in 2012 and 2013 (on 729 parcels in all) and FPI calculated for 40 grids covering these parcels during same period. The analysis will consist of comparing production variations observed between 2012 and 2013 with FPI and *in situ* measurements.

Chapitre 4 : Validation de l'indice de production fourragère produit à moyenne résolution spatiale

Après la validation de l'IPF obtenu avec des images satellitaires haute résolution spatiale, nous avons posé comme deuxième objectif, la validation de l'indicateur tel qu'il est produit pour l'assurance des prairies, c'est-à-dire issu de données de moyenne résolution spatiale et calculé à l'échelle de mailles de 6 km x 6 km. Mener à bien ce travail implique de trouver des solutions aux problèmes de la définition de la donnée de référence à acquérir et de la gestion du changement d'échelle entre cette donnée de référence et l'information satellitaire à valider.

Les choix méthodologiques

Des deux techniques de validation existantes (comparaison directe ou indirecte), aucune ne s'impose dès lors que l'on se place dans un contexte opérationnel. Un premier choix méthodologique a été fait de les mener en parallèle pour répondre à deux objectifs :

- Quantifier la qualité d'estimation de production des prairies fournie par l'IPF ;
- Proposer *in fine* une approche de validation.

Le deuxième choix méthodologique a porté sur la définition de la donnée de référence à acquérir.

Dans le cas de la comparaison directe, il s'agissait de collecter des mesures de production de biomasse pour un échantillon de prairies contenant potentiellement un nombre conséquent de parcelles du fait de l'échelle de calcul de l'IPF (maille de 3600 ha). Nous avons émis l'hypothèse que, pour obtenir la mesure de production des prairies la plus proche possible de celle observée avec l'information satellitaire, il était préférable de maximiser le taux d'échantillonnage des prairies dans une maille plutôt que de mesurer de manière très précise la production d'un faible nombre de parcelles.

Nous avons alors opté pour une méthode directe, facile à mettre en œuvre, consistant à compter le nombre de bottes par parcelle puis peser un échantillon de bottes corrigé de l'humidité. La principale limite de cette technique est la capacité à constituer l'échantillon de parcelles de prairies sur un nombre de mailles représentatives de la diversité des zones de production fourragère. Cela dépend principalement de la main d'œuvre et du budget alloués à cette tâche et de la propension des agriculteurs à participer à ce travail.

Dans le cas de la comparaison indirecte, en s'appuyant sur les résultats obtenus dans le chapitre 3, nous sommes partis du postulat que l'IPF obtenu à partir d'images satellitaires HR constituait la donnée de référence. Dès lors, le problème d'échantillonnage dans une maille est limité. Toutes les surfaces identifiées en prairies à partir d'une base de données d'occupation du sol servent au calcul de l'IPF.

Dans le cas présent, nous avons utilisé le Registre Parcellaire Graphique de 2012. La principale limite de cette technique est la capacité à constituer des séries temporelles d'images satellitaires HR avec une fréquence d'acquisition régulière et élevée sur les mailles. Cela dépend principalement des conditions climatiques pendant la période étudiée (problème de couvert nuageux persistant) et du budget disponible.

Les principaux résultats

Dans le cas de la comparaison directe, l'échantillon de prairies contient 1074 parcelles provenant de 28 exploitations agricoles localisées dans les départements du Lot et de l'Aveyron et présentant une diversité de systèmes de production (bovin ou ovin viande, bovin ou ovin lait, système mixte viande/lait). Au total, 1553 mesures de production ont été collectées après chaque fauche en 2012, 2013 et 2014. Malgré les efforts réalisés, le taux d'échantillonnage moyen pour les 21 mailles de 3600 ha étudiées était faible (2%). En modifiant la taille des mailles (1152 ha) et leur forme (centrée autour des parcelles sélectionnées), nous avons augmenté le taux d'échantillonnage moyen à un niveau correct (13,4%) pour 13 nouvelles mailles.

D'après ces données, nous avons pu déterminer que la qualité d'estimation de la variation de production des prairies fournie par l'IPF est acceptable avec un coefficient de détermination R^2 égal à 0,71 et une erreur quadratique moyenne de 14,5 %. Ces résultats restent à nuancer : ils proviennent de l'analyse d'un nombre de mailles limité (13) couvrant une zone de production fourragère restreinte sur deux départements. Ils ne représentent pas la situation nationale et les données de référence issues d'images satellitaires peuvent être entachées d'incertitude du fait des méthodes de calcul utilisées.

Dans le cas de la comparaison indirecte, sur les trois années étudiées, deux séries temporelles d'images à haute résolution spatiale ont pu être construites, avec 26 et 22 images en 2013 et 2014 pour la période de février à octobre. Elles couvrent uniquement le département du Lot mais permettent d'analyser 69 et 173 mailles de 3600 ha respectivement en 2013 et 2014 sur 178 mailles potentielles. Le petit nombre de mailles disponibles en 2013 s'explique par la

Chapitre 4 : Validation de l'indice de production fourragère produit à moyenne résolution spatiale

persistance d'un couvert nuageux au printemps sur une partie du département rendant impossible le calcul de l'IPF sur ces zones.

Ce résultat montre que la constitution de série temporelle d'images HR reste un challenge dans ce type d'approche de validation. Néanmoins, sur la base des données disponibles, nous avons montré que la qualité d'estimation de production des prairies fournie par l'IPF est bonne avec un coefficient de détermination R^2 de 0,78 ou 0,84 et une erreur quadratique moyenne de 6,5 % ou 7,4% selon l'année.

Une analyse plus détaillée des résultats permet d'évaluer l'effet de la désagrégation dans l'estimation de la production (coefficient de détermination diminué de 10 % à 13 % et erreur quadratique moyenne augmentée de 60 % à 76 % selon les deux années étudiées) et du pourcentage de prairies (doublement de l'erreur quadratique moyenne entre des mailles contenant moins de 15 % de surfaces en prairies ou plus de 50 %).

Dans la perspective d'utiliser les données Sentinel-2, ces résultats mettent en évidence l'intérêt d'exploiter des images HR comme données d'entrée dans la chaîne de production de l'IPF. Cela permet de s'affranchir de l'étape de désagrégation et de traiter toutes les surfaces en prairies sans considération du pourcentage de prairies dans une maille.

Ce travail, publié dans une revue de rang A, est décrit en détail dans l'article qui suit.

Remote Sens. **2015**, *7*, 11525-11550; doi:10.3390/rs70911525

OPEN ACCESS

remote sensing

ISSN 2072-4292

www.mdpi.com/journal/remotesensing

Technical Note

Validation of a Forage Production Index (FPI) Derived from MODIS fCover Time-Series Using High-Resolution Satellite Imagery: Methodology, Results and Opportunities

Antoine Roumigué ^{1,*}, Anne Jacquin ^{1,†}, Grégoire Sigel ^{2,†}, Hervé Poilvé ^{2,†}, Olivier Hagolle ^{3,†} and Jean Daydé ^{1,†}

¹ Université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Ecole d'Ingénieurs de Purpan, UMR 1201 DYNAFOR, France; E-Mails: anne.jacquin@purpan.fr (A.J.); jean.dayde@purpan.fr (J.D.)

² Airbus Defence and Space, 5, rue des Satellites, 31400 Toulouse, France; E-Mails: Gregoire.Sigel@astrium.eads.net (G.S.); Herve.Poilve@astrium.eads.net (H.P.)

³ CESBIO UMR 5126 CNES-UPS-CNRS-IRD, 31400 Toulouse, France; E-Mail: olivier.hagolle@cnes.fr

† These authors contributed equally to this work.

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: antoine.roumiguie@purpan.fr; Tel.: +33-5-61-15-29-64.

Academic Editors: Olivier Hagolle, Benjamin Koetz, Olivier Arino, Sylvia Sylvander and Prasad S. Thenkabail

Received: 4 June 2015 / Accepted: 31 August 2015 / Published: 9 September 2015

Abstract: An index-based insurance solution was developed to estimate and monitor near real-time forage production using the indicator Forage Production Index (FPI) as a surrogate of the grassland production. The FPI corresponds to the integral of the fraction of green vegetation cover derived from moderate spatial resolution time series images and was calculated at the 6 km×6 km scale. An up-scaled approach based on direct validation was used that compared FPI with field-collected biomass data and high spatial resolution (HR) time series images. The experimental site was located in the Lot and Aveyron departments of southwestern France. Data collected included biomass ground measurements from grassland plots at 28 farms for the years 2012, 2013 and 2014 and HR images covering the Lot department in 2013 (n = 26) and 2014 (n=22). Direct comparison with ground-measured yield led to good accuracy ($R^2 = 0.71$ and $RMSE = 14.5\%$). With indirect comparison, the relationship was still strong (R^2 ranging from 0.78 to 0.93) and informative. These results highlight the effect of disaggregation, the grassland sampling rate, and irregularity of image

acquisition in the HR time series. In advance of Sentinel-2, this study provides valuable information on the strengths and weaknesses of a potential index-based insurance product from HR time series images.

Keywords: Validation; fCover; Grassland; Index-Based Insurance; time series; SPOT4 Take5.

4.1. Introduction

Grasslands are one of the largest ecosystems in the world, covering 52.5 million km² or 40.5% of terrestrial area excluding Greenland and Antarctica. In many countries, they are crucial for supporting livestock activities (Suttie *et al.*, 2005). However, grassland are very sensitive to climatic events (Grime *et al.*, 2000; Knapp *et al.*, 2002), with drought representing a major production peril faced by hay producers. Depending on the amount and timing of rainfall, the quantity and quality of hay can change significantly (Yang *et al.*, 2008; Ma *et al.*, 2010).

To mitigate drought impacts, producers use auto-insurance solutions. It consists in the modification of the production system strategy such increasing hay's stocks, converting grain crop into forage or advance saling of animals (Graux *et al.*, 2013). They can also request indemnification through private or public insurances.

For forage, traditional insurance systems used for cereals, oil and protein crops, vegetables, vineyards, fruit and maize silage are not applicable for three major reasons. First, grassland production is not easily measurable. The grassland management system may vary significantly from one farm to another and according to annual weather conditions. Second, grasslands can be harvested several times a year and/or are grazed. Finally, the forage produced is usually consumed by animals (around 90% of total production). This information does not appear in farm accounts and a historical reference of production does not exist. Because of these reasons, accurate loss estimates are difficult to achieve even when relying on costly and time-consuming human assessment.

To overcome these difficulties, index-based insurance (IBI) was developed (Mahul et Stutley, 2010). Unlike traditional insurance schemes that assess losses on an individual basis, IBI offers payouts based on an external indicator, or index, which triggers a payment to all insured farmers within a geographically defined space (Ceccato *et al.*, 2008; Hazell et Hess, 2010). Different types of IBI exist and are differentiated by the data used to derive the index, such as weather-based, yield-based and satellite-based index (Burke *et al.*, 2010; Binswanger-

Mkhize, 2012; de Leeuw *et al.*, 2014). For the latter, an index correlated with production is computed from satellite imagery.

The information provided by remote sensing is about 'rainfall' (Dinku *et al.*, 2008) or 'vegetation estimates' (Makaudze et Miranda, 2010; Chantarat *et al.*, 2013). For 'vegetation estimates', two types of remote sensing-derived index are currently used (or under consideration) and are often produced with Moderate Resolution (MR) remote sensing products: vegetation index (Mahul et Skees, 2007; Turvey et McLaurin, 2012; Vrieling *et al.*, 2014) and biophysical variable (Baret et Weiss, 2010; Meroni *et al.*, 2014a).

Satellite-derived products and information should be validated, particularly if they are used for policy making, fiscal scrutiny, or indemnities (Roy *et al.*, 2015). To guarantee that the insurance product used to indemnify farmers is based on forage losses closest to that which could be measured in the field, a validation of the remote sensing information produced (including estimates of uncertainties) is mandatory. Remote-sensing product validation is "the process of assessing by independent means the accuracy of data products derived from the system outputs" (Justice *et al.*, 1998b).

The validation of MR remote sensing time series products is particularly challenging because of:

- The limited availability of adequate and independent reference data;
- The variability in situation and sources of errors at a national or global scale;
- The mismatches between the spatial definition of ground observations used as independent data of the target variable and MR pixel size. Together, these factors contribute to difficulties in accuracy assessment and higher levels of uncertainty.

Available methodologies highlight two possible approaches for validation. Both help assess accuracy of the target variable with the same measure on the ground distributed over appropriate sampling schemes. In the first approach, called direct validation, two techniques can be distinguished according to the reference data used.

Direct comparison is based on field data measurements (Zhang *et al.*, 2006). Given that ground data collection is time-consuming and expensive, field measurement often limited in time and space and, consequently, not representative of multiple conditions (Baret *et al.*, 2006). Another limitation is that the compared target variable may be observed using different data collection methods (e.g., remote sensing sensors and ground measurements device). In

contrast, indirect comparison uses High-Resolution (HR) images that are later aggregated to the scale of MR products (Tian *et al.*, 2002a; Morissette *et al.*, 2006). This technique helps to overcome the time-space ground data limitation. Using HR images as an intermediate scale of measurement improves spatial coverage but requires an up-scaling step that introduces new problems related to sampling strategy (Tian *et al.*, 2002b) and the processing of HR time series with irregular image acquisition frequencies (Roy *et al.*, 2015).

An alternative to direct validation is indirect validation (Weiss *et al.*, 2007; Weiss *et al.*, 2014). This approach consists of benchmarking similar remote sensing products for one target variable via intercomparison. Working at the same spatial scale avoids the issue of sampling strategy and the potential use of a large dataset improves the ability to cover a wide range of pedoclimatic conditions and to better estimate uncertainties. However, results from indirect validation cannot be considered an assessment of accuracy as in direct validation approaches because this approach does not involve truly reference data. While some consensus now exists on methods to validate MR products (Baret *et al.*, 2009), new types of HR time series are now available or forthcoming (e.g. Landsat 8 combined with Sentinel-2 data) and this domain of research remains very active (Roy *et al.*, 2015).

In France, grasslands cover 44% of arable land, or 12.8 million ha (Agreste, 2014), and are a key element for livestock production. When drought occurs, farmers are indemnified by the French Ministry of Agriculture. Losses are estimated by the Ministry's Statistics Department with information provided by growers' associations and other collecting agencies. Since 2010, the French State has gradually transferred risk coverage to the private sector to realize savings (Ministère de l'Agriculture, 2013; Mosnier *et al.*, 2014).

In that context, Crédit Agricole Assurances Pacifica, associated with Airbus Defence & Space (D&S), proposed in 2016 an index-based insurance solution which could assess local forage production (Geeraert, 2012; Crédit Agricole, 2013; Bergeot, 2015). They developed an indicator called Forage Production Index (FPI) to estimate and monitor in near real-time the forage abundance in France. This insurance product will be offered to farmers to offset losses from drought and other extreme meteorological events. Processing is fully automatic and is based on the biophysical parameter fraction of green vegetation cover (fCover) obtained from MODIS time series images (at 250 m spatial resolution).

In a previous study (Roumiguié *et al.*, 2015b), a direct comparison between in-situ grassland biomass measurements and FPI derived from fCover measured with HR time series was

conducted. Ground data for validation were collected with a motorized mower and weighed before and after drying to calculate dry matter production of each sample area. Results indicated that fCover was an appropriate proxy for grassland biomass production (Roumiguié *et al.*, 2015b).

The fraction of photosynthetically active radiation absorbed by the canopy (fAPAR) was also analyzed and replaced fCover in the FPI equation (Meroni *et al.*, 2014a). fAPAR depends on canopy structure and illumination conditions (Baret *et al.*, 2007) and is a very useful input for a number of primary productivity models based on simple light use efficiency considerations (Gower *et al.*, 1999). This past research showed that the correlation between biomass and the FPI is good when using either fAPAR or fCover. But, even though the results are promising, a need still exists to validate FPI at the spatial scale of the insurance product.

The objective of this paper is to present an accuracy assessment methodology for the Forage Production Index derived from MODIS fCover time series. FPI calculation is discussed followed by validation of FPI using a direct approach that integrates direct and indirect comparison techniques as recommended by Morissette *et al.* (2006) The methodology was inspired from one developed by the Land Product Validation sub-group of the Committee for Earth Observation Satellites (CEOS) who established best practices and guidelines under which validation of MR products should be made (Morissette *et al.*, 2006). It offers opportunities for testing the potential of HR spatial and temporal time series images from platforms such as Landsat 8 and Sentinel-2 to improve measures of forage production losses compared to MR time series.

4.2. FPI processing methodology

The FPI processing chain is a fully automatic process (Figure 4-1). Biophysical parameters, in particular fCover and fAPAR, were calculated using the Overland image processing software developed by Airbus Defence & Space. This tool extracts vegetation parameters by inverting a radiative transfer model that couples scene and atmospheric models (Poilvé, 2010a).

Overland integrates most recently developed models (Jacquemoud *et al.*, 2009) (Figure 4-1-A), Low Resolution Transmission (LOWTRAN) (Kneizys *et al.*, 1988) for the atmospheric component, a model of leaf optical Properties Spectra (PROSPECT) (Jacquemoud et Baret, 1990) and Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves (SAIL) (Verhoef, 1984) for the vegetation component.

The vegetation model has been upgraded by adding a 'brown' contribution (for non-productive vegetation) to the foliage. A uniform canopy model would consider a homogenous mixture of green and brown leaves, characterized by separate PROSPECT variable descriptions. Because vegetation in one MR pixel is likely heterogeneous, a dedicated composite canopy model was designed that adds separate contributions from green and bare, or senescent, plots.

The overall model is full Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) and takes into account the sensor viewing and sun illumination directions, though fCover is ultimately computed in a normalized vertical direction. The fCover produced from MR products with this processing chain was previously validated in the Geoland project (Poilvé, 2010a). Soil reflectance is a needed input to the overall model and is obtained once by capturing a spectral signature of local soils from one satellite image. However, this reflectance is allowed to vary locally both in time and space depending on wetness and roughness of the soil surface.

Model inversion was achieved by minimizing a cost function using an optimization technique with a Gauss-Newton iterative procedure. A parameter, called "Fit", is produced that defines the quality of the inversion process by measuring the difference between estimated and observed reflectance values. Lowest values correspond to situations where vegetation cover characteristics are well modeled. In addition to the biophysical processing, clouds are automatically masked in each image.

A compositing algorithm then generates seamless 10-day maps of major vegetation parameters, including fCover. For each pixel, fCover in a 10-day period was selected according to the Maximum Value Composite method (Holben, 1986) applied to the spatially filtered fCover information of each observation (Figure 4-1-B).

Because one MR pixel may contain different land cover types, a disaggregation method based on a statistical approach originally applied to reflectances (Faivre et Fischer, 1997; Di Bella *et al.*, 2004) was used to determine fCover values for grassland (Figure 4-1-C). This method estimates fCover values for each landcover class from the input of fCover estimates for a population and the a priori knowledge of each landcover class' contribution to each pixel (local aspect). Consequently, fCover was calculated at an Elementary Statistical Unit (ESU) scale of 6 km×6 km.

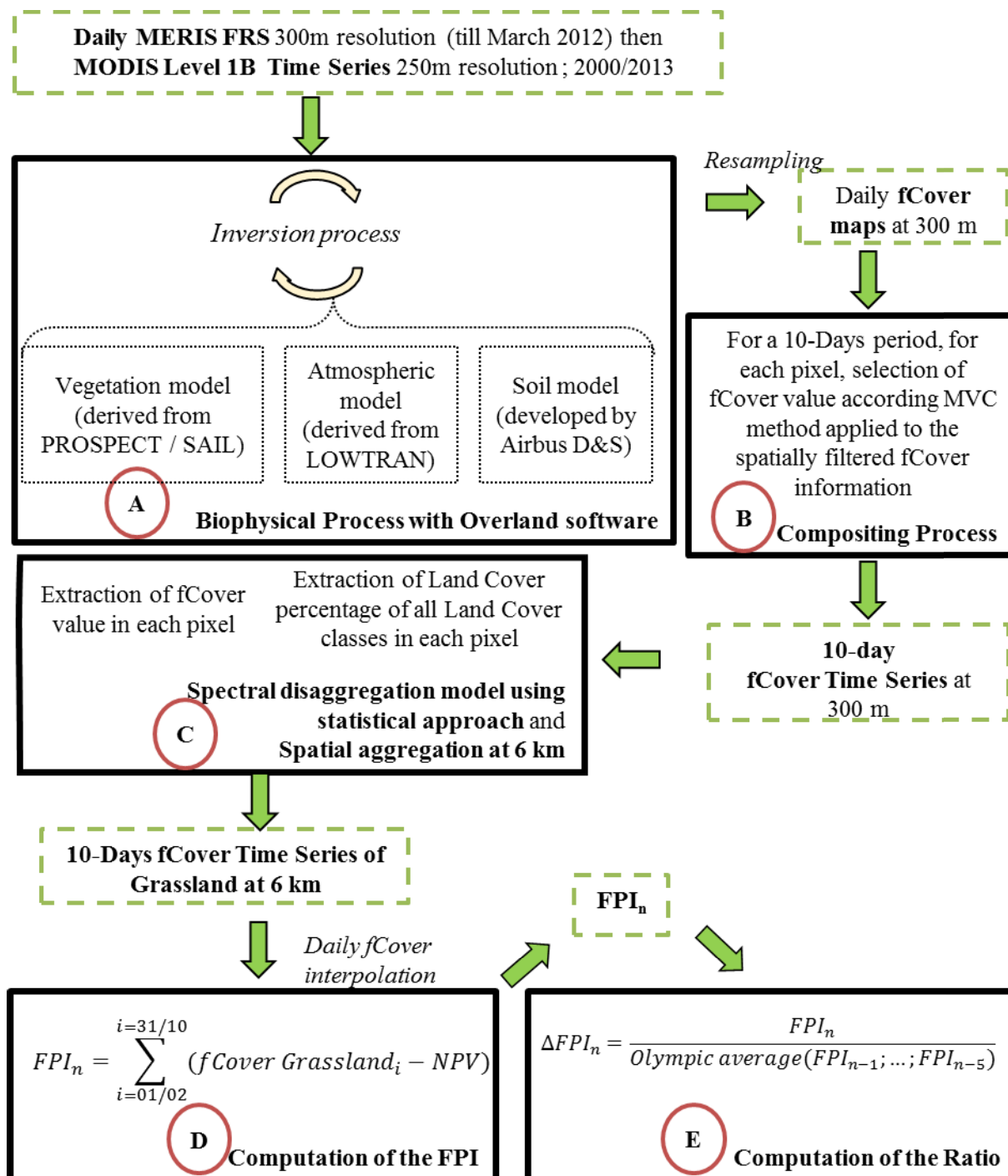


Figure 4-1. The processing chain of the Forage Production Index (FPI). Rectangles in black bold illustrate the main step of the processing chain. Green dotted rectangles are the intermediate products. PROSPECT= Properties Spectra; SAIL= Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves; LOWTRAN=Low Resolution Transmission; D&S= Defence & Space; MVC= Maximum Value Composite; NPV= Non-Productive Vegetation; fCover= Fraction of Green Cover

The land cover database used for disaggregation was provided by farmer declarations in the 2012 Common Agricultural Policy (RPG Anonyme ASP 2012) and completed with the

Corine Land Cover Database 2006 (European Environment Agency, 2012). Surfaces of each land cover in the ESU are summed and form the final land cover database. The grassland class contains natural (native or sown 6 years or more) and temporal (sown less than 6 years with a minimum of 20 % *Poaceae*) grassland, but does not include artificial grassland (sown less than 6 years with a minimum of 80 % *Fabaceae*).

The 10-day ESU fCover values were then interpolated to daily fCover with the moving average method allowing for a daily profile to be extracted for each ESU. The FPI was derived from the fCover integral and used as a surrogate for forage production for a given period of time (Equation 4-1).

$$FPI_n = \sum_{i=01/02}^{i=31/10} (fCover\ Grassland_i - NPV) \quad 4-1$$

The FPI was calculated for a year n and is the sum of daily fCover grassland between February 1st and October 31st ($fCover\ Grassland_i$) from which the part characterizing the proportion of Non-Productive Vegetation (NPV) is subtracted (Figure 4-1-D). This parameter corresponds to biomass that could not be harvested. It is an empirical value, fixed in time and variable across space, based on statistical grassland yield data provided by the French Ministry of Agriculture at department scale.

The variation in biomass production is defined as a ratio between the annual FPI and the historical average FPI. In the insurance product, payouts are indexed based on the ratio between annual FPI and the Olympic average of FPI (ΔFPI_n) of the last five years (Equation 4-2; Figure 4-1-E).

$$\Delta FPI_n = \frac{FPI_n}{Olympic\ average(FPI_{n-1}; \dots; FPI_{n-5})} \quad 4-2$$

This averaging method excludes both the highest and lowest observations from a sample before calculating the average and is a common strategy in agricultural insurance schemes to calculate reference production levels (Finger et El Benni, 2014).

The required inputs for the processing chain are two MODIS/Terra products: Calibrated radiances with 5 bands (between 0.45 and 2.20 μ m) L1B at 500 m spatial resolution (MOD02HKM) and calibrated radiances with 2 bands (between 0.62 and 0.88 μ m) L1B at 250 m spatial resolution (MOD02QKM).

Geometric corrections for the images were applied using the auxiliary file containing geolocation fields L1A at 1 km spatial resolution (MOD03) with the MODIS Reprojection Tool Swath (MRTSwath), deployed by the Land Processes Distributed Active Archive Center (Land Processes Distributed Active Archive Center, 2010).

Biophysical processing was then conducted on the two bands at 250 m (bands 1 and 2) and the five bands at 500 m (bands 3 to 7). Finally, daily fCover were produced at a 300 m spatial resolution in order to be similar to, and compatible with, previous products generated from MERIS data prior to the loss of the Envisat satellite in March 2012.

4.2.1. Direct comparison of field measurements and MR product

Direct comparison focused on analyzing the accuracy of information used in the insurance product to calculate the payouts. It consisted of evaluating the performance of the ratio of annual biomass variation and baseline values derived from MR fCover grassland time series by comparing it to ones obtained with field measurements.

4.2.1.1. Study site

The study site was located in the Lot and Aveyron departments of southwestern France (Figure 4-2). Agricultural lands in this area are dominated by grassland and pasture used mainly used for breeding sheep and cattle (Agreste, 2010) (90% in Aveyron and 66% in Lot). The period for direct comparison of the FPI was 2012 – 2014, beginning in February and ending (for each ESU) according to farmers practice and grassland production.

Figure 4-3 shows variation in three main meteorological parameters (temperature, visible radiation [electromagnetic radiation with wavelengths between 380 and 780 nanometers], and rainfall) associated with grassland production. Variations were calculated by dividing the annual value of a given year by the average annual values of the other two years. Each parameter was summed from February 1 to July 31 (Quintana-Seguí *et al.*, 2008).

This period is forced because of data non-availability after July 31, 2014. This is not really an issue because biomass produced in the first part of the year is the most important for breeders. It provides forage of high nutrient quality and in quantities sufficient to provide approximately 65% of annual needs (Pottier *et al.*, 2012). Second, if cutting spring grass for hay stock is a common strategy within the study area, grassland management in summer and fall would be quite variable (e.g., it could be cut or grazed). Spring, then, is the main season

when biomass production data could be consistently collected each year according to our protocol requirements (see section 2.2.1.2; p.79).

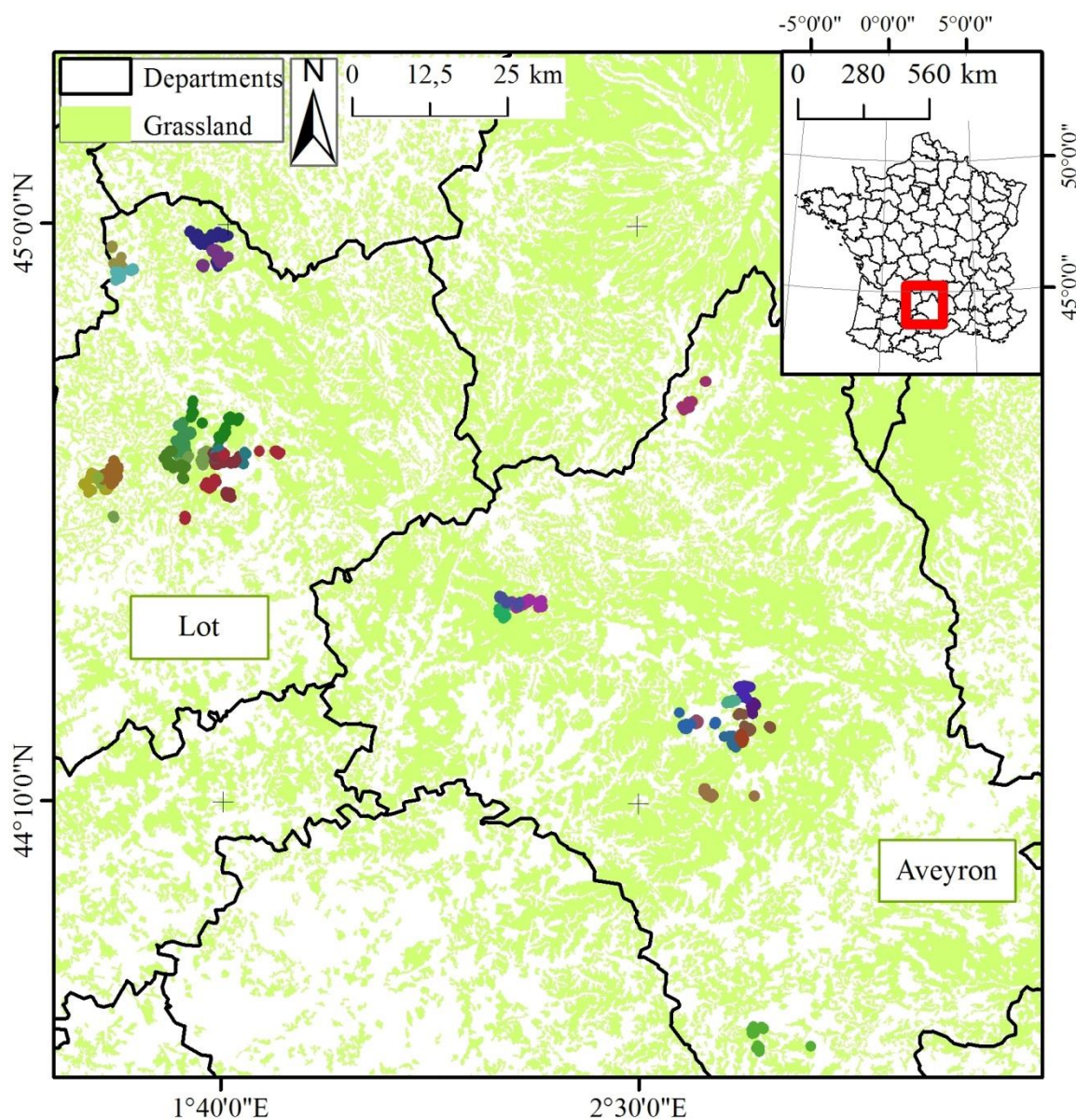


Figure 4-2. Sampling sites in the Lot and Aveyron departments. Colored dots represent the grassland plot sampled with each color representing one of 28 participating farms.

The year 2012 had a water deficit of 10% compared to 2013 and 2014 and a high level of visible radiation, based on the percentage of variation of the averaged sum of rainfall and visible radiation within the study area. For 2013 and 2014, though cumulative rainfall and temperature are slightly different (2014: 1.01% and 1.10%; 2013: 1.14% and 0.93% respectively for cumulated rainfall and temperature), generally wet conditions resulted in a similar level of biomass production in the study area.

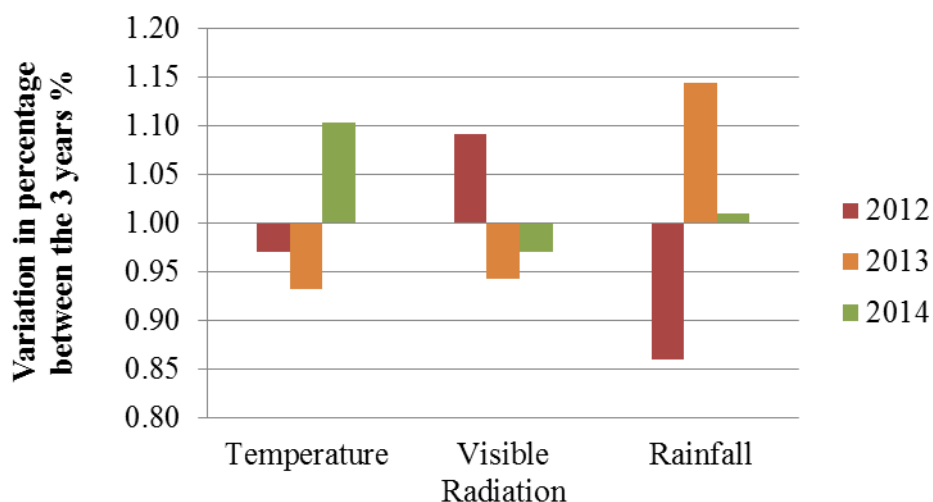


Figure 4-3. Variation in percentage of the averaged sum of temperature ($^{\circ}\text{C}$), visible radiation ($\text{J}\cdot\text{cm}^{-1}$) and rainfall (mm) from February 1 to July 31 in the defined ESU of the study area. Values were calculated by the value of a given year divided by the average of the other two years for each parameter.

4.2.1.2. Method

Biomass production measurements during 2012, 2013 and 2014 were collected from 28 farms (Figure 4-2). The complete dataset contained 290 (679 ha), 768 (1739 ha) and 557 (1203 ha) natural and temporary grassland plots in 2012, 2013, and 2014, respectively. Yields (in tons of dry matter per hectare) for each plot were estimated by multiplying the total number of harvested hay bales by the average plot-specific bale yield. To obtain the latter estimate, measurements of weight and moisture were taken with a pallet scale and portable moisture meter from approximately 5% of the bales harvested in each plot (Figure 4-4-A). Because grasslands have several growing cycles in a year, the annual biomass estimation of the plot corresponds to the sum of the yield after each mowing.

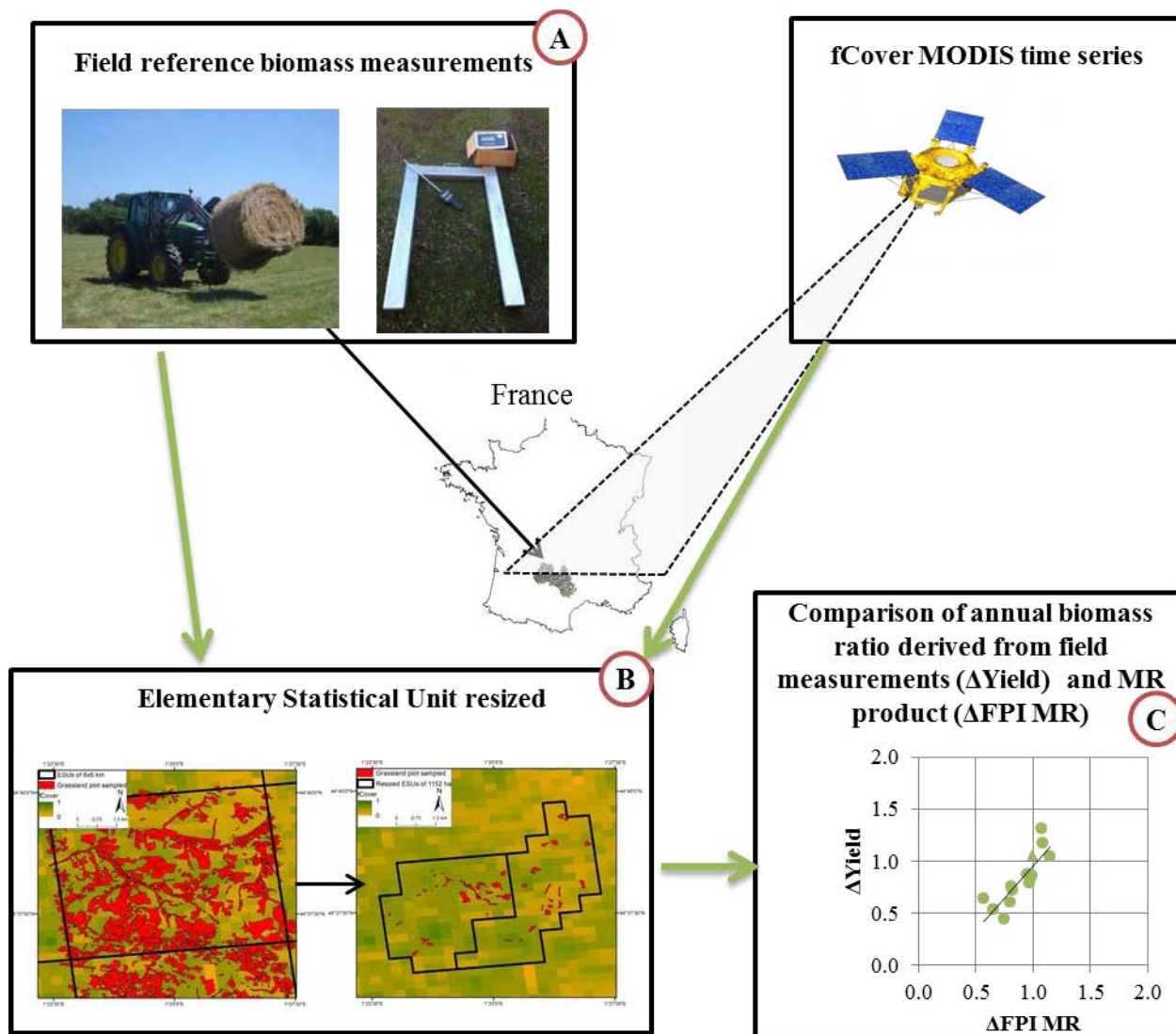


Figure 4-4. Workflow of the direct comparison methodology. fCover= fraction of green vegetation cover; MODIS= Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer; MR= Moderate Resolution; FPI= Forage Production Index

The difficulty of acquiring ground data over large areas and the need to create a representative grassland sample required resizing the original ESU (e.g. 6 km * 6 km) (Figure 4-4-B). In each area where plot data were collected, ESU areas were downscaled from 3600 ha to 1152 ha. This spatial scale of 1152 ha is the best compromise between a high number of ESU's analyzed, a good sampling rate, and consistency with the initial size of 3600 ha.

Resized ESUs, each of which represents 1152 ha, were delineated in the MODIS fCover layer based on the distribution of the sample plots (Figure 4-5). As a consequence, the percentage of grassland sampled increased from from 2% for the original ESU of 3600 ha to 13.4 % for the resized ESU of 1152 ha. Modifying the ESUs was expected to improve the accuracy of

plot-level biomass production estimates by reducing the Root Mean Square Error (RMSE). A total of 13 ESUs of 1152 ha were analyzed.

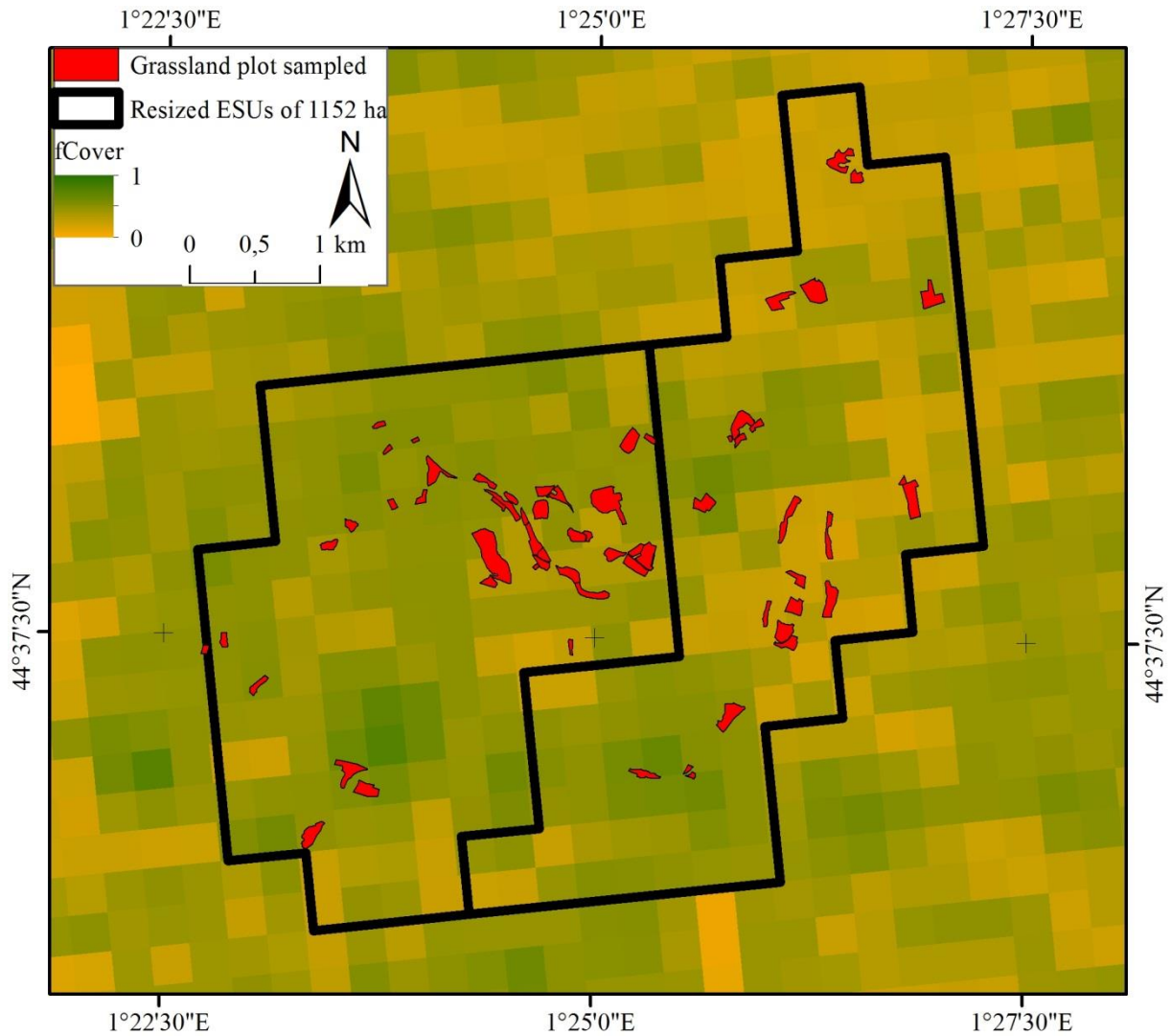


Figure 4-5. Examples of two resized ESUs containing sampled grassland plots and designed for FPI direct comparison. The background image is a 10-day MODIS fCover image from 11/02/12 to 20/02/2012 at a spatial resolution of 300 m.

For each of the 13 ESUs analyzed, a $Yield_n$ index was computed using Equation 4-3 where $YieldPlot_i$ is the annual biomass estimation of plot i and $Surface_i$ the plot area. The $Yield_n$ index was the annual ESU n biomass estimate in tons of dry matter per hectare that was compared with estimates obtained from the MR product.

$$Yield_n = \frac{\sum_{i=1}^j (YieldPlot_i \times Surface_i)}{\sum_{i=1}^j (Surface_i)} \quad 4-3$$

Each year, the ESU biomass production was computed from February 1 to the last harvest in the ESU (information collected during field campaign). FPI_{MR} was obtained with MODIS fCover grassland time series (Equation 4-1) and $Yield_n$ was computed with Equation 4-3 using field measurements. In the case of the FPI_{MR} , the proportion of non-productive vegetation (NPI) is not subtracted.

Next, the biomass production variation index (ΔFPI_{MR} or $\Delta Yield$ depending on the data source) corresponding to the ratio of biomass produced for a given year divided by a baseline value (Equations 4-4 and 4-5) was computed (Figure 4-4-C). Because 2013 and 2014 are similar weather years and significantly different from 2012, the average of 2013 and 2014 biomass production is defined as the reference (or baseline) and 2012 is the year for which the variation of biomass production was analyzed.

$$\Delta FPI_{MR} = \frac{FPI_{MR\ 2012}}{Mean(FPI_{MR\ 2013}; FPI_{MR\ 2014})} \quad 4-4$$

$$\Delta Yield = \frac{Yield_{2012}}{Mean(Yield_{2013}; Yield_{2014})} \quad 4-5$$

The relationship between indices was quantified using RMSE and the coefficient of determination (R^2) was assumed to be a good indicator of model fit. The RMSE obtained with a 3-fold Cross-Validation method ($RMSE_{Pred}$) was also analyzed and allowed the models to be classified. Cross-Validation gives an accurate measure of prediction capabilities (Seni et Elder, 2010). The higher the $RMSE_{Pred}$, the greater overfitting the model (Zhang, 1993).

4.2.1.3. Results and Discussion

Figure 4-6 presents the relationship between ΔFPI_{MR} and $\Delta Yield$. The R^2 is 0.71 and indicates a good overall relationship between the indices. The ranges of biomass production variation indices were quite similar: 0.51 for ΔFPI_{MR} (from 0.56 to 1.07) and 0.88 for $\Delta Yield$ (from 0.44 to 1.32). In 12 of the 13 ESUs (illustrated by dots in Figure 4-6), ΔFPI_{MR} varies in the same way as $\Delta Yield$ meaning that variations in production were detected similarly. One ESU (symbolized by a triangle on Figure 4-6) highlights the single instance where the indices varied in opposite directions. The ratios obtained with field measurements ($\Delta Yield$) indicates a higher biomass production in 2012 compared to the reference value, whereas the ratio from the MR product shows a loss of biomass production ($\Delta FPI_{MR} = 0.99$; $\Delta Yield = 1.06$). The difference between these values is small and does not represent a significant mismatch of the

index variation. Overall, the relationship between ΔFPI_{MR} and $\Delta Yield$ supports FPI derived from MR products as a suitable index to monitor variations in annual biomass production.

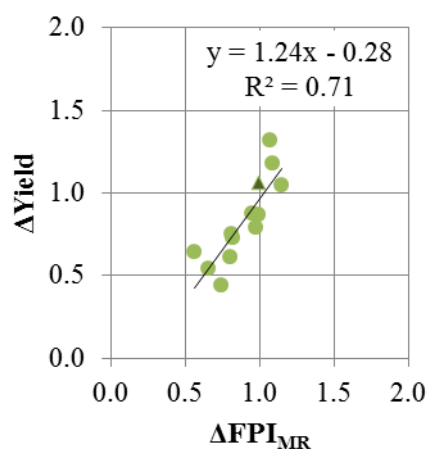


Figure 4-6. Scatterplot of the linear regression between ΔFPI_{MR} and $\Delta Yield$ measured at 13 resized ESUs of 1152ha for the period 2012-2014 in the Lot and Aveyron departments. Circles represent ESUs with the triangle highlighting one ESU where the indices vary in opposite directions. ΔFPI_{MR} and $\Delta Yield$ are respectively given by Equations 4-4 and 4-5.

The RMSE, expressed as a percentage of biomass variation, was 14.5% and the $RMSE_{Pred}$ from the 3-fold cross validation was slightly higher (17.2%). Though this level of error (around 15%) could be considered low, it has to be compared with the range of error deemed acceptable for an index-based insurance product. Given an insurance deductible of 30%, likely to be the most chosen option in the French context (unpublished data), the estimation error is half of the deductible. In the context of this work, the potential mismatch between payouts and actual losses is significant (Hellmuth *et al.*, 2009). However, this level of error was computed from a limited number of data points spanning a narrow geographic extent and is likely not representative of the national situation. Finally, it is important to consider that accumulated errors from both the MR image processing chain and ground data collection are reflected in the RMSE and $RMSE_{Pred}$.

It is also important to note that sampling plots were not randomly selected because of the likelihood that sampled plots the same ESU belong to the same producer. It is difficult to involve many different landowners from the same place. Second, it was not always possible to weigh all harvested bales for yield estimates in a specific plot. In this case, an alternative solution was adopted that used average bale weight for those from similar plots and comprised of the same grass species. This part of the protocol required much time and the total number of sampled bales depended on farmer availability. Third, the necessity to reduce

ESU size was a consequence of the difficulty of investigating many plots in the same area. The percentage of grassland sampled in the ESUs was higher and sufficient to conduct an analysis. However the scale of the index insurance product resulting from this protocol is different and could induce change scaling effects (Wu et Li, 2009) and consequently modify the error estimates.

With this method of FPI validation, replicating accuracy measurement over large areas is limited by time and cost associated with collecting field production data. Moreover, it implies a new scale of comparison, different from the one of the insurance product. To overcome this issue, an indirect comparison was carried out with HR remote sensing data.

4.2.2. Indirect comparison of field measurements and MR product using HR product as intermediate

Indirect comparison consisted of assessing the performance of *FPI* and ΔFPI derived from the MODIS (300 m) and HR (6 m - 30 m) fCover grassland time series. Indirect comparison presents two major advantages compared to the direct method. Using the HR images as the reference allows all grassland plots (defined by the Common Agricultural Policy [CAP]) to be taken into account within an ESU (Figure 4-7). It also negates the sampling issues previously discussed and the need for resizing the original ESUs. In addition, more ESUs could be analyzed thus increasing the reliability of subsequent statistical procedures.

When analyzing results, specific attention was paid to quantifying disaggregation effects in the production of a grassland fCover from MR images and in the assessment of variation in levels of error within an ESU for estimates of grassland biomass production.

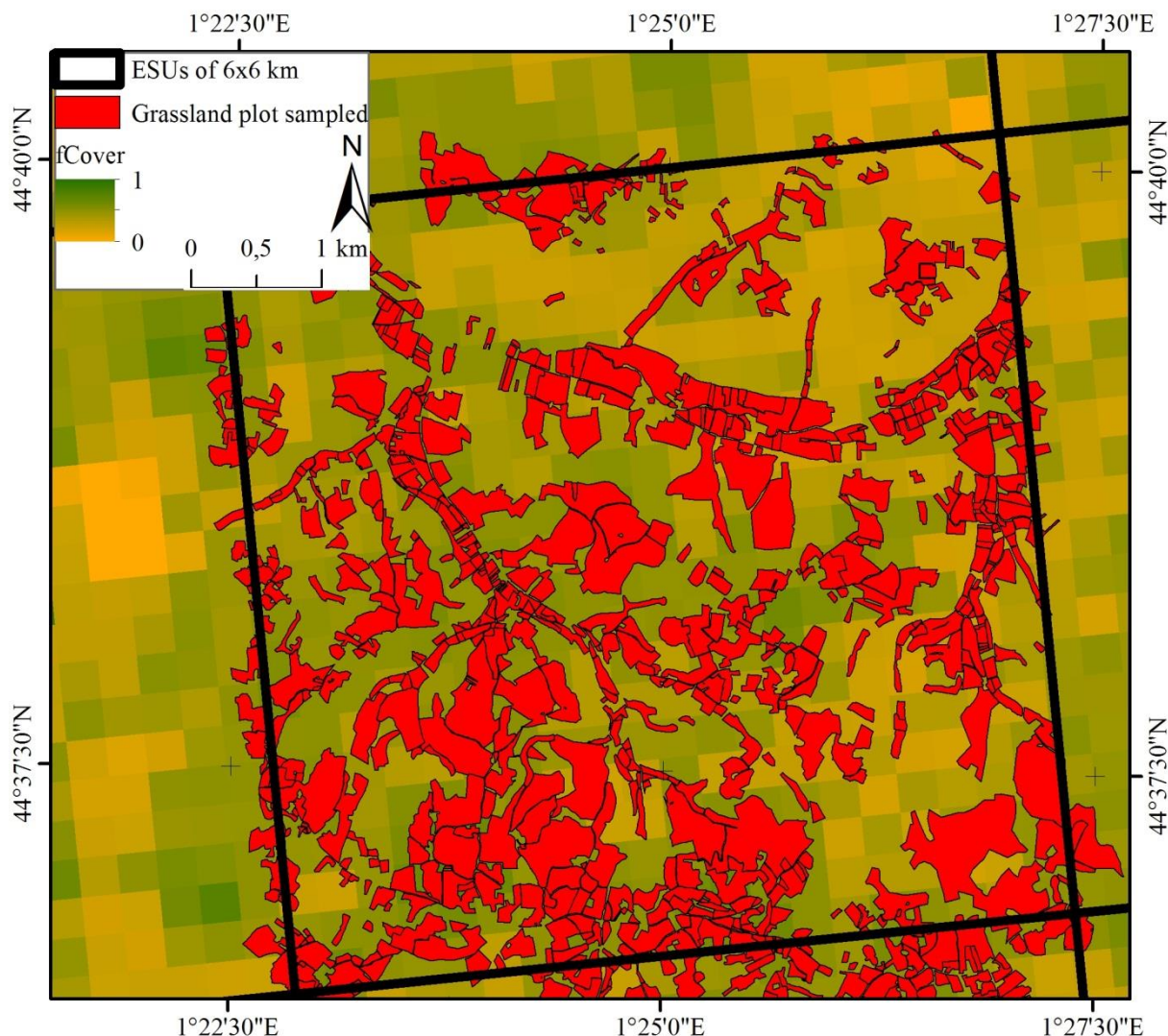


Figure 4-7. Grassland plots extracted from the Common Agricultural Policy database and used for indirect comparison. The background image is a 10-day MODIS fCover product for the period 11/02/12 to 20/02/2012 at a spatial resolution of 300 m.

4.2.2.1. Study site

Indirect comparison was limited to the Lot department and the years 2013-2014 due to the spatial and temporal coverage of the HR images. As previously mentioned, agricultural lands in this study area are dominant. However, the variability in soil and topographic conditions results in diverse production systems across the region. The south is suitable for crop farming and vine-growing whereas the north is specialized in cattle and sheep breeding. Consequently, grasslands are not homogeneously distributed and proportion of grasslands within an ESU varies from 10% in the southwest to more than 70 % in the northeast and central parts of the department (Figure 4-8). A total of 178 ESUs (3600 ha) were analyzed.

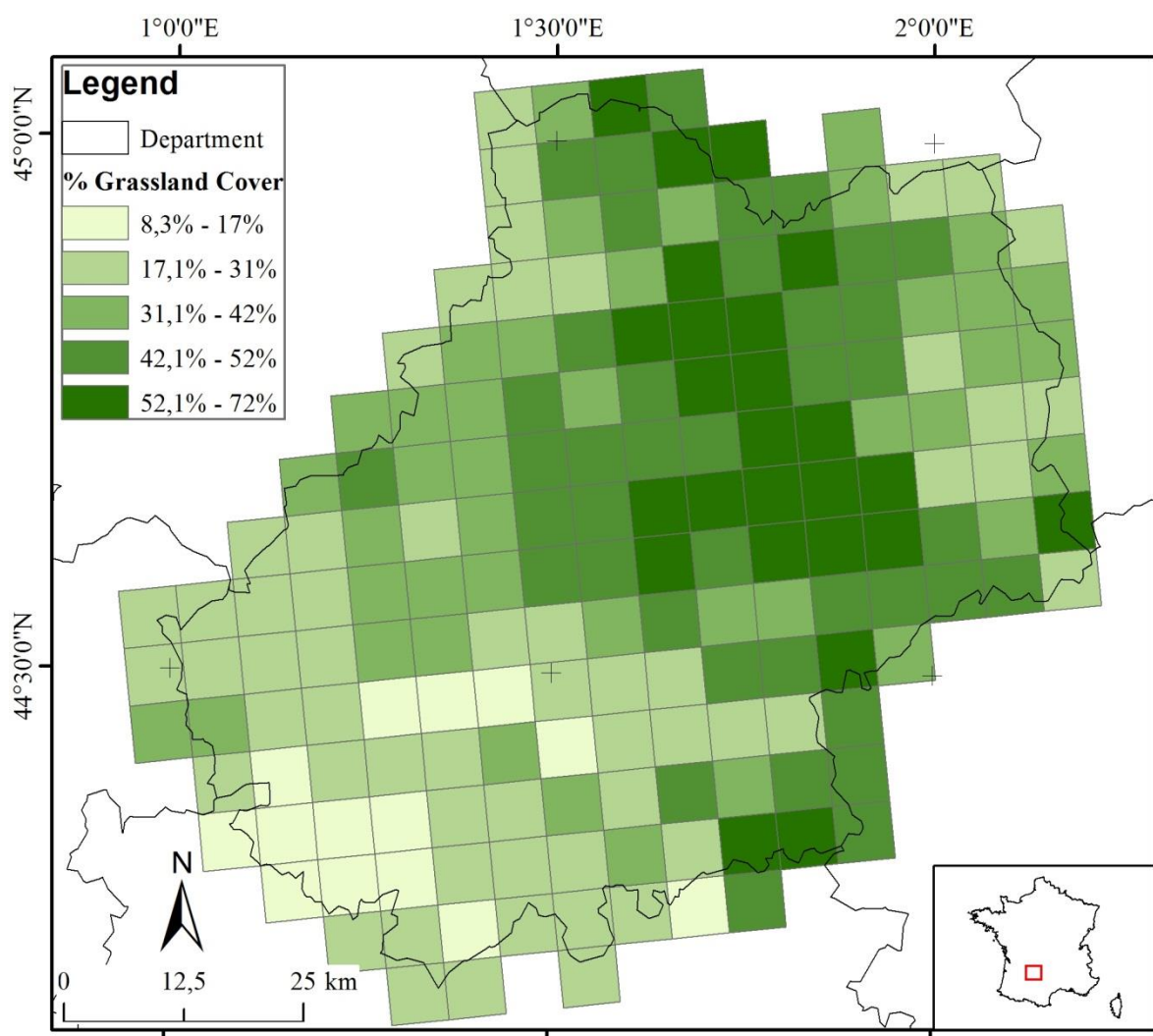


Figure 4-8. Geographic extent of the Lot department with the original ESUs used for indirect comparison of Forage Production Index (FPI).

4.2.2.2. Method

In 2013, 26 HR images from four different sensors acquired between February 16 and October 23 were analyzed (Table 4-1). Almost half were acquired from the SPOT-4 Take5 program (Hagolle *et al.*, 2013). In 2014, 22 HR images from three sensors (Landsat7, Landsat8 and Deimos) acquired between February 12 and November 20 were processed. All images were supplied in orthorectified form, reprojected to Extended Lambert-2 and resampled to a resolution of 20 m using bilinear interpolation.

For all images, fCover was obtained from the Airbus D&S Overland software as described in Section 4.2. A reference of local mean reflectance values for soils was obtained over the

whole study site by using a zone of bare soil from one HR image. Each fCover pixel with a satisfying "Fit" value was conserved for further analysis. Based on Airbus D&S expertise, we used a range from 0.7 to 1.0 as threshold values, depending on the spectral resolution of the sensors and the percentage of cloud cover.

For the specific case of the SPOT-4 images that were pre-processed in "Top Of Atmosphere" (TOA) reflectance (Level 1C) as part of the Take 5 program, a modification to the Overland processing algorithm was required to convert TOA reflectance to radiance before producing the fCover biophysical variable. The method to convert TOA reflectance to TOA radiance uses the knowledge of the reference (i.e. for Sun at zenith) solar irradiance in the SPOT-4 sensor bands and the knowledge of actual Sun elevation, and applies the standard formula that relates TOA radiance and TOA reflectance.

In order to indirectly assess accuracy of FPI derived from MR imagery (FPI_{MR}), high resolution FPI (FPI_{HR}) was generated as follows. Only HR fCover pixels with a good quality ("Fit" parameter) and belonging to grassland plots within the ESUs were selected. The grassland data source used was the 2012 register of declaration made by the farmers in the Common Agricultural Policy. We consider as grassland all plots declared as natural or temporary grassland, moors and heathland. For grassland plots containing less than 40% of bad quality HR pixels, the plot HR fCover is obtained by computing the weighted-average of the HR fCover pixels.

The same process was applied within each ESU. This resulted in an HR fCover grassland time series for each ESU composed of a variable number of HR images with an irregular frequency of acquisition depending on the cloud cover and the location in the study site (spatial extent of the images).

The FPI_{HR} was calculated using Equation 4-1 for the ESU that presented periods between two fCover values of 40 days or less (Zhang *et al.*, 2006). Daily HR fCover was obtained by applying a spline-based time interpolation function between each HR fCover data. As for the FPI_{MR} in the direct comparison, the proportion of non-productive vegetation (NPI) is not subtracted. From the 178 potential ESUs, only 69 remained after accounting for persistent cloud cover during spring 2013.

Chapitre 4 : Validation de l'indice de production fourragère produit à moyenne résolution spatiale

Table 4-1. List of the High Resolution images processed for the computation of the Forage Production Index.

Sensors	Dates		Spatial Resolution	Pre-Processing	Source
	2013	2014			
SPOT-4	16/02; 21/02; 03/03; 03/04; 13/04; 17/04; 22/04; 27/05; 06/06; 12/06; 16/06		20 m	Level 1C TOA ¹ Ortho-rectified	SPOT-4 Take5 Version 2 CNES ²
SPOT-6	17/05; 08/07		6 m	Radiance Ortho-rectified	Airbus D&S ³
Deimos	23/09	15/05; 07/06; 03/07	22 m	Radiance Ortho-rectified	Airbus D&S
Landsat8	14/04; 23/04; 26/06; 12/07; 19/07; 04/08; 13/08; 20/08; 29/08; 05/09; 07/10; 23/10	12/02; 09/03; 01/04; 10/04; 17/04; 19/05; 28/05; 13/06; 20/06; 15/07; 31/07; 16/08; 01/09; 17/09; 03/10; 19/10; 26/10; 20/11	30 m	Radiance Ortho-rectified	USGS ⁴
Landsat7		04/05	30 m	Radiance Ortho-rectified	USGS

¹ Top Of Atmosphere; ² Centre National d'Etudes Spatiales; ³ Airbus Defence & Space; ⁴ United States Geological Survey

The agreement between FPI_{MR} and FPI_{HR} was examined. The indices were calculated for 2013 and 2014 over the same period (March 1 to October 23) according to the temporal coverage of the HR image time series used. The quality of the HR time series used to produce the reference data is discussed in relation with the results. The effect of the disaggregation step is addressed by comparing the characteristics of the linear regressions (slope, R^2 , and RMSE) obtained between the HR and MR indices derived from whole pixel surfaces without landcover distinction (*Production Index: PI_{HR} and PI_{MR}*) or taking into account only grassland surface (FPI_{HR} and FPI_{MR}). This specific analysis is important in this study because it is assumed that disaggregation required by the use of MR images had a significant influence on

the quality of biomass production estimation. To better understand the source of error, standardized residuals of the linear regressions between FPI_{HR} and FPI_{MR} are evaluated in relation to two characteristics of the ESU: the percentage of grassland within each ESU and the sampled grassland surfaces in the ESU to compute the FPI_{HR} .

Finally, the same analysis as the one conducted in the direct comparison was performed. In this case, the ΔFPI_{MR} was compared to the ΔFPI_{HR} (Equations 4-6 and 4-7). The HR time series included images only from 2013 and 2014. Variation in biomass production in 2014 was quantified based on the one for 2013.

$$\Delta FPI_{MR} = \frac{FPI_{MR\ 2014}}{FPI_{MR\ 2013}} \quad 4-6$$

$$\Delta FPI_{HR} = \frac{FPI_{HR\ 2014}}{FPI_{HR\ 2013}} \quad 4-7$$

To better understand the level of error in estimates of ΔFPI_{MR} , the correlation between ΔFPI_{MR} and ΔFPI_{HR} was assessed while a threshold based on the grassland surface decreased the number of available ESU.

4.2.2.3. Results

4.2.2.3.1. Comparison of annual biomass estimations derived from HR and MR product.

Figure 4-9 illustrates the scatterplot MR indices and HR indices for 2013 and 2014.

The indicators (slope, R^2 and RMSE) used to characterize the linear regression all suggest a strong correlation between the MR and HR indices with R^2 values ranging from 0.78 to 0.93, slopes always equal or close to 1 (from 1.00 to 1.16), and RMSEs less than 8 %. These results confirm those obtained with direct comparison that FPI derived from MR product could be considered as a suitable index to monitor annual biomass production variations. However, two main differences are observed.

The R^2 and the RMSE were consistently better in 2014 than in 2013 for both PI and FPI. This may be partly explained by differences in the number of ESUs processed (69 in 2013 and 173 in 2014) which depended on the quality (cloud cover) and the spatial coverage of HR images.

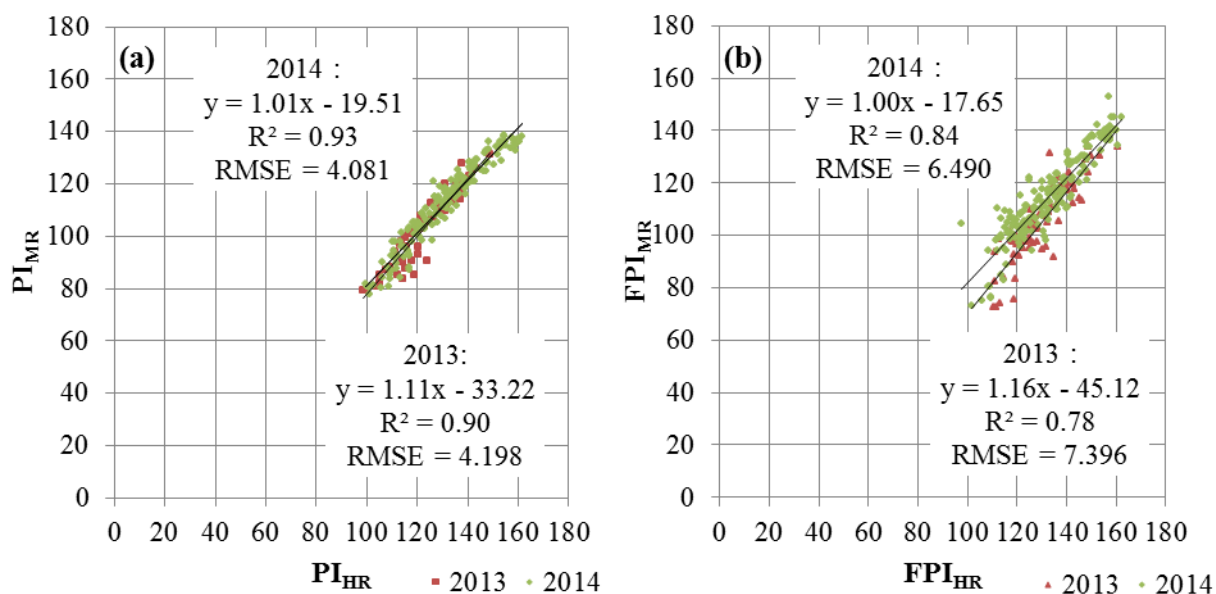


Figure 4-9. Scatterplots of the Production Index (PI) and Forage Production Index (FPI) derived from high resolution (HR) and moderate resolution (MR) images of 2013 and 2014. The HR and MR index values shown were obtained from 69 and 173 ESUs, respectively. While PI indicates overall productivity without land cover distinction, FPI exclusively focuses on productivity in grassland. RMSE= Root Mean Square Error.

Even with a potentially higher number of HR images in 2013 than in 2014 (26 vs. 22 images), the availability of HR images in 2013 was not consistent spatially and temporally. This is due to longer periods of cloud cover (greater than the 40 threshold used for interpolation of daily fCover between two dates) and a more variable spatial extent of HR images used. These results confirmed the importance of assessing the accuracy of the HR time series if it is used as reference data in MR product validation.

The R^2 and the RMSE were consistently better with indices calculated from fCover obtained without landcover distinction than when derived from an fCover based only on grassland pixels. This could be caused by the disaggregation process. Although disaggregation was required when monitoring grasslands with MR data, it could have a negative impact on the quality of the FPI_{MR} produced.

Figure 4-10-a illustrates the standardized residual of the linear regression between FPI_{HR} and FPI_{MR} in 2014 according to the percentage of grassland surface in all ESUs analyzed. The percentage of grassland had an influence on the performance of the disaggregation method with the variability of standardized residuals decreasing as the percentage of grassland increased (from 0.5% to 48%). This suggests that the performance of the FPI derived from the MR product will vary according to the proportion of grassland in a landscape. Further analysis

is required to study the relation between the quality of FPI estimates and the grassland spatial heterogeneity (fragmented or continuous) (Garrigues *et al.*, 2006; Jacob et Weiss, 2014). To minimize the effect of the disaggregation step in the FPI_{MR} validation, it is recommended that ESU with a high percentage of grassland be sampled. This selection will necessarily induce a bias in the analysis and it will reduce the robustness of the validation regarding the ESU with few grassland. So it is important to better define this threshold according to the level of error expected.

Regardless of the percentage of grassland within an ESU, part of the increase in the error measured on certainty in the FPI_{MR} based on fCover grassland pixels would have been associated with the quality of the reference data. The way to calculate the HR fCover for grasslands to produce the FPI_{HR} introduces a bias. If all grasslands in an ESU are used, or only a sample, consequences on the FPI_{MR} error are different.

Figure 4-10-b illustrates the standardized residual of the linear regression between FPI_{HR} and FPI_{MR} in 2014 according to the grassland sample rate in the ESU used to compute the FPI_{HR} . The bias introduced by the reference data is minimized if all grasslands within an ESU are accounted for because the heterogeneity of the grasslands within the ESU is better represented. In addition, this bias could be even more important depending on the quality of the data source used to identify the grasslands. For this latter point, investigation on the best data source is under way as no rule exists in the literature.

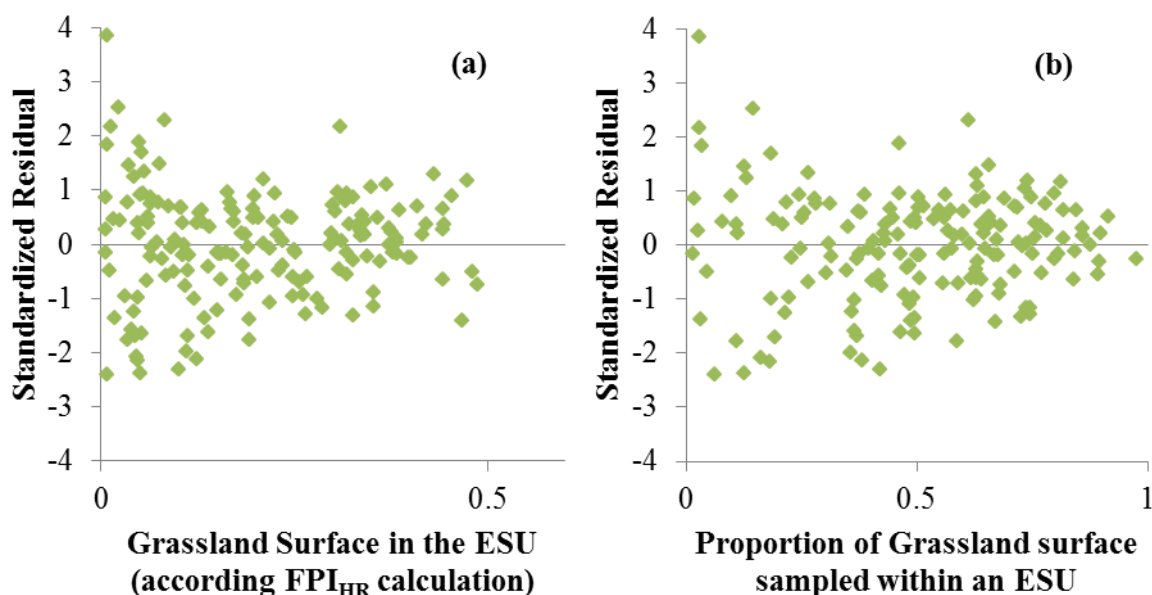


Figure 4-10. Standardized Residuals of the linear regression for 2014 between FPI_{MR} and FPI_{HR} according to (a) the percentage of grassland surface in the ESU (for 173 ESUs of 3600 ha). (b) The percentage of grassland sampled to build the FPI_{HR} in the ESU (for 173 ESUs of 3600 ha).

4.2.2.3.2. Comparison of annual biomass ratio derived from High-Resolution and Moderate-Resolution products

To analyze the effect of the grassland surface on the relationship between ΔFPI_{MR} and ΔFPI_{HR} , available ESUs were selected according to a threshold of the grassland surface. Then RMSE is calculated in each case. Figure 4-11 presents patterns of the RMSE according to the threshold of the grassland surface. RMSE decreases as the amount of grassland surface in the ESU increases. The number of available ESU decreases at the same time. It confirms the previous observations between annual biomass estimations (FPI_{MR} and FPI_{HR}) and highlights the importance of the grassland sampling strategy in the validation activity.

Even if the RMSE is acceptable (from 2% to 4%), the best coefficient of determination is low ($R^2 = 0.33$) compared to the one obtained from direct comparison ($R^2 = 0.71$). It was found with a sample of 28 ESUs and a minimum of 45% of grassland per ESU. A main reason is a small range of variability in biomass production observed between 2013 and 2014 (range of $\Delta FPI_{MR} = 0.15$) compared to the one recorded between 2012 and 2013 (range of $\Delta FPI_{MR} = 0.59$). Providing a conclusion based on this result is misleading. With the SPOT-5 Take5 program conducted in 2015, the HR time series dataset could be enriched with an additional year (2013-2014-2015) providing a way to potentially get more interannual biomass production.

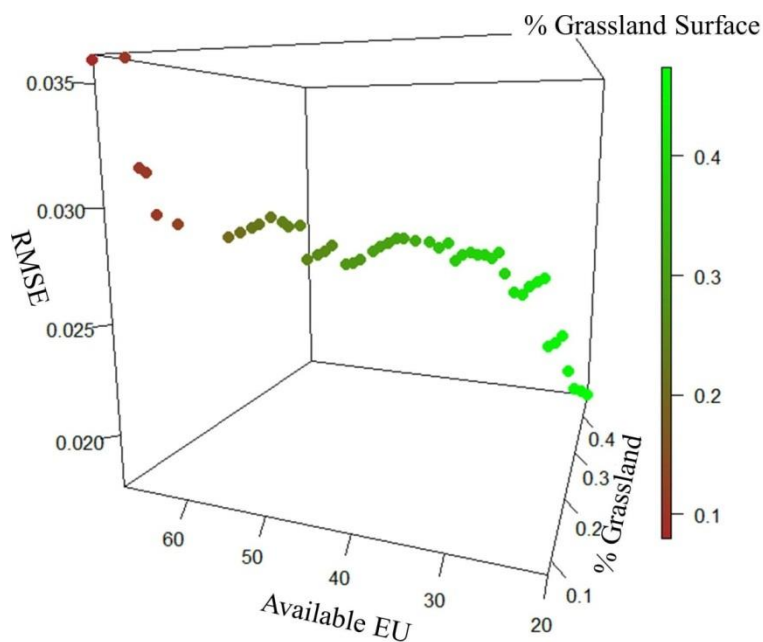


Figure 4-11. Root mean square error of the linear regression for 2014 between ΔFPI_{MR} and ΔFPI_{HR} (Y-axis) according to the percentage of grassland surface in the ESU (Z-axis) and the available ESUs for the analysis according to the grassland surface threshold (X-axis).

4.3. Discussion

A quality assessment of FPI derived from MODIS products and developed to support index-based forage production insurance in France was performed for 3 years (2012 / 2013 / 2014) over a limited geographic extent of 2 departments (Lot and Aveyron). Given the availability of MR vegetation index time series datasets within the scientific community, the number of index-based insurance products has increased. However, validation is often not performed. This work highlights why rigorous validation is critical before releasing a product to the user community.

Validating MR satellite products directly with biomass production data remains difficult. Given the various source of uncertainty in the data, results show satisfactory FPI accuracy (i.e., slope close to 1; R^2 between 0.78 and 0.93; RMSE less than 8 %). Collecting sufficient production data with high quality biomass measurements to obtain a statistically meaningful dataset at the scale of a 6 km x 6 km ESU was very difficult. In this protocol, sampling rate was maximized by collecting biomass data from the highest number of plots possible (290 plots in 2012, 768 in 2013 and 557 in 2014). However, maximizing the sampling rate required use of biomass measurement methods that were less accurate than ones traditionally used at the plot level (e.g., mowers, mechanical and electronic plate meters). Despite these procedural decisions, the sampling rate within original ESU's remains low (below 2 %). Resized ESUs

were defined (from 3600 ha to 1152 ha) using the spatial distribution of grassland plots belonging to a set of farmers. At the scale of the ESU, this enabled reaching a reasonable sampling rate (an average of 13.2%). At the same time, however, it decreased the representativeness of the production data. Plots were not selected randomly in the ESU and often belonged to only one or two producers whose adopted management practices may have led to biomass production differences compared to other local operations.

The validation methodology applied here followed recommendations suggested in the context of the Committee on Earth Observing Satellites – Land Product Validation (CEOS LVP) subgroup for validation of remote sensing vegetation products. Upscaling the fCover value over a larger area was a meaningful way to decrease the influence of the signal coming from surrounding pixels while producing the HR fCover reference data (Tan *et al.*, 2006; Weiss *et al.*, 2007). Nevertheless, modifications to the validation guidelines were made based on the target variable (FPI_{MR} derived from MODIS fCover) and the scale of application (France). Results showed that FPI_{MR} could be used as a proxy to monitor annual biomass production of grasslands and its variations with a satisfactory levels of error. This suggests that FPI has reached validation stage level 1 according to CEOS-LVP criteria (Weiss *et al.*, 2014) and is now ready to be tested with the same methodology in other geographic contexts and compared with similar products (definition of validation stage level 2).

Considering the future availability of continuous HR time series data from platforms such as Landsat-8 and Sentinel-2, the accessibility of HR time series provided by the SPOT-4 Take5 program was a good opportunity to test their potential for an index-based insurance product. Previous work with HR data yielded satisfactory results concerning the link between biomass and the integral of biophysical parameters like fAPAR or fCover (Dusseux *et al.*, 2015; Roumigué *et al.*, 2015b). With this study, the comparison of the FPI_{MR} with the FPI_{HR} provided additional important information about the strengths and weaknesses of such data. The two indices are highly correlated ($R^2=0.78$ and 0.84 respectively for 2013 and 2014) and present a similar capacity to monitor interannual grassland biomass variation. But, using HR time series in the FPI processing chain avoids many issues caused by the use of MR images including disaggregation (direct observation of grassland surface), sampling (capacity to get fCover information on grasslands in ESUs with less than 15% grassland cover (Asam *et al.*, 2013), and validation (direct comparison with field measurements). On the other hand, other problems emerged. The consistency of FPI_{HR} relies on HR times series availability (space-time continuous data available at a national scale), the capacity to process images from

different sensors to produce a robust biophysical variable (Poilvé, 2010a), and the management of large datasets, all of which represent needs and active research questions.

In the case of the index-based insurance product, producing a ΔFPI with HR time series will not be possible before 2022, the time required to constitute a reference after the launch of both Sentinel-2 satellites in 2016. If needed, a possible transition could consist of using both HR and MR products by data fusion as it has been demonstrated that the precision of HR images and the repeatability of MR time series provide an optimal configuration for monitoring grassland production (Zhang *et al.*, 2014).

4.4. Conclusion

In the context of developing an index-based insurance product, this study presents a bottom-up approach for validating the use of an annual FPI as a surrogate for interannual biomass variation at a kilometric scale. Validating MR products remains challenging and constraining, especially given difficulties with ground data collection. Two protocols were designed to achieve a complete assessment of the FPI accuracy.

Direct comparison, where FPI_{MR} is compared with ground measurements of yield, led to good accuracy with $R^2 = 0.71$ and $RMSE = 14.5\%$. The weakness of this analysis, the small number of ESU considered, is overcome by the indirect comparison approach. The HR time series, with images mainly from the SPOT-4 Take 5 program and Landsat8 satellite, allow for an increase in the number of ESUs that can be processed (13 for the direct vs 69 for indirect comparison). The relationships between HR and MR indices were quantified before disaggregation (PI_{HR} and PI_{MR} , $R^2=0.90$ and 0.93 , respectively for 2013 and 2014) and after (FPI_{HR} and FPI_{MR} , $R^2=0.78$ and 0.84 , respectively for 2013 and 2014). The percentage of grassland in the ESU was a key parameter for both variables. Whatever comparison is made, results showed that FPI can be improved by integrating meteorological variables to reduce remaining error (Monteith et Moss, 1977). The assimilation of farmer practices like the method and number of harvests or fertilization should also improve the accuracy of the FPI (Courault *et al.*, 2010).

Moreover, given the pending release of Sentinel2 data, the feasibility of using HR sensors was discussed. This evolution in the processing chain is important and leads to mandatory modifications in data management. The interest in using HR time series is due primarily to elimination of the disaggregation step in the computation of FPI_{MR} (Rembold *et al.*, 2013).

But quantitative results and operational simulation of the final product are still required. Moreover, prior to adopting data from new HR platforms, it is important to keep in mind that several years are needed to constitute a reference from Sentinel-2 data. Beyond index-based insurance, FPI may find other potential applications by providing information about local grassland production in near real time for farmers to better manage their resources or for public authorities to assess regional production anomalies (Atzberger, 2013; Desarmenien *et al.*, 2013).

Chapitre 5 : Proposition d'une nouvelle modalité de calcul de l'indice de production fourragère

Les travaux de validation développés dans les chapitres 3 et 4 ont permis de mettre en évidence les performances de l'IPF calculé à partir d'une approche empirique et ses potentiels d'évolution dans la recherche d'un indice le mieux corrélé possible à la production fourragère observée *in situ*. Nous avons posé comme troisième objectif l'exploration d'une approche alternative.

Les choix méthodologiques

Le premier choix méthodologique a été de constituer un jeu de données de validation sur des zones couvrant une grande diversité de conditions stationnelles où sont implantées les prairies en France et pour des années caractérisées par des conditions climatiques spécifiques.

Dans ce contexte, l'utilisation des données de production fourragère issues du dispositif ISOP présente deux intérêts :

- S'appuyer sur une donnée de validation issue d'une approche mécaniste (basée sur le modèle français de prévision de production adapté pour les prairies STICS-Prairie) et reconnue par les pouvoirs publics comme par les agriculteurs (utilisation des estimations de production fournies par le dispositif ISOP pour évaluer les niveaux d'indemnisation des éleveurs en cas de sécheresse) ;
- Renforcer la représentativité des résultats de validation en intégrant des conditions de production des prairies très variées (spatialement et temporellement).

Le deuxième choix méthodologique a consisté à conserver l'approche empirique utilisée pour le calcul de l'IPF et à évaluer la qualité d'estimation de production avec le jeu de données de validation constituée. Cela présente deux intérêts :

- Compléter la validation de l'IPF à un autre niveau d'échelle en plus des résultats obtenus dans les chapitres 3 et 4 ;
- Disposer de valeurs de référence auxquelles comparer les résultats obtenus avec les autres modèles testés.

Le troisième choix méthodologique porte sur la définition de l'approche alternative explorée. Nous avons opté pour une approche semi-empirique, basée sur le principe des modèles d'efficience de production, dans laquelle ont été analysés les effets de cinq facteurs choisis

pour leur importance dans les processus de modélisation de la fonction de production de biomasse des prairies d'après la littérature. Dans les paragraphes ci-dessous, nous définissons les cinq facteurs.

Le facteur 1 concerne l'information extraite des images satellitaires pour estimer la production fourragère journalière. L'objectif est de confronter la performance du fCover aux deux autres indices les plus utilisés dans la littérature dans le domaine soit des assurances indicielles (NDVI), soit des modèles d'efficacité de production (fAPAR) et, en complément, des résultats obtenus dans le chapitre 3.

Les facteurs 2 et 3 sont considérés comme des facteurs d'ajustement de la production fourragère journalière estimée par l'information extraite des images satellitaires. Ils sont obtenus à partir de données climatiques et relatives à la phénologie des prairies. Le facteur 2 est l'efficacité d'utilisation de la lumière. Il correspond dans notre cas à une combinaison multiplicative des effets de la température, de la saisonnalité, de la phénologie et de stress hydrique. Le facteur 3 représente la fraction du rayonnement solaire effectivement utilisable par la végétation pour la photosynthèse. Il varie selon les saisons en fonction du rayonnement solaire incident.

Le facteur 4 représente un facteur venant diminuer la production fourragère journalière pendant la phase de sénescence de la végétation des prairies. Nous avons adapté une fonction existante de modélisation de la sénescence des feuilles en fonction de la température et de la durée de vie des feuilles (Duru *et al.*, 2009).

Enfin, le facteur 5 se rapporte à la saison de pousse de l'herbe. Nous avons introduit dans le calcul de l'IPF la possibilité d'ajuster localement (à l'échelle des régions fourragères) et annuellement les dates de début et fin de saison de pousse de l'herbe d'après l'interprétation des profils temporels de l'indice de télédétection.

Ce travail permet de fournir des éléments pour estimer les avantages et les limites de l'évolution de la méthode de calcul de l'IPF par la modification ou l'ajout d'au moins un de ces facteurs.

Les principaux résultats

En considérant toutes les combinaisons possibles des cinq facteurs étudiés, 768 modèles ont été analysés. Les estimations de production obtenues ont été comparées aux données de production du dispositif ISOP collectées sur 25 régions fourragères et 5 années présentant des

Chapitre 5 : Proposition d'une nouvelle modalité de calcul de l'indice de production fourragère

situations de sécheresse (2003 et 2011), des conditions climatiques dans la normale (2009 et 2012) ou des excédents de précipitations (2007). Il en ressort trois principales conclusions :

- L'IPF calculé à partir de l'approche empirique utilisant le fCover (modèle initial) présente un bon niveau de corrélation avec les données de production du dispositif ISOP (Erreur quadratique moyenne standardisée - SRMSE = 0,57 et $R^2 = 0,68$) ;
- La relation entre les données de production estimées et observées est meilleure en utilisant une fonction de régression élevée à la puissance 0,5 (SRMSE = 0,54 et $R^2 = 0,71$) ;
- Parmi les modèles testés, 34 fournissent des estimations de production meilleures que le modèle initial avec une augmentation maximum de 18,6 % de la précision d'estimation.

Parmi les cinq facteurs testés, seuls l'indice de stress hydrique dans le facteur d'efficacité d'utilisation de la lumière (facteur 2) et les paramètres de définition de la saison de pousse de l'herbe (utilisés dans le facteur 5) contribuent à une augmentation de la qualité de prédiction des modèles quel que soit le contexte climatique.

Ce travail permet d'aboutir à la proposition d'une nouvelle méthode de calcul de l'IPF basée sur une approche semi-empirique dont l'application dans le cadre opérationnel de l'assurance indiciaire des prairies sera discutée dans le dernier chapitre de cette thèse. Il a été accepté pour publication dans une revue de rang A, et est décrit en détail dans l'article qui suit.

Insuring forage through satellites: testing alternative indices against grassland production estimates for France

Antoine Roumiguie^{1*}, Grégoire Sigel², Hervé Poilvé², Bruno Bouchard³, Anton Vrieling⁴ and Anne Jacquin¹

¹ *Université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Ecole d'Ingénieurs de Purpan, UMR 1201 DYNAFOR, France*

² *Airbus Defence and Space, 5, rue des satellites, 31400 Toulouse, France*

³ *CEREMADE, Université Paris Dauphine, France*

⁴ *University of Twente, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, P.O. Box 217, 7500 AE Enschede, The Netherlands*

* Corresponding author: E-Mail: antoine.roumiguie@purpan.fr;

Tel.: +33 5 61 15 29 64

**Article
accepté**

IJRS Special Issue

Abstract: To mitigate impacts of climate-related reduced productivity of French grasslands, a new insurance scheme bases indemnity payouts to farmers on a MODIS-derived forage production index (FPI). The objective of this study is to compare several approaches for deriving FPI from satellite data to assess whether better relationships with forage productivity can be attained. The approaches assess pasture productivity using as input five factors estimated from remote sensing and ancillary data, i.e.: 1) Fraction of absorbed photosynthetically active radiation; 2) Radiation Use Efficiency (RUE) estimates; 3) Photosynthetically Active Radiation (PAR) estimates; 4) leaf senescence modelling; and 5) growing season modelling . All the possible combinations from these five factors, including different modalities to estimate some of them, lead to 768 models. Model outputs are compared to reference grassland production estimates provided by a mechanistic model (ISOP system) for a sample of 25 forage regions across France for the years 2003, 2007, 2009, 2011, and 2012 (containing one humid, two normal and two dry years). Results revealed that: 1) the baseline model based on the fCover seasonal integral has a reasonable linear relationship to production estimates (SRMSE = 0.57 and $R^2 = 0.68$); 2) performance of the baseline model

improved with a quadratic function (SRMSE = 0.54 and $R^2 = 0.71$); 3) 34 models outperform the baseline model. We therefore suggest to replace the baseline model with the best-performing model (SRMSE = 0.42 and $R^2 = 0.83$) in the insurance product. This model integrates daily fCover with a water stress index and sums these over a variable monitoring period in space and time characterized by the phenological indicators start of season and end of season derived from the fCover annual profile.

Keywords: grassland; remote sensing; productivity; index-based insurance

5.1. Introduction

Grasslands are a key resource for livestock production. Animal breeders adjust the size of their flocks and manage them based on an expected production potential. However, drought can cause significant declines in grassland production (Boyer, 2008; Mosnier *et al.*, 2014). Such event may force producers to look for alternative feed sources on the market in order to face the constant demand by livestock and to prevent economic losses or animal illnesses/deaths (Lemaire *et al.*, 2006; Veysset *et al.*, 2007; Mosnier *et al.*, 2008). Among existing solutions to limit the impact of a loss in biomass production, insurance is interesting because it provides the insured with an opportunity to buy additional animal feed and withstand the temporary crisis (Noury *et al.*, 2013). However, traditional insurance policies based on farm-based assessment of losses are impractical due to the difficulty of estimating annual grassland production for insured individuals given that mowing and grazing are common practices during the year (de Leeuw *et al.*, 2014). It is a challenge to propose a marketable forage insurance product that effectively accounts for the annual variability in production and that can reach scale. Unlike traditional insurance schemes that assess losses on an individual basis, index-based insurance (IBI) offers payouts based on a biophysical index which triggers a payment to all insured farmers within a geographically-defined space (Ceccato *et al.*, 2008; Hazell et Hess, 2010). Remotely-sensed time series provided by medium resolution sensors have the potential to monitor vegetation over large areas at a spatial resolution (approximately 250 m) matching the scale of grassland fields and with good acquisition frequencies (Lu, 2006; Cai *et al.*, 2014; Jin *et al.*, 2014). A main challenge for IBI is to minimize the basis risk, i.e. the situation where farmers do not get paid during production shortfalls, or get paid when not facing losses. This requires that the index correlates well with real losses experienced by the insured (Hellmuth *et al.*, 2009; Sandmark *et al.*, 2013). Grassland productivity estimates are currently derived from:

- Mechanistic approaches, i.e. models that describe the physiological mechanisms of grassland and their interaction with abiotic factors;
- Semi-empirical approaches that simulate physiological processes with simpler equations than mechanistic models and with a limited number of data and mechanisms (Potter *et al.*, 1993; Field *et al.*, 1995; Veroustraete *et al.*, 2002; Seaquist *et al.*, 2003; Maselli *et al.*, 2013; Rembold *et al.*, 2013; Gilabert *et al.*, 2015);
- Empirical approaches (Delécolle *et al.*, 1992) that use simple models based only on field measurements (Jouven *et al.*, 2006) or remote sensing indices (Meroni *et al.*, 2013b).

Mechanistic approaches are normally applied to small areas with homogeneous conditions, but can be aggregated to generate productivity estimates at larger scales (Di Bella *et al.*, 2004; Courault *et al.*, 2010). Nonetheless, due to their high data demand, mechanistic approaches are cumbersome to implement at a national scale with complex spatial heterogeneity. Empirical approaches using models based on field measurement of grassland productivity are also difficult to implement because they are expensive, time-consuming and labor intensive (Maselli *et al.*, 2009). In light of these weaknesses, remote sensing technology can fill a gap by contributing to effective biomass estimation over larger regions (Gaitán *et al.*, 2013; Gao *et al.*, 2013). Many remote sensing approaches are based on a simple empirical relationship between a remote sensing index and biomass production, require significantly less data as compared to mechanistic models, and are effective for monitoring large production areas (Running *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2007; Jin *et al.*, 2014; Meroni *et al.*, 2014a; Meroni *et al.*, 2014b; Dusseux *et al.*, 2015). However, given their empirical nature, these remote sensing approaches need to be calibrated for local conditions (Meroni *et al.*, 2013b).

To address the limitations of mechanistic or empirical approaches, Production Efficiency Models (PEM) have emerged (for a detailed review, see McCallum, Wagner *et al.* [2009]). Also referred to as Light Use Efficiency (LUE) models, they rely on the relationship between the meteorological constraint of available sunlight reaching the vegetation and the ecological constraint of the amount of leaf area available to absorb that solar energy (Running *et al.*, 1999). PEMs require as input data on environmental variables, including solar radiation, air temperature, water availability, and vegetation conditions. The basic consideration underlying these models is that the estimation of grassland biomass production over large areas (e.g.,

nation scale) can reach better precision by suitably integrating multiple sources of remote sensing and ancillary data (Seaquist *et al.*, 2003; Launay et Guerif, 2005; Maselli *et al.*, 2009).

At the present time, the predominant method to develop index-based insurance for grasslands is to use an empirical approach with a vegetation index derived from satellite data to estimate biomass production. We present some examples of operational products in Table 5-1.

Among the eight products, six use vegetation indices and, for five, it is the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Rouse *et al.*, 1974). The reasons for using NDVI likely include data accessibility, the spatial and temporal resolutions offered by coarse and moderate instruments, and the stronger relationship between NDVI and biomass production (Huete *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2005) as compared to what is typically observed between rainfall indices and biomass (Barnett et Mahul, 2007; Hazell et Hess, 2010; Rao, 2010; Sandmark *et al.*, 2013).

Chapitre 5 : Proposition d'une nouvelle modalité de calcul de l'indice de production
fourragère

Table 5-1. Description of the main characteristics of the existing index-based insurances for grassland in the World.

Country	Index	Input data source	Geographical scale of biomass estimation	Approach for biomass estimation
Spain	NDVI	MODIS 250 m 10 days	County (<i>Comarcas</i>)	Empirical model Comparison of historical and actual dekad NDVI values
Mexico	NDVI	NOAA-AVHRR 1.1 km Daily	Farm reference	Empirical model Annual sum of NDVI of previous year integrating livestock management data of year n
USA	NDVI	USG-EROS 8 km Daily	County	Empirical model Comparison of historical and actual mean NDVI values over a defined period
USA	Rainfall	NOAA CPC Weather station Daily	Grid of 27 km	Empirical model Comparison of historical and actual daily rainfall over 2 months period
Canada Alberta	NDVI	NOAA-AVHRR 1.1 km 8 days	County	Empirical model Comparison of historical and actual NDVI weekly values
Canada Ontario	Rainfall	Weather station Daily	Weather station distribution	Empirical model Comparison of historical and actual sum of rainfall over a defined period
France	fCover	MODIS/MERIS 300 m 10 days	County	Empirical model Comparison of historical and actual sum of daily fCover between 1 st February and 31 October.
France	Biomass production	Climatic data Daily Soil and field data (constant)	Forage Region	Mechanistic model Comparison of historical and actual annual production

In France, since the beginning of the 2000's, grassland damage from drought events is estimated regionally with a mechanistic approach (Ruget *et al.*, 2006). In 2015, Crédit Agricole Assurances Pacifica (Pacifica), associated with Airbus Defence & Space (Airbus D&S), proposed an index-based insurance solution to assess local grassland production losses (Geeraert, 2012; Crédit Agricole, 2013; Bergeot, 2015). They developed an indicator called the Forage Production Index (FPI) that empirically estimates and monitors in near real-time grassland biomass production in France. Rather than NDVI, the indicator uses the fraction of green vegetation cover (fCover), which behaves similar as the common remote sensing parameter fraction of absorbed photosynthetically active radiation (fAPAR) (Baret *et al.*, 2005). Derived from radiative transfer models, fCover is a biophysical parameter that can overcome limitations of empirical vegetation indices such as the NDVI: dependency on data processing level (raw, calibrated, reflectance) and sensors sources; saturation effect; sensitivity to cloud veils, soil color, presence of non-photosynthetic vegetation (Asner *et al.*, 1998b; Running *et al.*, 2004; Camacho et Torralba, 2010; Camacho et Cernicharo, 2011). In a previous study (Roumiguié *et al.*, 2015b), a direct comparison between in-situ grassland biomass measurements and FPI derived from fCover measured with HR time series was conducted. Recently, a complementary validation study was conducted with a bottom-up approach (combining field, high and medium spatial resolution scales) for validating the use of an annual FPI as a surrogate for interannual biomass variation at a 1-km resolution (Roumiguié *et al.*, 2015a). Results showed that FPI could be used as a proxy to monitor annual biomass production of grasslands and its variations with a satisfactory level of error (RMSE = 14.5 %). However, this level also indicates that there may be scope for improvement.

The objective of this paper is to evaluate if semi-empirical approaches based on PEM can provide more accurate grassland biomass estimates than the fCover-based FPI currently used in the French insurance product. This analysis should result in promising avenues for further improvement of the forage production index.

5.2. Models to assess forage production

5.2.1. Baseline model

The empirical baseline model was described by Roumiguié *et al.* (2015a) and can be written as:

$$FPI_n = \sum_{i=01/02}^{i=31/10} (fCover\ Grassland_i - NPV) \quad 5-1$$

where *SOS* and *EOS* are start- and end-of-season. For the baseline model these are fixed at respectively February 1st and October 31st. For any year *n*, the model sums the daily grassland *fCover* between February 1st and October 31st (*fCover Grassland_i*) while simultaneously subtracting the proportion of Non-Productive Vegetation (*NPV*). This parameter represents the biomass that could not be harvested. It is an empirical value, fixed in time and variable across space, based on statistical grassland biomass production data provided by the French Ministry of Agriculture at the administrative department scale.

5.2.2. New models

5.2.2.1. Theoretical basis

The new models are based on the PEM (Monteith et Moss, 1977), which estimates daily gross primary productivity (*P_i*) as follows:

$$P_i = RUE_i \times PAR_i \times fAPAR_i \quad 5-2$$

where *RUE_i* is the daily radiation use efficiency, *fAPAR_i* is the daily fraction of photosynthetic active radiation and *PAR_i* is the daily photosynthetic active radiation.

Annual biomass production (*B_n*), integrating the leaf senescence function *D_i* and the growing season characteristics, is computed as in Equation 5-3.

$$B_n = \sum_{m=1}^M \sum_{i=SOS_m}^{EOS_m} P_{m,i} - D_{m,i} \quad 5-3$$

where *m* is the number of phenological cycles within the year, *D_i* is the function that simulates leaf senescence during vegetative growth based on leaf life span (*l*), *SOS* and *EOS* are the two phenological indicators used to determine Start of Season and End of Season.

5.2.2.2. Factor description

fAPAR_i describes the fraction of the total received photosynthetically-active radiation that is absorbed by the vegetation. It can be directly estimated from optical remote sensing data through radiative transfer models or through empirical relationships with vegetation indices.

In our study, we considered two biophysical parameters: fCover as it is the one currently used to calculate FPI and fAPAR as it is the traditional parameter prescribed to implement PEM (Monteith et Moss, 1977; McCallum *et al.*, 2009); and one vegetation index: the NDVI.

The grassland radiation use efficiency (RUE_i) is defined as the ratio between the above-ground dry matter and the absorbed radiation following defoliation (Duru *et al.*, 2009). In our study, RUE_i is modelled as:

$$RUE_i = T_i \times S_i \times P_i \times W_i \quad 5-4$$

where T_i , S_i , P_i and W_i are efficiency-reducing factor for temperature, season, phenology, and water stress respectively. The effect of nutrient availability was not estimated, as recommended by Duru *et al.* (2009) and Cros *et al.* (2003), due to lack of data. Season and phenology effect corresponds to the modification of assimilates allocation between aerial biomass and root during vegetative growth. The first three factors can be modelled as (Cai *et al.*, 2014):

$$T_i = 0.037 + 0.09 \times t_i - 0.0022 \times t_i^2 \quad 5-5$$

where t_i is the daily mean temperature in °C;

$$S_i = \frac{-0.6j}{180} + 2.5 + 32 * \left(\frac{0.6}{180}\right) \quad 5-6$$

where j is the number of days from 1st January to day i ;

$$P_i = \begin{cases} 1, & \text{if } d_i < l \\ (-2.9 \times 10^{-6})d_i^2 + (6.27 \times 10^{-3})d_i - 1.88, & \text{if } l \leq d_i < 2 \times l \\ 0.64, & \text{if } d_i \geq 2 \times l \end{cases} \quad 5-7$$

where l is equal to 700°C according to Duru *et al.* (2009) giving a range between 500°C and 800°C depending on the species and d_i is the daily degree-day in °C.

W_i can be estimated from the ratio between actual and potential evapotranspiration (Maselli *et al.*, 2009; Maselli *et al.*, 2013). Maselli *et al.* (2009) proposed this specific index to improve biomass estimation in arid and semi-arid regions. Vegetation index and biophysical parameters such as NDVI, fCover or fAPAR are sensitive to long duration water limitation because optical remote sensing data can detect changes in canopy structure and defoliation.

However, these data do not catch brief water shortages that could induce a decrease in the *RUE*. W_i is interesting to observe during drought situations as it requires only a limited number of climatic data (temperature, rainfall and radiation).

$$W_i = \begin{cases} 0.5 + 0.5 * \frac{a_i}{e_i}, & \text{if } a_i < e_i \\ 1, & \text{if } a_i > e_i \end{cases} \quad 5-8$$

where a_i is the daily Actual Evapotranspiration and e_i is the daily Potential Evapotranspiration.

PAR_i is estimated with Equation 5-9 as a proportion of the daily solar radiation (r_i) according to Gilabert *et al.* (2015) with a value of 48 % based on Gosse *et al.* (1986).

$$PAR_i = 0.48 \times r_i \quad 5-9$$

The proportion of senescent vegetation in the production estimate is determined by modelling leaf senescence (D_i) as presented in Equation 5-3. Until the time the first cohort of leaves begin to senesce ($d_i < l$), we assumed that no senescent material is present. For the following cohort of leaves ($d_i > l$), the senescent material of day i depends on the daily biomass production at the day of emergence of these new leaves (P_{d_i-l}), modified with a senescence rate calculated according to the daily mean temperature (t_i), the leaf-life span (l) and a constant coefficient of remobilization ($\gamma = 0.15$) corresponding to the fraction of senescent biomass reallocated in green matter (Duru *et al.*, 2009; Duru *et al.*, 2010). The importance to integrate the contribution of leaf senescence in the production model was addressed by Duru *et al.* (2009).

$$D_i = \begin{cases} 0, & \text{if } d_i < l \\ (1 - \gamma) \times P_{(d_i-l)} \times \frac{t_i}{l}, & \text{if } d_i > l \end{cases} \quad 5-10$$

where l is equal to 700°C according Duru *et al.* (2009) giving a range between 500°C and 800°C depending on the species, t_i is the daily mean temperature in °C and d_i is the daily Degree-Day in °C (See section 5.3.3 for equations definition).

Richardson *et al.* (2013) demonstrated the ability of phenological indicators to be used as proxy to monitor climatic and environmental effects on grassland phenology. They concluded the necessity to consider those indicators characterizing vegetation growth while estimating

vegetation productivity. Figure 5-1 illustrates the phenology variability of grasslands in five forage regions, represented by a mean fCover profile observed between 2003 and 2012, which shows that several locations have a double growing cycle due to their specific climatic conditions.

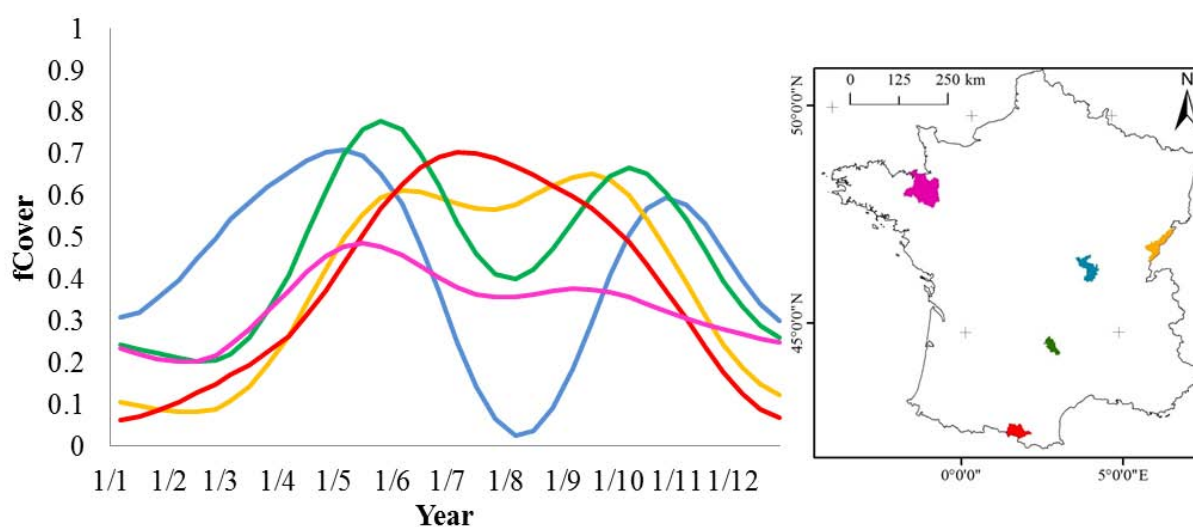


Figure 5-1. Grassland phenology variability in 5 forage regions. Curves correspond to the mean fCover observed between 2003 and 2012. Colors of the curves allow identifying the corresponding forage region on the map.

In this work, growing season characteristics are addressed by introducing two modalities in Equation 5-3 to calculate annual biomass production (B_n), i.e. (a) the monitoring period defined by two phenological indicators, the Start Of Season (*SOS*) and the End of Season (*EOS*), and (b) the number of phenological cycles (m) of grassland within a year.

For the developed models, the modalities *SOS/EOS* and m can present variable values. Regarding *SOS/EOS*, the values can be fixed as in the baseline model or made spatially and temporally variable according to the grassland growth cycle. In our study, they are determined annually at the FR scale from the analysis of the fCover time series. For m , it can be adjusted to simulate a uni- ($m=1$) or bi-modal ($m=2$) seasonality for the grassland within the year. The interest of such a modification is to consider the annual biomass production (B_n) as the result of one or two growing cycles. Choosing a bi-modal seasonality has an influence on the growing degrees day (d_i) and on the *SOS/EOS* values.

5.3. Materials and methods

5.3.1. Application site

Hentgen (1982) divided France into 229 homogeneous agro-climatic regions, or Forage Regions (FR), having similar grassland production potential. The study sites here are composed of various FRs with one FR representing one spatial unit for the model validation. A sample of 25 FRs is selected using the same criteria as in Di Bella *et al.* (2004) (altitude, grassland percentage, temperature and rainfall) in order to represent areas with different climatic situations. Figure 5-2 illustrates the site condition variability of these FRs. The grassland percentage represents the surface classified as grassland cover, according to the land cover classification rules of the FPI processing chain (Roumiguié *et al.*, 2015a), divided by the total area of the FR. Temperature and rainfall variables correspond respectively to the temperature and the annual cumulated rainfall averaged over 10 years (2003-2012).

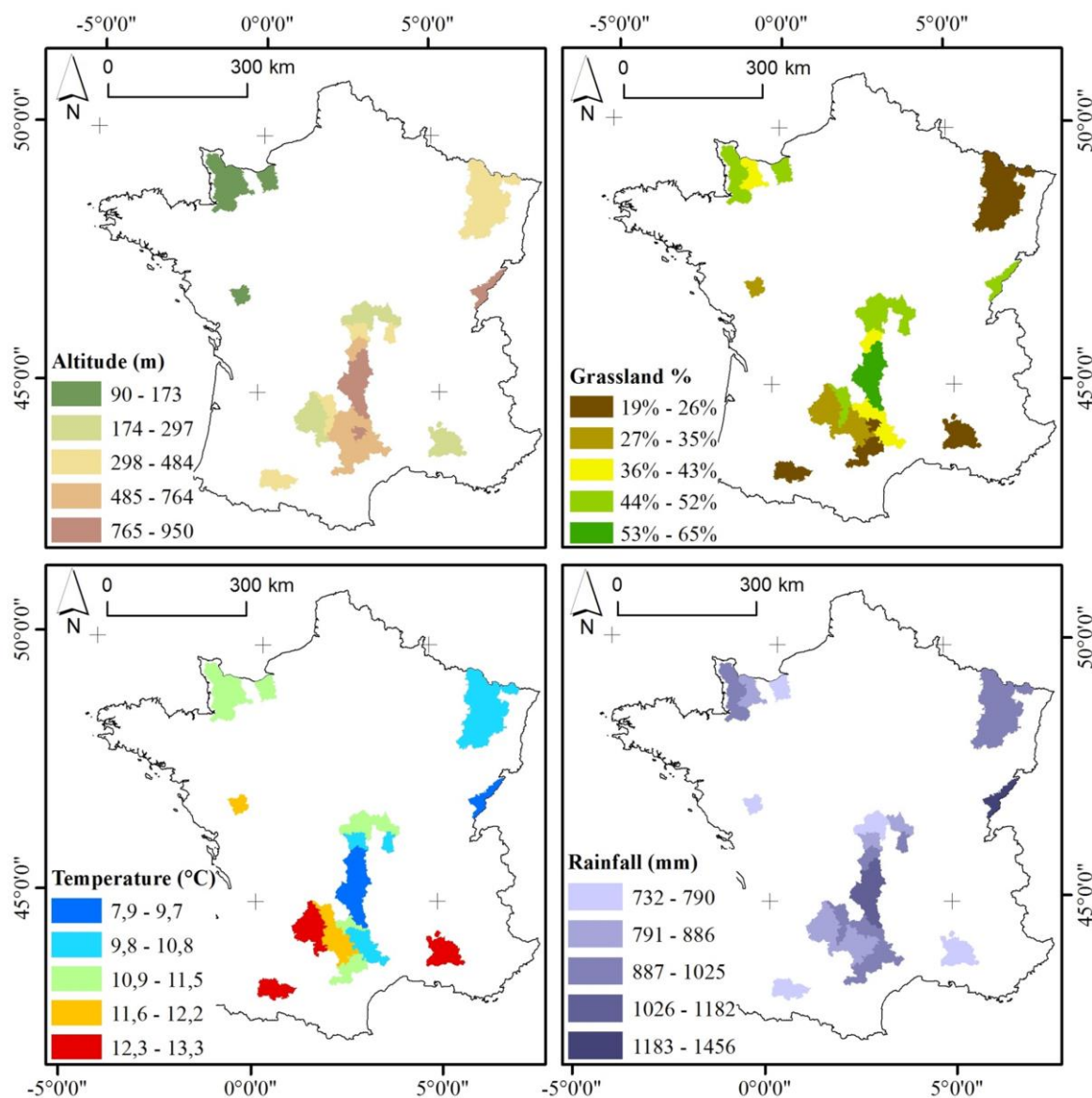


Figure 5-2. Characterization of the 25 FRs selected for the study according to altitude, grassland surface percentage, temperature, and rainfall, both averaged over 2003 to 2012.

For model validation, five years representing specific climatic situations are selected. Figure 5-3 shows the annual, spring, and summer rainfall and temperature variations for the five selected years compared to a historical reference (2003-2012) observed in the 25 FRs. Drought conditions in France during 2003 and 2011 are prominent. In 2003, drought affected vegetation during spring and summer with elevated summer temperatures. In 2011, water scarcity and hot temperatures were only observed during the spring. Figure 5-3 also points out abundant rainfall and hot temperatures in spring suitable for forage production in 2007. Last, 2009 and 2012 represent normal climatic years for the study sites.

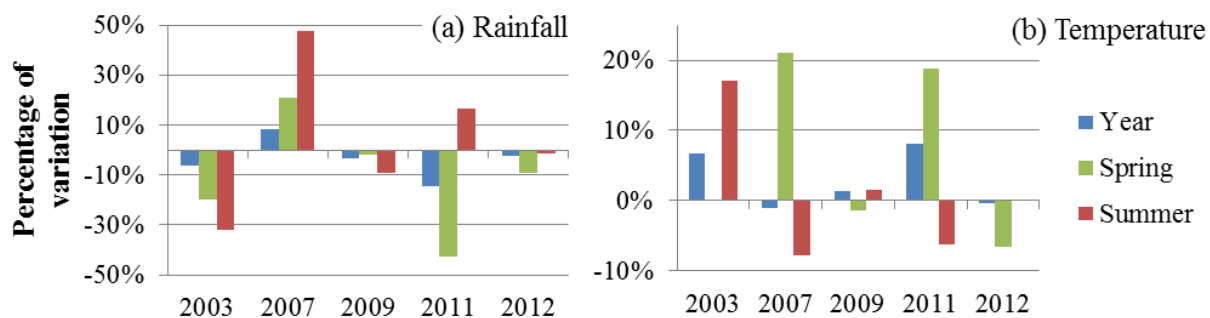


Figure 5-3. Annual, spring and summer (a) rainfall and (b) temperature variations for the five selected years compared to a historical reference (2003/2012) observed in the 25 FRs.

5.3.2. Remote sensing data

In this study, biophysical products (fAPAR and fCover) are obtained from a biophysical inversion of daily reflectances image provided by MODIS and MERIS sensors as described in Roumiguié *et al.* (2015a). Products of the processing chain are 10-day synthesis of biophysical parameters delivered at 300 m spatial resolution. NDVI data come from the MODIS Vegetation Index product (MOD13Q1), distributed by NASA USGS and corresponding to 16-day synthesis at 250 m spatial resolution. NDVI is computed from atmospherically-corrected bi-directional surface reflectances that have been masked for water, clouds, heavy aerosols, and cloud shadows (Huete *et al.*, 1999).

Given the medium spatial resolution of the images, pixel reflectances may be composed of spectral responses from different land cover types. A disaggregation method based on a statistical approach applied to reflectances is used to determine fAPAR, fCover and NDVI for grassland (Faivre et Fischer, 1997). This method estimates vegetation indices or biophysical parameters values for each land cover class present in the mixed observation (determined from a land cover map) and the *a priori* knowledge of each land cover class's contribution to each pixel (local aspect) (Roumiguié *et al.*, 2015a). Consequently, fAPAR, fCover and NDVI, relating to grassland cover, are calculated at an Elementary Statistical Unit (ESU) scale of 6 km×6 km.

Finally, the remote sensing indices are averaged at the FR scale according to grassland surface in each ESU. Figure 5-4 illustrates the three time series of "grassland" remote sensing indices available for a FR in southern France in 2003.

fourragère

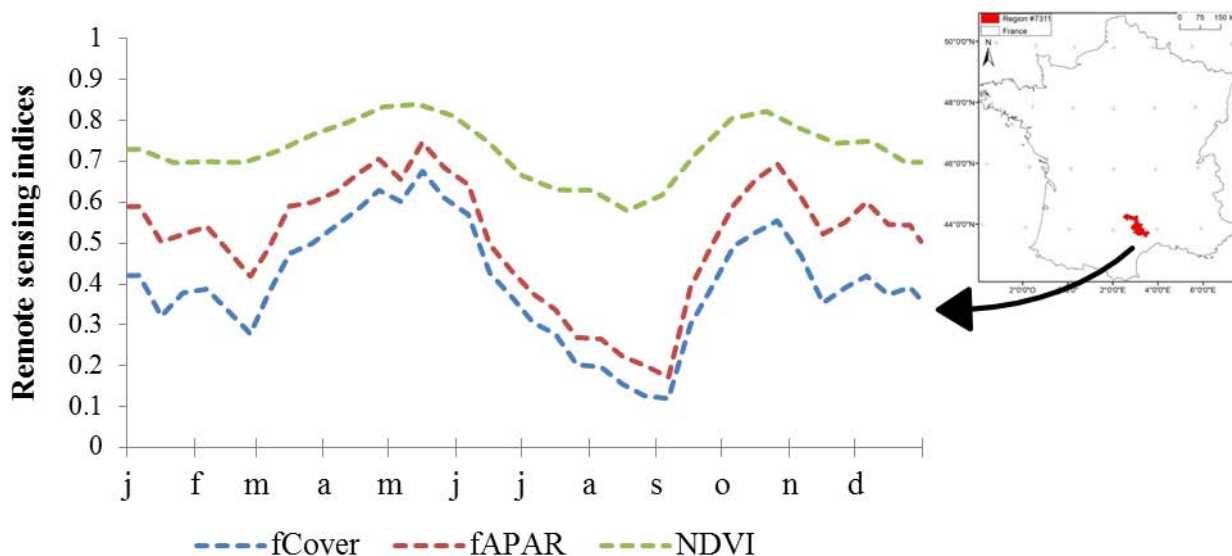


Figure 5-4. Example of the three time series of "grassland" remote sensing indices available for a forage region situated in South of France in 2003.

5.3.3. Climatic data

Climatic data are provided by Météo-France. Visible radiation, rainfall, and temperature variables from the SAFRAN/F database (Quintana-Seguí *et al.*, 2008; Vidal *et al.*, 2010) were selected. These reanalysis data are derived from a numerical weather model that incorporates station observations. These data are interpolated at a 8 km x 8 km grid using a Digital Elevation Model and are available at a daily step. Time series of these variables are produced for each FR by averaging grid values within the area of interest. Additional climatic variables are calculated in order to introduce them in the computation of the different physiological effects modelled (See section 5.2.2.2). The daily mean temperature (°C) is given by Equation 5-11.

$$t_i = \begin{cases} 18, & \text{if } \frac{T_{\max_i} + T_{\min_i}}{2} > 18 \\ 0, & \text{if } \frac{T_{\max_i} + T_{\min_i}}{2} < 0 \\ \frac{T_{\max_i} + T_{\min_i}}{2} & \text{otherwise} \end{cases} \quad 5-11$$

where T_{\max_i} is the daily maximum air temperature and T_{\min_i} is the daily minimum temperature.

Growing degree days correspond to the accumulated mean temperature (t_i) throughout the growing season (Equation 5-12). Grassland phenology is driven by thermal time.

$$d_i = \sum_{i=SO5}^I t_i \quad 5-12$$

For the computation of the water stress index (W_i), the actual evapotranspiration (a_i) and the potential evapotranspiration (e_i) are respectively evaluated with daily rainfall (p_i) (Equation 5-13) and the Jensen-Haise formula (Jensen et Haise, 1963) (Equation 5-14). Both are cumulated over the previous 30 days as recommended by Maselli *et al.* (2013).

$$a_i = \sum_{i-30}^i p_i \quad 5-13$$

$$e_i = \sum_{i-30}^i \left(\frac{r_i}{L} \times 0.025 \times t_i + 0.08 \right) \quad 5-14$$

where L is the latent heat of vaporization for water with a density of 1000 kg m^{-3} and at 20°C . ($=2.45$), r_i is the daily global radiation and t_i is the daily mean temperature.

5.3.4. Reference grassland production data

Validation data are provided by the ISOP system (Donet *et al.*, 1999; Donet *et al.*, 2000). In this system, grassland production estimated at a daily step for each FR with a mechanistic model adapted to grassland (STICS-Prairies) (Brisson *et al.*, 1998) using climatic, soil, and grazing system data as inputs. Published data, delivered at FR scale, represent the variation of annual production compared to a historical reference (1982-2009). For the validation procedure, production data of the chosen FR/years are selected (Ruguet F., personal communication). Figure illustrates the spatial and temporal variations of production over the application sites (Ruguet *et al.*, 2001). It shows that two FRs have an average production higher than 8.1 tons of dry matter per hectare (t. DM.ha^{-1}) while three others are 4 times less ($2.2 \text{ t. DM.ha}^{-1}$). Substantial variation around the average production exists due to interannual weather variability. For example, production during a dry year (2003) was substantially lower than during a humid year (2007).

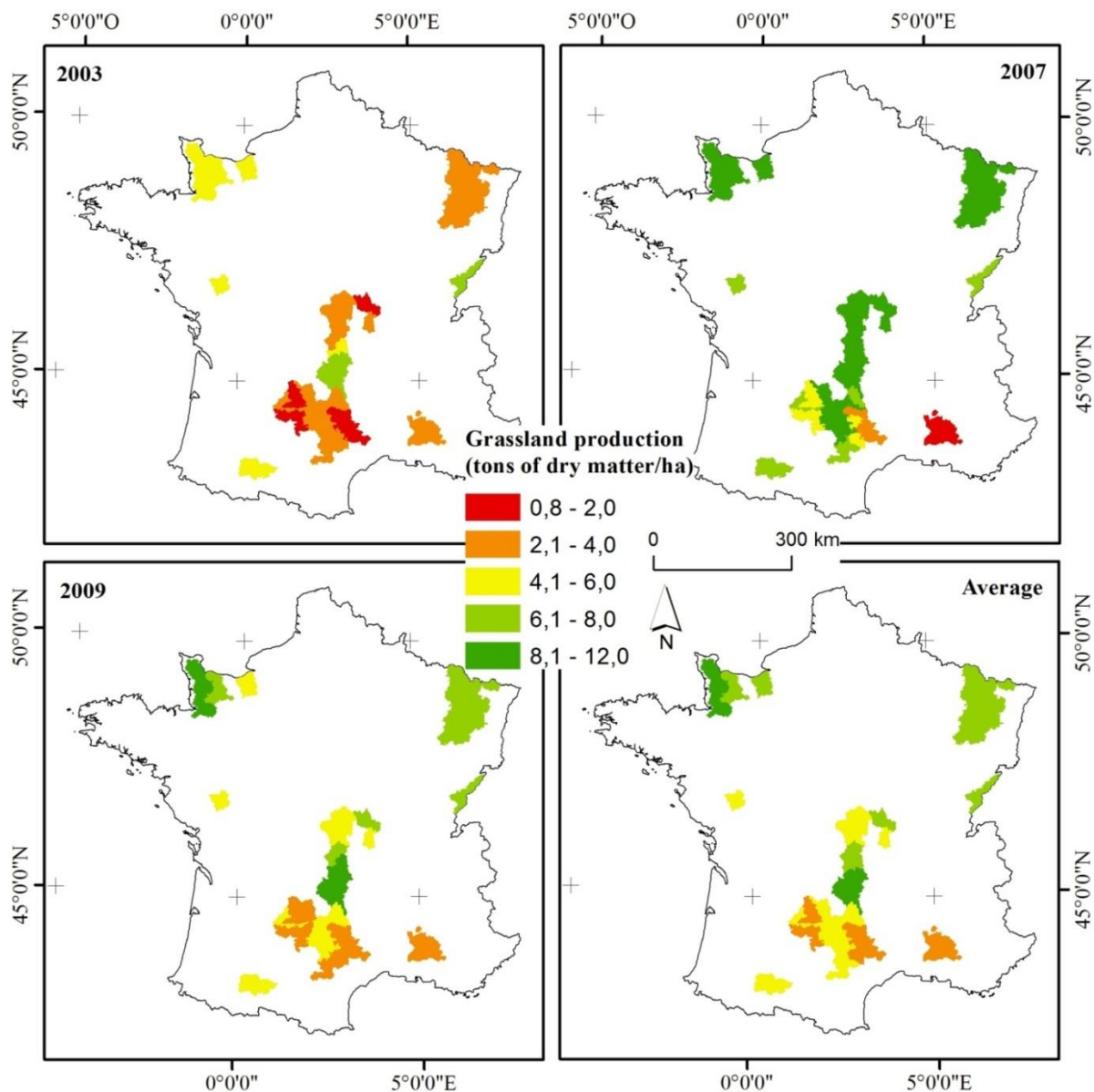


Figure 5-5. Grassland production, given by the ISOP model, of the 25 FRs selected for 2003, 2007, 2009 and in average of the 5 years studied.

5.3.5. Methods

5.3.5.1. Model accuracy assessment

A total of 768 models are tested against grassland production data. The models are the result of different combinations of factors (5) and various options to estimate each of them. These include 3 modalities for Fraction of absorbed photosynthetically active radiation (factor 1); for RUE (factor 2), two modalities for temperature (S_i), season (S_i), phenology (P_i), and water stress (W_i); two modalities for PAR (factor 3); two modalities for leaf senescence modelling (D_i) (factor 4); for the growing season characteristics (factor 5), two modalities for the

monitoring period (*SOS/EOS*) and the number of phenological cycles (*M*). The annual biomass production (B_n) obtained with these models are evaluated by comparing each of them to grassland production estimates provided by the ISOP system (Y_n), considered to be the reference. We establish linear and power function regressions according to Equation 5-15.

Values for the power function are obtained to satisfy the assumption of a normal distribution of the residuals. To this end, a transformation of the dependent variable ($B_{n,z}$) is realized (Box et Cox, 1964).

$$(Y_{n,z})^x = a \times B_{n,z} + b + \varepsilon \quad 5-15$$

where, $Y_{n,z}$ is the validation production data, $B_{n,z}$ is the modelled production data for the year n and the forage region z , ε is the remaining error, a and b are parameters of the regression. For a linear regression function, x is equal to 1. For a power regression function, x is different to 1.

A k -fold cross validation was performed to determine the prediction error (Rodriguez *et al.*, 2010). For each model, the validation production dataset (containing 125 observations) is divided in 3 folds with 100 replications. Regression is trained on 2 folds (84 observations) and a measure of the performance is assessed with the remaining fold (42 observations). As the key performance criterion we used the Standardized Root Mean Square Error (SRMSE) given by the Equation 5-16, as it is a good indicator of a model predictive power (Loehlin, 2004).

$$SRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - B_i)^2}{n}}}{sd(Y_i)} \quad 5-16$$

where Y_i are the observed values, B_i are the modelled values, n is the number of observations and sd is the standard deviation.

Statistical tests on residuals are carried out to evaluate regression model validity. Residual normality and homoscedasticity are respectively assessed with Jarque-Bera (Jarque et Bera, 1980)/Shapiro-Wilk (Royston, 1992) and Breusch-Pagan (Breusch et Pagan, 1979; Cook et Weisberg, 1983) tests. All regressions with at least one of the statistical tests presenting a p -value less than 0.1 are excluded in order to select those that are the most robust and valid.

5.3.5.2. Model inter-comparison procedure

Figure 5-6 summarizes the comparison procedure between the baseline and new models. The first step consists of establishing regression models with linear and power functions using all the validation production data, resulting in an SRMSE and p-value for all models. The SRMSE provided by the baseline model is defined as a threshold ($SRMSE_{Baseline}$). Among the new models, only those that had valid statistical tests on residuals and an SRMSE value smaller than $SRMSE_{Baseline}$ are retained. For these models, analysis of the linear and power regression proportion enables identification of the best regression function type. Next, for each model, the value (x) that minimizes the SRMSE is selected by interpretation of the value (x) variation according to SRMSE.

In a second step, the validation production dataset is divided in two according to the climatic years. The objective is to examine the ability of the selected to accurately perform under different meteorological conditions. One set of data is composed of years 2003 and 2011, representing drought conditions resulting in low levels of biomass production. The other set contains 2007, 2009 and 2012 years and corresponds to humid or normal conditions with normal or above average biomass production. For the two sets, the same accuracy assessment is applied as for the full dataset.

Overall, three groups of models that outperformed the baseline model are obtained depending on whether the whole validation dataset is considered (group 1) or different validation datasets for dry years (group 2) and for humid or normal years (group 3). For each group, the factors/variable modalities that have been added in the developed models are observed to see how much they contribute in the improvement of the biomass production estimates.

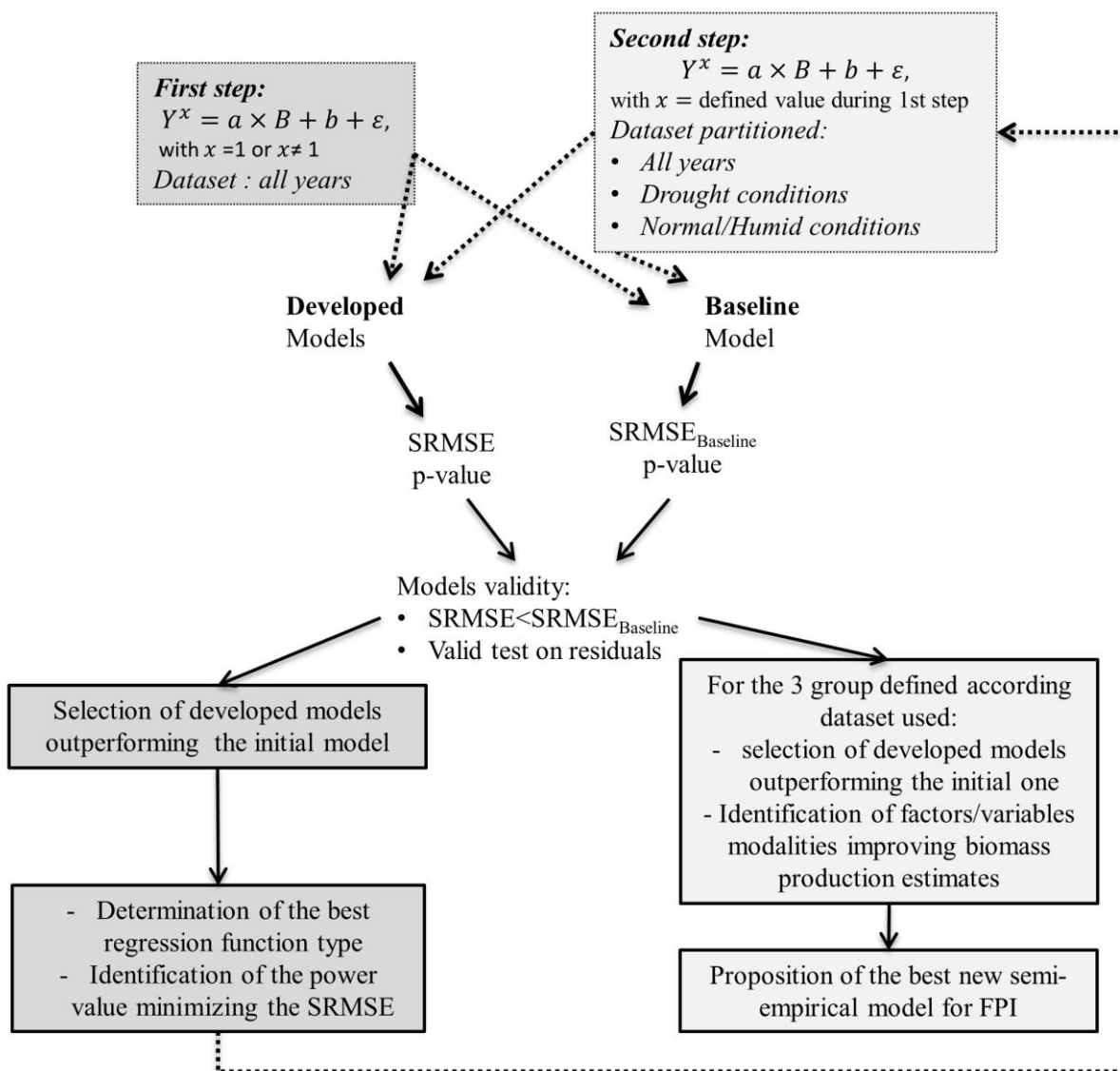


Figure 5-6. Overall procedural flowchart for inter-comparison of models.

5.4. Results

5.4.1. Models overall performance estimation

Given all possible combinations of the five factors added in the developed models, 768 models are tested. In relation to the complete validation dataset, model inter-comparison indicates that 64 developed models outperform the baseline model based on the SRMSE. Of these models, for 91% (including the baseline model) the SRMSE is smaller when applying a power function. Consequently the power function, rather than a linear function is retained for consecutive analysis.

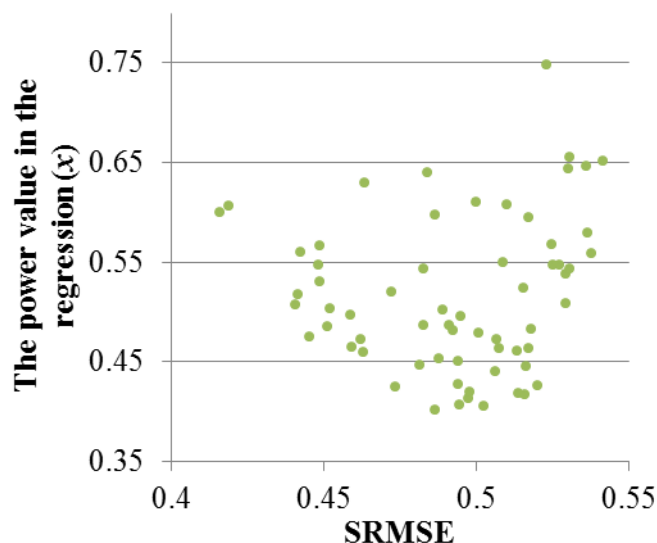


Figure 5-7. Scatterplots of the power value in the regression (x) and the SRMSE for the 64 models outperforming the baseline model.

Figure 5-7 presents the scatterplot of the power value (x) and the SRMSE of the 64 models outperforming the baseline model. Smallest SRMSE values tend to be obtained with values for x of approximately 0.5 to 0.6. This suggests a quadratic link between observed and modelled biomass production data, illustrated for the baseline model on Figure 5-8. With a linear function, $\text{SRMSE}_{\text{Baseline}}$ is equal to 0.57 and R^2 to 0.68 (Figure 5-8-(a)) whereas with a power function, $\text{SRMSE}_{\text{Baseline}}$ is equal to 0.54 and R^2 to 0.71 (Figure 5-8-(b)). We decide to fix the power value (x) for all models to 0.50 in order to have a more consistent comparison between models and reduce overfitting problems. When reconsidering all 768 models and fixing x to 0.5, a total of 74 models outperform the baseline model. The best model is based on a biomass production function using the fCover accumulated over a variable monitoring period and integrating the water stress and season effects. For this model, the SRMSE is 0.42 and the R^2 0.83 (Figure 5-8-(c)). Precision of biomass prediction is 23% higher than with the baseline model.

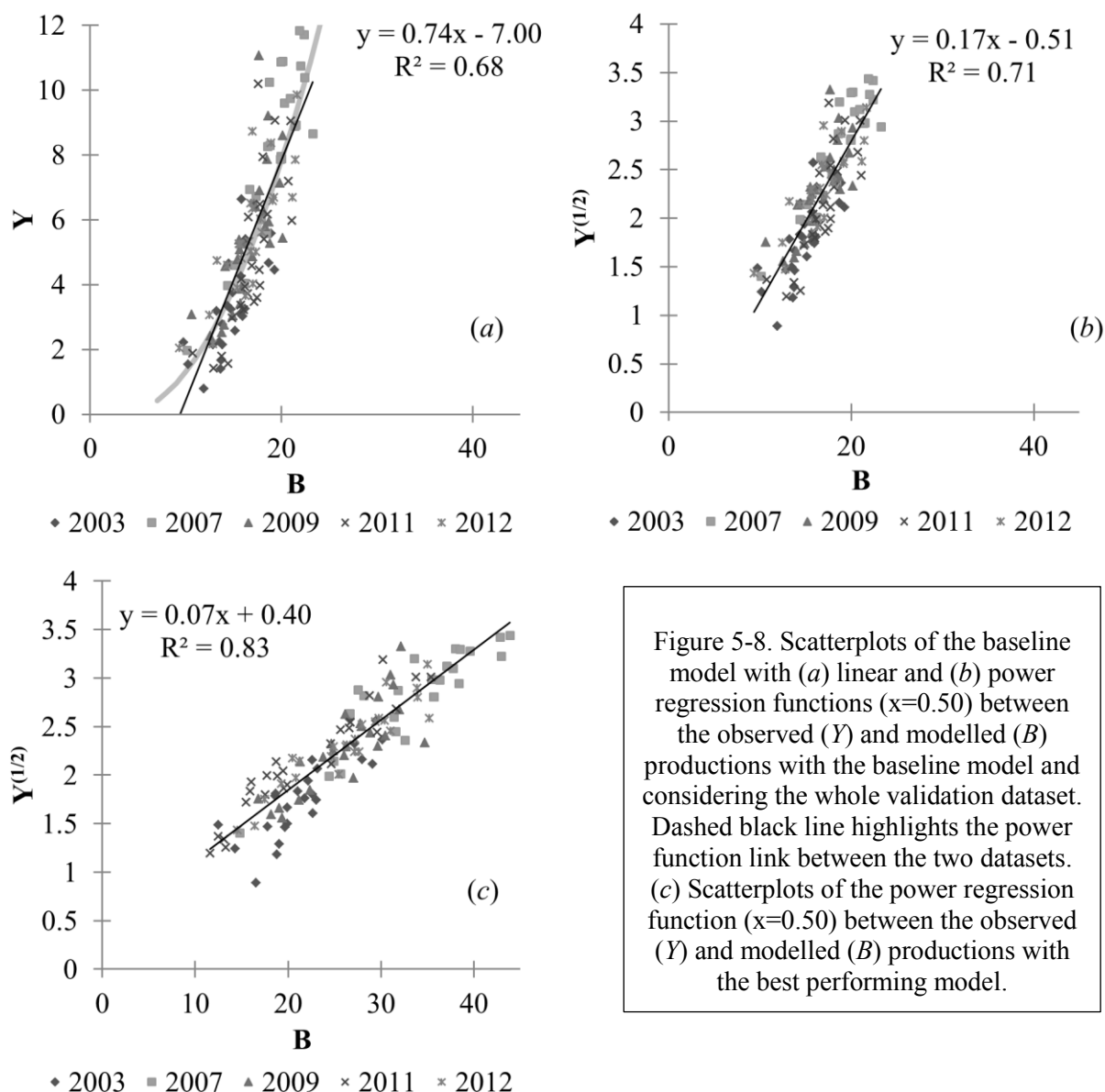


Figure 5-8. Scatterplots of the baseline model with (a) linear and (b) power regression functions ($x=0.50$) between the observed (Y) and modelled (B) productions with the baseline model and considering the whole validation dataset. Dashed black line highlights the power function link between the two datasets. (c) Scatterplots of the power regression function ($x=0.50$) between the observed (Y) and modelled (B) productions with the best performing model.

When dividing the validation dataset into dry and normal/humid years, the baseline model performs better in normal or humid conditions ($SRMSE_{Baseline} = 0.63$ for dry; $SRMSE_{Baseline} = 0.52$ for normal/humid). For this division, fewer models improve the production estimates in normal or humid conditions (38 of 74 with an average improvement of 7% and a maximum of 20%) than for the dry condition (67 of 74 with an average improvement of 9% and a maximum of 22%) as compared to the baseline model. Figure 5-9 presents the scatterplots between the observed (Y) and modelled (B) productions for the (a) baseline model and (b) best models estimated by considering only either dry years (2003 and 2011) or normal/humid years (2007, 2009 and 2012). The best model for dry years is more complex (incorporating fCover cumulated over a variable monitoring period, water stress, season, temperature and

radiation) than for normal/humid years (fCover accumulated over a variable monitoring period and water stress).

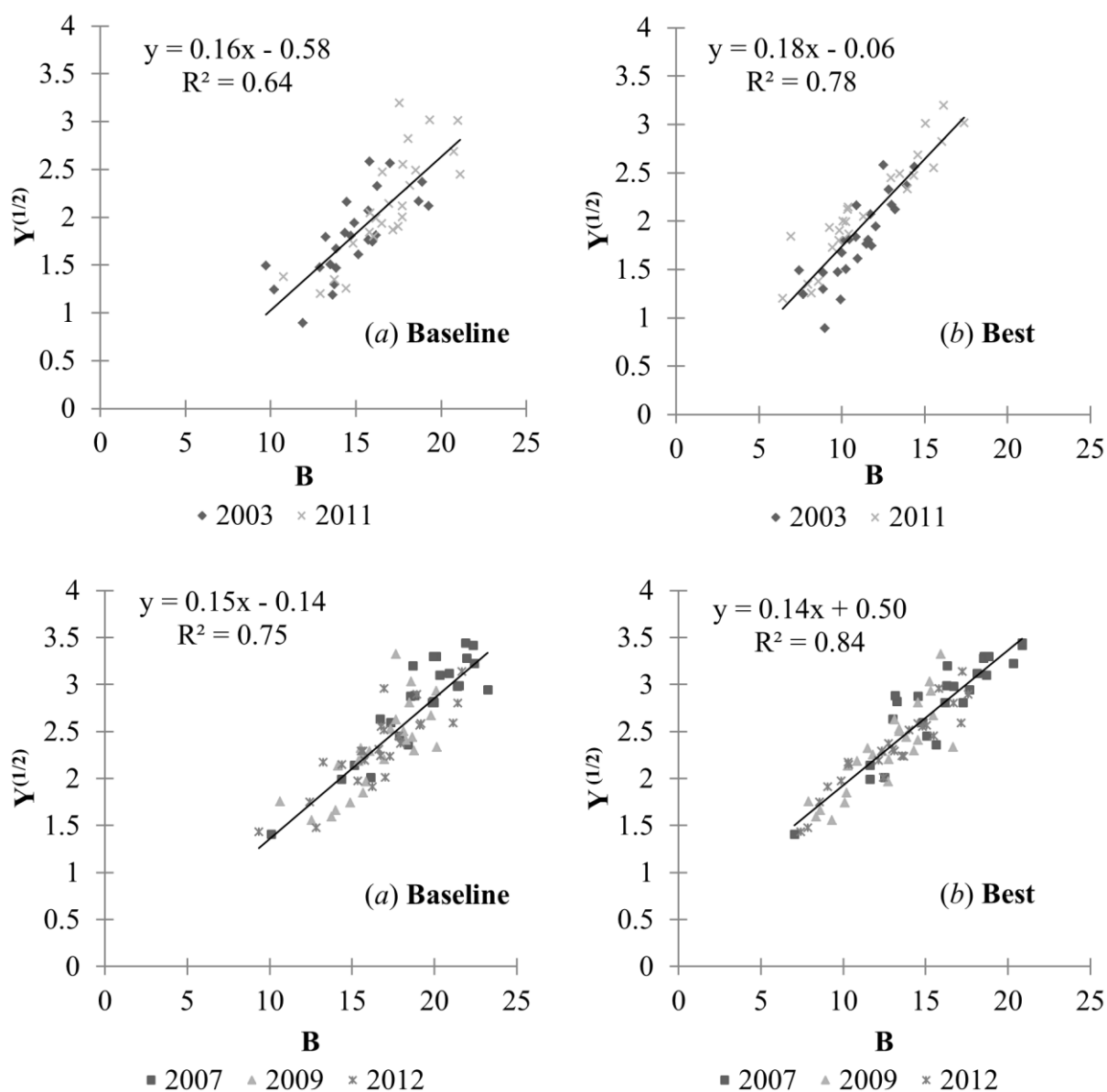


Figure 5-9. Scatterplots between the observed (Y) and modelled (B) productions of the (a) baseline and (b) best developed model estimated by considering only either drought years (2003 and 2011) or normal/humid years (2007, 2009 and 2012).

In conclusion, the baseline model performs well irrespective of the group of years considered. This confirms the earlier FPI validation results obtained in previous studies (Roumiguié *et al.*, 2015a; Roumiguié *et al.*, 2015b) and corroborates findings of Jung *et al.* (2008) that recommended to use an empirical model based on a remote sensing index to estimate biomass production. But, results of the performance analysis lead to the identification of two sources of improvements for the FPI computation method:

- Use of a power function instead of a linear function;
- Integrating ancillary data in semi-empirical models corroborating the conclusions of Seaquist, Olsson et al. (2003).

5.4.2. Individual assessment of biomass production function factors

For the 74 models that outperform the baseline model and classified according to the climatic context (Group 1: all years; Group 2: dry years; Group 3: normal/humid years), the distribution of variables/factors tested is analysed. Results are presented in Table 2. Models based on a biophysical parameter (fAPAR, fCover) perform in general better than models based on NDVI (89% or more of the developed models are based on a biophysical parameter), with a preference for fCover. Further, inclusion of the water stress effect results in a significant improvement for FPI computation, especially during drought. We find that the RUE should be estimated at least with the water stress effect but not with the senescence function (92% to 96% of developed models do not contain the senescence function). The fraction of models that used temperature, phenology and season effects are about 50 percent, suggesting the need for further analysis of its importance. PAR is not found to be an important element for the models. Finally, looking for a unique FPI model for all grassland in France, the growing season has to be modelled as uni-modal growth cycle and with a monitoring period variable in space and time.

Table 2. Distribution in percentage of the variable/factor tested with the different validation dataset. n indicates the number of models in each group. Numbers in bold correspond to the majority.

Variables / Factors	Group 1 (n=74)	Group2 (n=67)	Group3 (n=38)
fCover / fAPAR / NDVI	61 / 31 / 8	63 / 34 / 3	68 / 21 / 11
PAR no/yes	61 / 39	57 / 43	92 / 8
Temperature no/yes	55 / 45	54 / 46	68 / 32
Phenology no/yes	47 / 53	48 / 52	45 / 55
Water stress no/yes	14 / 86	12 / 88	16 / 84
Season no/yes	49 / 51	51 / 49	50 / 50
Senescence no/yes	96 / 4	96 / 4	92 / 8
Monitoring period Fixed /Variable	30 / 70	31 / 69	21 / 79
Phenological cycle 1/2	67 / 33	63 / 37	76 / 24

Based on these results, a new semi-empirical model for the FPI can be defined with the Equation 5-17 to compute the annual biomass production and improve the baseline model given by Equation 5-1.

$$B_n = \sum_{i=SOS}^{EOS} ((fCover_{Grassland}_i) \times RUE_i) \quad 5-17$$

where the RUE_i is equal to the W_i (see Equation (8) and SOS/EOS values are determined annually at the FR scale from the analysis of the fCover time series.

Among the 34 developed models outperforming the baseline model across all validation datasets, eight correspond to Equation (17) with an average improvement with baseline's SRMSE of 18.6%. Table 3 shows the contributions of the SOS/EOS and RUE factors, independently or combined, to the improvement of estimate precision through the SRMSE. Both factors are relevant to improve the precision of biomass estimates given by the baseline model. But, with a decrease of the baseline SRMSE and an increase of the baseline R^2 of -13% and +10%, respectively, the RUE factor estimated with the water stress effect seems to

contribute more than the *SOS/EOS* factor. This result confirms the important role of the *RUE* factor and the water stress index to better estimate grassland biomass production. Results of statistical tests (normality and homoscedasticity) are also provided in Table 3 to complete models performance analysis. Compared to the baseline model, the significance of the variables is confirmed with a more stable model.

Table 3. Contribution of *SOS/EOS* and *RUE* factors to the improvement of the precise estimation of biomass production. Statistics interpretation: figures in bold indicate p-value > α with $\alpha = 0.05$ meaning null hypothesis (either homoscedasticity or normality of residuals) cannot be rejected.

Models	Equations	SRMSE	R ²	p-value for statistical tests				
				Breusch-Pagan	Jarque-Bera	Shapiro-Wilk	Bera	Shapiro-Wilk
Baseline model	$Y_{n,z} = 0.74 \times B_{n,z} - 7.00 + \varepsilon$	0.57	0.68	0.09	0.02	0.02		
Baseline model	$(Y_{n,z})^{0.5} = 0.17 \times B_{n,z} - 0.51 + \varepsilon$	0.54	0.71	0.76	0.49	0.39		
Baseline model with <i>SOS/EOS</i> only	$(Y_{n,z})^{0.5} = 0.15 \times B_{n,z} + 0.12 + \varepsilon$	0.49 (-9%)	0.76 (+7%)	0.94	0.50	0.78		
Baseline model with <i>RUE</i> only	$(Y_{n,z})^{0.5} = 0.16 \times B_{n,z} + 0.03 + \varepsilon$	0.47 (-13%)	0.78 (+10%)	0.51	0.13	0.21		
Best developed model with <i>SOS/EOS</i> and <i>RUE</i>	$(Y_{n,z})^{0.5} = 0.07 \times B_{n,z} + 0.40 + \varepsilon$	0.42 (-22%)	0.83 (+17%)	0.85	0.71	0.90		

5.5. Discussion

The basic idea assessed here is that Production Efficiency Model (PEM) principle integrating meteorological data should improve the baseline FPI model. Opposed to this idea is the advice expressed among others by Coops *et al.* (2009) to run models with less demanding data rather than considering that exogenous variables are correctly mapped and improve estimates. In this section we discuss:

- What variables/factors improve estimates and how they should be integrated in an operational context;
- What variables/factors are not relevant and should be abandoned or studied further;
- How satellite images provided by new sensors and evolution of methodology in PEM could reduce basis risk in index-based insurance.

5.5.1. On the operational implementation of identified improving factors

Two tested factors are clearly identified as key improvements in the FPI computation: incorporating the RUE including the water stress RUE reduction, and accounting for spatial and temporal variability of the growing season. The RUE as moderated by the water stress index (Maselli *et al.*, 2013) proved effective for the generation of more accurate FPI models. Nonetheless, its inclusion would require an operational (near real-time) access to accurate meteorological variables (temperature, rainfall and radiation) (de Leeuw *et al.*, 2014).

The second major improvement concerns the implementation of a variable monitoring period. Meroni *et al.* (2014b) showed that a properly identified start and end of season contributes to a better production estimate. In fact, forage insurance programs in East Africa also incorporate a spatially-variable period for integrating NDVI, based on phenological analysis of NDVI time series (Vrieling *et al.*, 2016). A limitation of our study is the developed methodology to observe phenological indicators. For this study we applied an empirical (visual) analysis of the remote sensing index temporal profiles and did not implement an automated approach. We acknowledge that this should be in principle easy to achieve in future, given that a good range of methods has been developed for the extraction of phenological parameters from image time series (Beurs et Henebry, 2010; Meroni *et al.*, 2014b).

5.5.2. Explanations for why potential improving factors are not relevant

Results obtained for the temperature effect and radiation are not in agreement with literature. For the first one, our hypothesis is that the size of the geographic unit used to establish the regression between observed and modelled annual grassland production is too coarse and as a consequence results in smooth RUE values. This makes that extreme local temperatures are not well represented at the FR scale, because they are averaged over a large area (median equals 184 933 ha for the 25 FR). At the municipality level (approximately 1 500 ha) corresponding to FPI scale computation, we expect that temperature extremes may be better

represented and consequently its effect on photosynthesis may be more realistic (Cai *et al.*, 2014). So it may still be relevant to incorporate the temperature effect in the RUE computation when focussing on smaller areas.

Our results suggest that PAR does not need to be integrated into the new model, as also recommended by Piñeiro *et al.* (2006). While on the one hand this may cause an incomplete representation of the PEM, other studies also reveal a negative correlation between GPP and global radiation (PAR) in grassland over the globe (Beer *et al.*, 2010; Cai *et al.*, 2014) with high levels of insolation leading to high photosynthetic rate but also to high temperatures and evapotranspiration rates, thereby increasing the water stress. Also, as Quintana-Seguí *et al.* (2008) explain in their study, radiation provided by the SAFRAN/F Database present an important RMSE which could lead to decrease new model accuracy instead of increasing it.

The phenology effect (P_i), the senescence leaf modelling (D_i) and the possibility of having a variable number of phenological cycles while modelling the growing season (M), do not contribute to better models in our framework. This result is in contradiction with literature (Cros *et al.*, 2003; Duru *et al.*, 2009; Vrieling *et al.*, 2016). For the phenology effect (P_i) and the senescence leaf modelling (D_i), they are traditionally parametrized at species level or using plant functional traits characteristics (Duru *et al.*, 2009). It requires *a priori* knowledge on the detailed grassland species composition. In our study, given the spatial resolution of remote sensing images (300 m) used to characterize grassland vegetation condition, it is not possible to work at this particular level. So we consider grasslands as mono-species where phenological developments are not species-dependent and use a common parametrization for all grassland types. For the number of phenological cycles while modelling the growing season (M), Vrieling *et al.* (2016) found it relevant because of the existence of two important growth grassland cycles within the year as observed in Kenya. In the case of France, the usefulness of this variable does not seem to be so important. Annual grassland production is mainly driven by the spring period (around 75%) (Pottier *et al.*, 2012). For all these reasons, these three factors should not be further considered as potential improvements. On this account, we therefore support McCallum *et al.* (2009) suggesting that the FPI model has to keep a reasonably low level of complexity in order to be practical and operational.

5.5.3. On the potential of additional remote sensing data to bring improvements

First, it is of interest to consider other variables in the FPI computation to estimate RUE factor. The water stress index (W_i) and the temperature effect (T_i) are obtained from three

climatic variables (temperature, rainfall and radiation) provided by SAFRAN-MeteoFrance. This database is only available for research purposes and cannot be used by private companies for commercial purposes. In the framework of the development of a commercial product, it is mandatory to identify other reliable data sources that can be used in future and are available in near real-time. Beyond existing weather station networks and databases collecting in-situ measurements, climatic variables estimated from remotely sensed data constitutes an exploratory field in both PEMs and Index-Based Insurance. For example, NASA provides evapotranspiration data (MOD16) with a spatial resolution of 1 km and a temporal resolution of 8 days. These data are employed for global modelling of GPP (Yang *et al.*, 2014). Rainfall estimates are also available from thermal infrared and passive micro-wave sensors (Dinku *et al.*, 2008; Hellmuth *et al.*, 2009). Such operational data sources should be further tested within our model comparison framework.

Second, higher spatial and temporal resolution remote sensing data provided by the new generation of sensors such as Sentinel-2 have the potential of improving the accuracy of production efficiency models for grassland productivity estimation. Direct monitoring of grassland vegetation activity at the scale of the plot becomes possible. There are three main consequences:

- The error in the production estimation attached to the disaggregation step, compulsory while processing moderate spatial resolution remote sensing data could reduce (Roumiguié *et al.*, 2015a), which in turn can decrease the basis risk;
- Factors and parameters relying on plant functional traits can be considered in the modelling stage as, at the plot scale, grassland species differentiation is possible;
- The potential of application of the FPI is increased with new opportunities to use it in countries where ground reference data to run calibration/validation of the model at the required spatial scale are lacking (Rembold *et al.*, 2013).

5.6. Conclusion

To improve an Index-Based insurance product for grassland production in France, 768 models are tested to estimate biomass production based on all possible combinations of five factors studied. Outputs are compared with data provided by a mechanistic model (ISOP system) over a sample of 25 forage regions and for 5 contrasted climatic years (humid, normal and dry). Our results reveal that:

- The baseline model based on the fCover integral gives satisfactory results (SRMSE = 0.57 and $R^2 = 0.68$);
- A quadratic link characterizes the relationship between the observed and estimated biomass production values and a power regression function ($x=0.5$) is proposed to increase quality and robustness of our estimates (SRMSE=0.54 and $R^2=0.71$);
- Among the developed models, 34 outperform the baseline regardless of the climatic context and lead to increased accuracy of production estimates;
- From these findings, a new semi-empirical model for FPI is defined to compute the annual biomass production and improve the baseline model (SRMSE=0.42 and $R^2=0.83$). It is still based on fCover but enriched with a water stress index and the phenological indicators SOS/EOS that are spatially and temporally variable according to the grassland growth cycle given by the fCover temporal profile. From the best 34 models identified, 8 correspond to this new FPI model and provide, on average, a decrease of the SRMSE of 18.6 % compared to the SRMSE_{Baseline};
- While the results obtained with many of the factors included in the new FPI model corroborate findings in the literature, results for others tested factors are not in agreement with previous studies as they do not increase the models' quality (McCallum *et al.*, 2009; Cai *et al.*, 2014). We conclude that, phenological and season effects in the RUE factor, the PAR factor, the senescence leaf modelling, and consideration of multiple phenological cycles (m) for grasslands within a year should not be included in the new FPI model. However, concerning the temperature effect on photosynthesis and its relevance highlighted in the literature (Duru *et al.*, 2009), further investigation is warranted using validation data at finer spatial scales.

Quatrième partie

Discussion générale et perspectives

Discussion générale et perspectives

Les prairies constituent une ressource clé pour les élevages. Elles sont aussi très exposées aux événements climatiques. Face à ce constat, l'assurance représente une stratégie de gestion du risque externe à l'exploitation agricole sur laquelle les agriculteurs peuvent s'appuyer pour limiter l'impact des aléas climatiques. Cependant, la conception d'un produit d'assurance des prairies constitue un véritable challenge compte tenu de la diversité des couverts prairiaux et des modes d'exploitation.

Les assurances indicielles, basées sur des indices de végétation obtenus à partir d'images satellitaires et permettant la mesure des pertes de production, constituent des solutions efficaces qui contournent des verrous méthodologiques inhérents aux assurances indemnitaires classiques. Toutefois, avant d'être opérationnel, la validation de l'indice de production est une étape requise. Elle permet d'apporter des garanties nécessaires quant à l'information fournie aux différents acteurs, à savoir :

- Les agriculteurs qui sont les futurs clients potentiels ;
- L'ensemble de la profession agricole (syndicats, instituts,...) qui porte un jugement important sur le produit d'assurance ;
- L'Etat qui subventionne les assurances agricoles et s'assure de la qualité des dispositifs proposés ;
- L'Union Européenne qui définit les cadre de fonctionnement des assurances agricoles (Union européenne, 2013);
- Les réassureurs qui couvrent le risque des assureurs en cas de sinistres exceptionnels ;
- L'assureur qui expose ses fonds propres à une sinistralité mal évaluée et risque d'entacher son image de marque en cas de dysfonctionnement du produit commercialisé.

Les travaux de validation conduisent à une évaluation du risque de base, enjeu majeur lié au développement d'une assurance indicielle. Grâce à l'utilisation d'images satellitaires, le risque de base, qu'il soit spatial et temporel, est bien maîtrisé. En revanche, la difficulté liée au choix de cette source de donnée provient de la méthode de mesure des pertes. *In fine*, les solutions mises en œuvre dans la chaîne de production de l'Indice de Production Fourragère doivent limiter le risque de base méthodologique.

Les travaux entrepris dans cette thèse ont pour but de répondre aux objectifs définis préalablement, à savoir :

- le développement et la mise en œuvre d'une méthode de validation de l'IPF utilisé pour le produit d'assurance ;
- la proposition d'une nouvelle modalité de calcul de l'IPF, combinant des données de télédétection et des données climatiques dans un modèle semi-empirique, permettant d'améliorer la précision de l'estimation de production et ainsi de limiter le risque de base.

6.1. Contributions de la thèse

6.1.1. Contributions méthodologiques

Les contributions d'ordre méthodologique de cette thèse reposent essentiellement sur les protocoles de validation proposés.

De nombreuses études de validation de produits issus d'images satellitaires MR existent et sont approuvées par la communauté scientifique (Baret *et al.*, 2005; Weiss *et al.*, 2014). Il s'agit de travaux destinés à des validations d'indices de végétation (NDVI) ou de paramètres biophysiques (LAI, fCover, fAPAR). Les membres du groupe de travail "Land Product Validation" (LPV) du CEOS ont défini un guide des bonnes pratiques pour la validation de produit satellitaire MR. Par le biais du projet VALERI, ils proposent une méthodologie permettant d'évaluer et comparer des paramètres biophysiques MR. Le principe consiste à combiner par changement d'échelle des mesures *in situ* de la variable à valider et des images satellitaires HR (Baret *et al.*, 2005). Ils ont également mis à disposition un site internet² permettant entre autre de réaliser une validation en ligne grâce à une base de données de référence complétée par la communauté d'utilisateurs (Weiss *et al.*, 2014).

Dans le cadre de l'IPF, il a été nécessaire de valider l'estimation de production fourragère et non pas un indice de végétation ou un paramètre biophysique. Cela implique de travailler à partir de séries temporelles d'images satellitaires à une résolution spatiale similaire à celle du produit d'assurance (6 km x 6 km) en se focalisant exclusivement sur les prairies. Compte tenu de ces caractéristiques, la méthode du projet VALERI n'est pas applicable en l'état et nécessite des adaptations.

² <http://calvalportal.ceos.org/web/olive>

Une approche par comparaison directe avec des données de production mesurées *in situ* a été couplée avec une approche par comparaison indirecte avec un IPF produit à partir d'images satellitaires HR. Nous montrons que les deux méthodes se complètent et offrent un niveau de précision supérieur à celui obtenu par une validation réalisée simplement avec l'une des deux approches.

La comparaison directe paraît nécessaire malgré le coût d'acquisition des données de référence à cette échelle (Martínez *et al.*, 2009). Ces dernières doivent être nombreuses pour garantir la qualité de l'analyse statistique. Il s'agit d'une méthode simple à comprendre pour les différents acteurs visés par le produit d'assurance, notamment parce que les données de référence sont des mesures de production faites *in situ*.

La comparaison indirecte est tout aussi intéressante. Elle permet de réaliser une validation sur un maillage identique au produit d'assurance (*i.e.* les mailles de 6 km x 6 km ou bien les communes) sur des zones étendues (emprise des images satellitaires), avec une identification exhaustive des surfaces prairiales grâce à des bases de données d'occupation du sol (ex. RPG). Grâce à cette approche, le problème de représentativité de l'échantillonnage des données de référence que l'on peut avoir dans le cas de la comparaison directe est diminué. La comparaison indirecte permet d'étendre les zones d'études dans des conditions stationnelles variées et de donner davantage de robustesse à la validation réalisée. La principale limite à sa mise en œuvre provient de la capacité à construire des séries temporelles d'images HR exploitables (Roy *et al.*, 2015). Jusqu'à ce jour, les capteurs HR disponibles ne garantissent pas la constitution de séries temporelles régulières sur une année complète en tout point donnée en France.

6.1.2. Contributions thématiques

Les travaux de validation effectués permettent de conclure sur la bonne aptitude de l'IPF pour estimer des variations de production fourragère.

Les résultats concernant le choix du paramètre biophysique comme variable descriptive pour le suivi de la production de biomasse des prairies (Roumiguié *et al.*, 2015b) corroborent des études existantes (Lu, 2006; Courault *et al.*, 2010). Ils démontrent un niveau de corrélation élevé de l'IPF_{HR} avec les mesures *in situ* et permettent de valider la chaîne de traitement mise en place par Airbus D&S pour l'obtention du fCover.

Les conclusions de la validation de l'IPF calculé à partir d'image MR à différentes échelles spatiales et temporelles (Roumiguié *et al.*, 2015a; Roumiguié *et al.*, accepté) confirment le

potentiel des séries temporelles d'images MR pour observer des variations de production fourragère (Diouf *et al.*, 2015). Le modèle empirique établi à l'heure actuelle donne un niveau de corrélation intéressant avec les données de référence utilisées, qu'il s'agisse de mesures *in situ* (comparaison directe $R^2 = 0,71$), d'images HR (comparaison indirecte $R^2 = 0,78 - 0,84$), ou de données issues de modélisation ($R^2 = 0,68$). Nous déduisons de ces travaux la bonne qualité de la chaîne actuelle de production de l'IPF. Nous en identifions aussi des leviers d'amélioration. Cela a débouché sur les travaux de modélisation dans Roumiguié *et al.* (accepté). Ils ont pour originalité de s'appuyer sur des principes rencontrés dans les modèles d'efficacité de production (Monteith et Moss, 1977) afin de les appliquer à un produit d'assurance opérationnel.

Parmi les assurances indicielles existantes recensées par Sandmark *et al.* (2013) et tout particulièrement celles destinées aux prairies, les indices utilisés sont obtenus à partir de modèles empiriques. Les chaînes de traitement appliquées sont relativement simples en comparaison des modèles d'efficacité de production (Lafont *et al.*, 2002; Cao *et al.*, 2004; Sasai *et al.*, 2005). A notre connaissance seule l'entreprise EARS qui travaille sur un projet d'assurance indicielle destinée aux agriculteurs africains a entrepris une démarche similaire. Avant de choisir un indice d'évapotranspiration dans leur proposition finale (Rosema *et al.*, 2014), ils envisageaient de calculer un indice de rendement calculé à partir du couplage d'un modèle météorologique (EWBMS) et d'un modèle de croissance des végétaux (ECGM) (Rosema *et al.*, 2010).

Les conclusions de Roumiguié *et al.* (accepté) révèlent l'intérêt des approches semi-empiriques pour les assurances indicielles et nous conduisent à la proposition d'une nouvelle méthode de calcul de l'IPF. Ces changements contribueraient à limiter le risque de base tout en respectant le caractère opérationnel de l'IPF. Lors du développement d'un tel produit, il est important de conserver la facilité de mise en œuvre et de traitement de l'indice pour ne pas être dans l'incapacité de le calculer à un moment donné (McCallum *et al.*, 2009).

6.2. Poursuite des travaux de thèse et nouvelles perspectives de recherche

A l'issue de cette thèse, nous présentons en premier lieu dans la partie suivante les travaux déjà engagés qui pourraient être poursuivis dans le cadre de l'amélioration continue de l'IPF. Nous identifions également de nouvelles perspectives de recherche, soit au niveau de l'IPF, soit au niveau des produits d'assurances indicielles et de leur potentiel d'application pour les prairies.

6.2.1. Poursuite des travaux de validation de l'IPF

Le produit d'assurance des prairies est commercialisé depuis juin 2015 par Pacifica. Hormis la phase d'expérimentation, la première campagne opérationnelle de l'IPF se déroulera durant l'année 2016. En décembre 2015, un comité scientifique de validation mandaté par les pouvoirs publics a auditionné les différents assureurs souhaitant proposer une assurance pour les fourrages afin d'accréditer et de subventionner chaque produit. Ce fût l'occasion pour Airbus D&S et Pacifica de présenter les résultats de validation de l'IPF à des experts en assurance, agronomie, télédétection, météorologie... En partie grâce aux travaux détaillés dans cette thèse, la qualité de l'IPF a été démontrée. En conclusion de cette présentation, le comité scientifique a incité les assureurs à maintenir cet effort de validation. La poursuite de ces travaux devrait renforcer la confiance qu'ont les différents acteurs dans l'IPF et fournir des garanties sur la qualité de l'indice pour mesurer des variations des productions.

La mise en œuvre d'une validation supplémentaire à partir d'images HR ne constitue pas une priorité car les résultats obtenus donnent satisfaction (Roumiguié *et al.*, 2015b). Certes, le climat et les sols rencontrés sont sensiblement similaires du fait de la proximité des parcelles échantillonnées mais les conclusions concernant le potentiel des images satellitaires pour estimer une production de biomasse corroborent celles de nombreux auteurs (Pettorelli *et al.*, 2005; Lu, 2006).

En revanche, l'indice obtenu dans le cadre du produit d'assurance, à partir d'image MR, est soumis à davantage de source d'erreurs du fait de la résolution des images satellitaires et des traitements appliqués. Le travail effectué dans le cadre de la validation par comparaison directe et indirecte (Roumiguié *et al.*, 2015a) est limitée à une zone restreinte, peu représentative de la variabilité des conditions stationnelles et des types de productions observés à l'échelle de la France.

Les travaux à engager doivent s'appuyer sur les apports méthodologiques de la thèse. La méthode de comparaison directe peut être réalisée en s'appuyant sur des instituts techniques et/ou des organismes publics afin d'obtenir la donnée de référence. A l'heure actuelle, il existe également des programmes d'acquisitions de séries temporelles HR pour réaliser une comparaison indirecte. De plus, les comparaisons avec des données statistiques utilisées par les pouvoirs publics dans le cadre du FNGRA permettraient également de réaliser une validation sur l'ensemble du territoire français.

La poursuite de ces activités en élargissant les contextes de production et les sources de données mobilisées représente une garantie supérieure. Au-delà du gain de confiance espéré chez les différents acteurs, ces travaux permettent d'apprécier la pertinence des évolutions proposées dans une logique d'amélioration continue de l'IPF.

- Validation par comparaison directe

La validation de l'IPF_{MR} par comparaison directe est fastidieuse à mettre en œuvre dans différentes zones géographiques. L'effort nécessaire à la collecte de données *in situ* peut être rédhibitoire pour le bon déroulement du protocole.

Les réseaux existants d'observation de pousse de l'herbe constituent une opportunité intéressante pour bénéficier de leur savoir-faire. Des partenaires potentiels, incluant les chambres d'agriculture, l'Institut de l'Élevage, Arvalis-Institut du végétal, l'INRA..., acquièrent des données de production des prairies régulièrement sur des sites expérimentaux ou des fermes partenaires et disposent d'historiques de production. Moyennant un maillage redéfini sur les quelques parcelles suivies à l'échelle locale, ces bases de données sont exploitables pour mener une comparaison directe de l'IPF_{MR} dans des conditions stationnelles variées.

Mener ces travaux conjointement avec un ou plusieurs des partenaires nommés ci-dessus permettrait de diminuer les délais d'acquisition des données de référence et d'ainsi apporter des conclusions aux différents acteurs concernés.

- Validation par comparaison indirecte

Pour réaliser une comparaison indirecte de l'IPF avec un IPF_{HR} à l'échelle des mailles de 6 km x 6 km, il est possible de bénéficier de l'expérience Take Five qui a été réalisée en 2013 et 2015, respectivement avec les capteurs SPOT-4 et SPOT-5. C'est d'ailleurs grâce au jeu de données de 2013 que les travaux sur le département du Lot ont pu être entrepris (Roumiguié *et al.*, 2015a).

La Figure 6-1 présente les sites sélectionnés pour les acquisitions d'images en 2013 et 2015. En France, il y a sept sites (en vert), couvrant plus de 3,2 millions d'hectares, pour lesquels l'emprise des images des deux séries temporelles est commune. Du 5 février au 18 juin 2013 et du 9 avril au 11 septembre 2015, une acquisition a été faite tous les cinq jours ce qui augmente la probabilité d'obtenir des séries temporelles d'image HR avec une fréquence d'acquisition élevée.

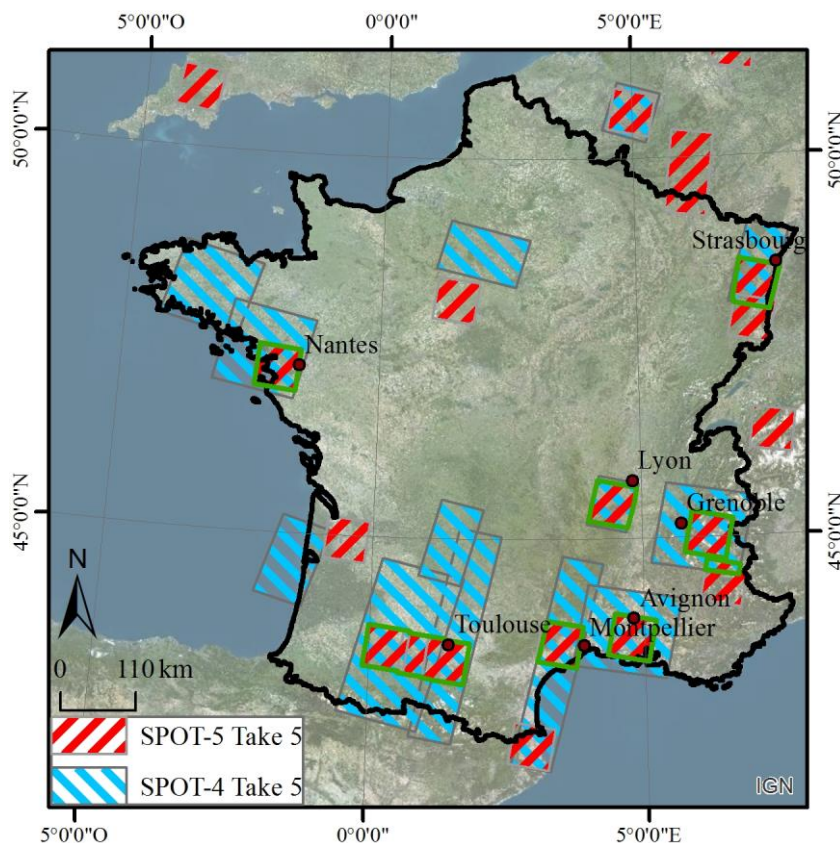


Figure 6-1. Sites d'acquisition des programmes SPOT-4 Take5 et SPOT-5 Take5.
Source : (CNES)

Etant donnée les périodes couvertes par ces deux jeux de données, il serait nécessaire de compléter les séries temporelles avec des images provenant d'autres capteurs afin de couvrir l'année complète de production. Hormis pour les images Landsat qui sont distribuées gratuitement, il est possible d'acheter des images disponibles en archive. Ainsi en 2014 pour le protocole de validation MR, les données Landsat-8 acquises représentent 18 des 22 images disponibles et ont permis de constituer une série temporelle exploitable pour cette année-là.

- Validation par comparaison avec des données de modélisation ou statistiques

Comme cela a été réalisé dans Roumigué *et al.* (accepté), il est possible de confronter l'IPF à des bases de données existantes, traditionnellement utilisée dans le cadre du FNGRA.

La représentativité des résultats obtenus pour la validation de l'IPF à cette échelle serait augmentée significativement en prenant en compte l'ensemble des régions fourragères (ou départements) sur la période 2003-2015. Egalement, les améliorations de l'IPF identifiées dans la thèse supposent une validation sur l'ensemble de la France avec toutes les années disponibles avant de les implémenter opérationnellement dans la chaîne de traitement.

Deux jeux de données existent pour réaliser ce travail: *i*) Les sorties du dispositif ISOP calculées par région fourragère; ou bien *ii*) Les données de production Agreste³ disponibles par département.

6.2.2. Nouvelles perspectives de recherche

6.2.2.1. Perspectives de recherche pour le développement de l'IPF

Dans ce paragraphe, les perspectives de recherche pour le développement de l'IPF sont présentées en deux temps : celles qui découlent directement des conclusions des travaux de thèse et celles provenant de nouvelles idées identifiées lors des tests de mise en œuvre du produit d'assurance ou issues de la littérature.

6.2.2.1.1. *Perspectives qui découlent directement des travaux de thèse*

Les résultats de modélisation dans Roumiguié *et al.* (accepté) corroborent des éléments de littérature, notamment pour la période de suivi de la production fourragère (Meroni *et al.*, 2014a; Duncan *et al.*, 2015) et les effets concernant le stress hydrique (Beer *et al.*, 2010; Maselli *et al.*, 2013). Les développements proposés, sous réserve d'être acceptés, doivent être implémentés dans le calcul de l'IPF. Il est alors nécessaire d'envisager l'automatisation de ces aspects méthodologiques. Au-delà de la simplification indispensable que cela représente pour le traitement, il est primordial que l'indice repose sur une chaîne automatique et une méthode de calcul non manipulable afin d'en garantir l'objectivité (de Leeuw *et al.*, 2014).

- Evolution de la méthode de détection de la fenêtre de calcul de l'IPF

Concernant la détection des débuts et fins de saison, il existe de nombreuses techniques qui seraient facilement implémentées dans le calcul de l'IPF. Beurs et Henebry (2010) référencent les méthodes existantes en quatre groupes : celles basées sur l'identification de seuils, sur le calcul de fonctions dérivées ou de fonction de lissage et par l'ajustement de fonction. C'est cette dernière option méthodologique qui est mise en œuvre par Meroni *et al.* (2014b) pour la caractérisation de la phénologie de la végétation dans la corne de l'Afrique à partir de données de fAPAR (capteur SPOT-VEGETATION). Cette méthode permet notamment d'interpoler

³ Ces données sont produites par le SSP à partir d'enquêtes statistiques par sondage aléatoire et en utilisant des réseaux d'enquêteurs spécialisés. Outre ces sources de renseignement utilisées de façon traditionnelle, ils disposent également d'évaluations de correspondants et d'experts ainsi que de données chiffrées fournies par les organismes techniques professionnels. Les arbitrages réalisés doivent conduire à la publication de données cohérentes dans le temps et homogènes dans l'espace (<https://stats.agriculture.gouv.fr/disar/>).

des séries temporelles irrégulières potentiellement bruitées tout en ayant la possibilité de pondérer les observations selon la qualité des images.

- Ajout d'un indice de stress hydrique pour une meilleure prise en compte de la sensibilité des prairies à la sécheresse

La correction de l'IPF par un indice de stress hydrique tel que nous le préconisons implique de disposer de variables climatiques (rayonnement, température et précipitation) pour le calcul de l'évapotranspiration. Au cours des travaux réalisés, la base de données SAFRAN (Quintana-Seguí *et al.*, 2008; Vidal *et al.*, 2010) a été utilisée pour l'obtention des variables climatiques. Ces données, destinées à la recherche, sont calculées opérationnellement à une résolution de huit kilomètres.

La télédétection permet également de calculer ces variables à partir d'observations journalières à des résolutions spatiales kilométriques. Par exemple, la NASA met à disposition un produit d'évapotranspiration (MOD16 ET) à un kilomètre de résolution spatiale obtenu à partir de l'algorithme de Penman-Monteith (Monteith, 1965). Des données d'occupations du sol et de fAPAR/LAI produits à partir du capteur MODIS sont utilisés en entrée de cette chaîne de traitement (Mu *et al.*, 2007; Mu *et al.*, 2013b). Grâce aux produits MOD16 ET et MODIS NDVI (Huete *et al.*, 2002), Mu *et al.* (2013a) calculent tous les huit jours un indice de sécheresse, le DSI ("Drought Severity Index"), à un kilomètre de résolution spatiale à l'échelle globale.

Compte tenu des exigences du produit d'assurance vis-à-vis des délais de calcul, l'accès à ces données doit permettre un traitement mensuel afin de déclencher une indemnisation si nécessaire. C'est un critère décisif pour le choix de la source de données.

- Changement de type de séries temporelles pour la production du fCover : de la MR à la HR

Concernant les champs d'investigation possibles, les travaux de validation menés ont permis de révéler le potentiel des images HR pour calculer l'IPF. L'intérêt que procure leur utilisation provient de l'observation directe des surfaces en prairies, permettant ainsi de s'affranchir de l'étape de désagrégation. Des éléments de résultats montrent l'influence du taux de surface en prairie dans les mailles sur la qualité du fCover_{MR} (p. 146). Afin de minimiser les erreurs de désagrégation dans la méthode actuelle, le pourcentage de surface prairiale doit être supérieur à un seuil de 15 %, fixé après expertise par Airbus D&S. Si les capteurs HR étaient utilisés

comme source d'information dans la chaîne de traitement de l'IPF, les zones présentant de faibles surfaces en prairie pourraient être directement observées.

L'objectif sous-jacent à l'emploi d'image HR n'est pas de calculer un indice de production propre à chaque parcelle de prairie. Cela aboutirait à une assurance individuelle, en dehors du périmètre des assurances indicielles autorisées par l'Union Européenne. La proposition d'amélioration consiste à agréger l'indice HR à l'échelle d'une maille ou d'une zone définie pour ne pas avoir un indice individuel.

Jusque-là, les capteurs HR ne permettaient pas d'envisager cette source de données pour le calcul de l'IPF car les fréquences d'acquisition étaient trop faibles et irrégulières. Avec l'arrivée des données Sentinel-2 depuis fin 2015 en complément des images Landsat-8, la constitution de séries temporelles HR est une opportunité intéressante.

Cependant, le changement de données sources n'est pas sans contrainte. La fréquence d'acquisition d'image satellitaires diminuerait, passant d'une acquisition d'image MR quotidienne à une image HR tous les cinq jours dans le cas des données Sentinel-2, et entraînerait des problèmes de données manquantes et d'irrégularité de la série temporelle. Cela aurait pour conséquence de diminuer les chances d'obtenir des images avec des conditions atmosphériques favorables (c'est-à-dire sans nuages).

Dans la version actuelle de calcul de l'indice, les problèmes liés à la couverture nuageuse sont traités par un procédé de synthèse sur les images journalières MR. Avec deux ou trois images HR par décade, le potentiel des images de synthèse est limité et le risque de ne pas être en mesure d'observer les prairies est accru.

Ce type de développement implique aussi une adaptation en termes d'architecture et de capacité de la chaîne de traitement existante car les images HR sont de tailles supérieures et demandent des temps de calculs importants.

La fusion de données entre des images provenant de capteurs MR et HR peut être une solution transitoire pour évoluer entre les deux sources de données. Elle permet d'exploiter la répétitivité temporelle des données MR tout en exploitant l'information contenue dans les images HR. Le modèle de fusion de réflectance ("Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model" - STARFM) proposé par Gao *et al.* (2006) est certainement le plus utilisé. Initialement, il a été conçu pour fusionner des données MODIS et Landsat. Il a été amélioré par Zhu *et al.* (2010) afin d'atteindre de meilleures performances dans des paysages hétérogènes.

Récemment, Wu *et al.* (2015) ont développé une méthode permettant de fusionner des données provenant de quatre capteurs avec des résolutions spatiales et temporelles différentes (MODIS à 250 m, Landsat, Huanjing satellite constellation et Gaofen satellite 1 à 30 m). L'objectif de cette étude est de suivre la phénologie des cultures afin de cartographier l'occupation du sol. Cette méthode confère un niveau de détail supérieur à la simple utilisation des données MODIS.

Il est possible d'imaginer une approche similaire pour l'IPF, en fusionnant par exemple les données MODIS avec les données Landsat-8 et Sentinel-2. Un arbitrage est toutefois nécessaire pour juger l'intérêt d'une telle démarche vis-à-vis des contraintes soulevées (développement méthodologique lourd, délais de mise à disposition de ce nouvel indice dans un contexte opérationnel, définition du risque). Un tel développement entraînerait une modification de la chaîne de traitement importante (Zhang, 2010).

6.2.2.1.2. *Perspectives provenant de la mise en œuvre du produit d'assurance et issues de la littérature*

- Ajout de l'effet de la température sur la production des prairies

Malgré un effet certain de la température sur le développement des prairies (White *et al.*, 2000; Duru *et al.*, 2009), les conclusions dans Roumigué *et al.* (accepté) concernant ce facteur divergent des études existantes puisque l'intérêt de le considérer dans le calcul de l'IPF n'a pas été clairement mis en avant.

Nous expliquons cela par la taille des unités de validation avec lesquelles nous travaillons (les régions fourragères) qui ne permet pas d'apprécier les variations locales de températures. A cette échelle les gradients altitudinaux induisent de fortes variations de températures. Des travaux supplémentaires concernant l'intérêt de cet effet devraient être entrepris à des résolutions permettant d'en observer les conséquences. En étendant cette réflexion à la méthode et à la taille des unités de calcul de l'IPF (mailles de 6 km x 6 km), l'hypothèse d'homogénéité de la production dans la maille pourrait être remise en cause par des variations altitudinales importantes. Les conditions stationnelles peuvent être très variables sur de telles distances. Ainsi, il pourrait être intéressant de repenser le maillage défini pour le calcul de l'IPF afin de produire l'indice sur des surfaces plus homogènes du point de vue de la production prairiale.

- Réflexion autour de la définition du maillage utilisé pour le calcul de l'IPF

Un nouveau maillage pourrait être réalisé en fonction de l'altitude, de l'orientation ou encore de la pente à partir d'un modèle numérique de terrain. C'est d'ailleurs une option méthodologique mise en œuvre par MétéoFrance puisque le calcul des variables météorologiques SAFRAN est réalisé à un pas de 300 m (Vidal *et al.*, 2010).

En prenant comme hypothèse que les indicateurs phénologiques permettraient d'identifier des conditions stationnelles et des niveaux de production similaires, ce nouveau découpage pourrait s'appuyer en plus sur une classification basée sur la phénologie des prairies. Son *et al.* (2013) utilisent une approche similaire avec des données MODIS pour classer les systèmes de cultures de riz dans le Delta du Mekong. Dans le cadre de l'IPF, il est possible d'analyser les profils de fCover "Prairies" afin de les regrouper selon des critères de ressemblance.

- Intégration de la notion de qualité des fourrages dans le calcul de l'IPF

Lorsque les éleveurs donnaient leur ressenti vis-à-vis de l'IPF à l'occasion des réunions de présentation ou de retours des phases de test de l'indice, un biais méthodologique était parfois soulevé.

La méthode de calcul de l'IPF actuelle cumule les mesures de fCover réalisées tout au long de l'année sans pondération entre les périodes de croissance. Les éleveurs, conscients que la production réalisée au printemps est généralement de meilleure qualité que celle obtenue lors des exploitations suivantes, désapprouve ce point (Baumont *et al.*, 2009).

L'année 2011, marquée par une sécheresse printanière et un automne excédentaire en termes de production, a souvent été à l'origine de ces échanges. Les simulations effectuées cette année ont donné lieu à des indemnités moins importantes que celles attendues par les éleveurs. Il y a là deux problèmes qui entrent en jeu. D'une part l'indice, ne tenant pas compte de la valeur fourragère des prairies, a tendance à surévaluer la part réellement valorisée par les éleveurs lors de la repousse automnale. Du côté des agriculteurs, ces derniers ont tendance à se focaliser sur la perte printanière, omettant que le principe fondamental de l'indice repose sur une mesure de la production annuelle.

Cette année-là, les éleveurs les plus touchés par l'aléa climatique ont été contraints d'acheter des fourrages pour subvenir aux besoins de leur troupeau dès le mois de juin. Cette sortie de trésorerie n'était pas immédiatement couverte par l'assurance puisque l'IPF ne prévoit une indemnisation qu'en fin d'année.

Deux solutions apparaissent, l'une reposant exclusivement sur le fonctionnement du contrat d'assurance, l'autre dépendant de la méthode de calcul de l'IPF. La première, facile à mettre en œuvre, consiste à créer un produit d'assurance par période de croissance des prairies. Etant donné l'importance de la production réalisée au printemps, une couverture du risque centrée sur cette première pousse permettrait à l'éleveur d'assurer une part importante de sa production tout en limitant la notion de perte de qualité des fourrages. La deuxième solution consisterait à modéliser la qualité des fourrages dans le calcul de l'IPF. Cette évolution implique un développement important de l'IPF du fait de la variabilité de la qualité des fourrages selon les espèces présentes, la fertilisation, les conditions météorologiques et les stades phénologiques rencontrés (Jouven *et al.*, 2006; Baumont *et al.*, 2009; Michaud *et al.*, 2015). Moyennant un niveau d'information supérieur sur les prairies suivies, une interprétation des tables de valeurs des fourrages INRA (Agabriel, 2010) pourrait fournir une expertise précieuse pour modéliser cette variable.

6.2.2.2. Perspectives de recherches pour les produits d'assurances indicielles et leur potentiel d'application sur les prairies.

Dans ce paragraphe, nous développons deux types de perspectives. La première consiste à explorer une démarche différente pour le développement et la validation du produit d'assurance indicielle des prairies. Elle s'inspire des travaux menés par l'équipe de l'UMR 1213 Herbivores de l'INRA de Clermont-Ferrand (Mosnier, 2015) basée sur une approche économique de l'évaluation de l'intérêt de ce type d'assurance. La seconde focalise sur les potentiels d'application de l'IPF sur les prairies.

6.2.2.2.1. *Alternatives à l'approche agronomique développée dans la thèse*

Les travaux entrepris dans cette thèse ont pour objectif de diminuer le risque de base en améliorant la précision de l'estimation de production. Les analyses et les conclusions reposent sur une minimisation de l'erreur entre les productions de fourrages réelle et estimée. La méthode de calcul de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est présentée dans l'Equation 6-1.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (IPF_j - Prod_j)^2}{n}} \quad 6-1$$

avec, $Prod$ correspondant à la production réelle, IPF correspondant à la production estimée et n correspondant au nombre d'individus.

En se plaçant dans l'optique de l'assureur qui commercialise le produit d'assurance avec une franchise k , nous aurions pu chercher à minimiser les erreurs sur le critère des indemnités. Pour un taux de perte réalisé, noté $\Delta Prod$, le montant d'indemnité correspond à $[\Delta Prod - (1 - k)]^-$ (partie négative de $\Delta Prod - (1 - k)$, c'est-à-dire $[\Delta Prod - (1 - k)]$ si $\Delta Prod < (1 - k)$ et 0 sinon).

Selon ce critère, la nouvelle méthode de calcul de la RMSE est donnée par l'Equation 6-2.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n ([\Delta IPF_j - (1 - k)]^- - [\Delta Prod_j - (1 - k)]^-)^2}{n}} \quad 6-2$$

avec, $\Delta Prod$ correspondant à la perte de production réelle, ΔIPF correspondant à la perte de production estimée, k correspondant à la franchise ($k < 1$) et n correspondant au nombre d'individu.

Du point de vue de l'assureur, la qualité de prédiction du modèle en situation de production excédentaire (lorsque $\Delta Prod > (1 - k)$) n'est pas importante. Une telle fonction à minimiser permet de se focaliser sur les situations donnant lieu à des indemnités.

Dans nos travaux, le critère de performance des modèles est basé sur la méthode des moindres carrés qui est une approche statistique classique en télédétection (Nouvellon *et al.*, 2001; Bacour *et al.*, 2006) ou en agronomie (Pervanchon *et al.*, 2005; Bentler, 2007). On cherche ainsi à modéliser au mieux la production fourragère. En optant pour une approche basée sur les théories économiques, il aurait été possible de chercher à maximiser la fonction d'utilité espérée des individus (Morgenstern et Von Neumann, 1944). Par exemple, nous aurions pu avoir comme objectif de fournir un indice qui répond le plus aux attentes des éleveurs ne prenant pas en compte uniquement la fonction de production (Pennings *et al.*, 2008; Velandia *et al.*, 2009).

Au-delà de la faisabilité technique du produit d'assurance des fourrages, notion au cœur de cette thèse, des recherches liées à la demande et aux attentes des éleveurs vis-à-vis de ce

produit existent. L'équipe "Économie et Gestion des Exploitations d'Élevage" de l'INRA UMR 1213 Herbivores travaille sur ces sujets en tenant compte des solutions d'auto-assurance (Mosnier, 2015). Les conclusions de ces travaux mettent en évidence que :

- Pour une année donnée, l'éleveur va s'assurer en fonction des stocks dont il dispose, de l'état général de son troupeau et des rendements obtenus lors des années précédentes.
- Les solutions d'auto-assurances permettent de gérer les faibles pertes de productions mais elles deviennent inefficaces car coûteuses pour les aléas les plus importants. En conséquence, les éleveurs pourraient être intéressés par l'assurance des prairies avec une franchise de 30 % et au-delà.

Il est démontré que le produit d'assurance est une solution externe à l'exploitation qui limite l'exposition au risque climatique. Il ressort également de ces travaux que l'auto-assurance et l'assurance sont complémentaires.

Cette dernière est aussi un levier de compétitivité pour l'éleveur. Il faut pour cela que le coût de l'assurance ne soit pas surévalué et que le produit soit ajusté à l'exploitation. Dans cette configuration, l'agriculteur peut espérer une bonne efficacité du produit d'assurance. Lors de ses orientations stratégiques, il peut choisir entre consacrer des surfaces de prairie pour son auto-assurance ou bien intensifier son système de production.

Malgré les intérêts évoqués ci-dessus, les dispositifs d'assurance récolte ne sont pas toujours bien connus des éleveurs. Compte-tenu de leur système de production, ils sont peu susceptibles de contracter ce type de produit et montrent quelques réticences à cet égard, tout particulièrement parce qu'ils trouvent les contrats et les estimations de pertes complexes (Mosnier *et al.*, 2014). Des études devraient être poursuivies afin d'évaluer et de quantifier l'intérêt pour un éleveur de souscrire à ce genre de produit. Selon Mosnier *et al.* (2014), seulement 35 % des éleveurs (sur un échantillon total de 141 éleveurs) préfèrent ce type d'outils à des solutions d'auto-assurance.

6.2.2.2.2. *Potentiels d'applications de l'IPF pour les prairies*

Initialement, les assurances indicielles étaient déployées dans les pays en voie de développement du fait de leur faible coût d'évaluation des sinistres et leur attractivité tarifaire. Elles se révèlent aussi être des solutions efficaces pour des cultures telles que les prairies dont les modalités d'estimations des pertes via les assurances indemnitaires traditionnelles sont inefficaces.

Dans la version actuelle de l'IPF, l'indice est facilement transférable à d'autres pays ou régions moyennant l'accès à une base de données d'occupation des sols. C'est la principale condition nécessaire à la mise en œuvre de cette méthode sur un autre territoire. Dans des zones où les conditions de production fourragère sont fondamentalement différentes de celles rencontrées en France (période de pousse, productivité, forme du parcellaire, exploitation des prairies,...) une adaptation méthodologique du calcul des pertes pourrait aussi être nécessaire. Si tel était le cas, la question de la validation se présenterait à nouveau. C'est alors que les apports méthodologiques présentées et discutées ci-dessus s'avèreraient appropriés pour qualifier la précision de l'indice dans des conditions de production différentes.

Enfin, l'indice utilisé est aussi une source d'information spatialisée sur les conditions de croissance des prairies en France, disponible en quasi-temps-réel, qui représente un fort potentiel d'application pour les éleveurs et les techniciens (Grigera *et al.*, 2007). Ce genre de service est déjà développé dans les régions d'élevage françaises, en s'appuyant sur des méthodes traditionnelles de mesure de la pousse de l'herbe.

Toutefois, on constate un défaut essentiellement lié à des différences méthodologiques pour l'acquisition de ces données (méthode de mesures de la production, période de mesures, historique disponible, types d'exploitations suivies...). Les instituts techniques, les chambres d'agriculture et autres organismes, en charge de la collecte de ces informations sur le terrain via des observatoires locaux de pousse de l'herbe, pourraient s'appuyer sur cette donnée pour compléter et homogénéiser leurs observations.

Il s'agit là d'un des objectifs du Réseau Mixte Technologique "*Prairies demain*"⁴ ou de la mise à disposition par Airbus D&S de l'IPF par région fourragère sur internet⁵. *In fine*, les éleveurs disposent d'un outil supplémentaire d'aide au pilotage des exploitations permettant,

⁴ http://www.afpf-asso.fr/files/Projets_R_D/RMT_Prairies_demain/RMT_Prairies_Demain_Annexe_1.pdf

⁵ www.pleinchamp.com/IPF/HOME

par exemple, de détecter et quantifier plus rapidement des situations de sécheresse pour mettre en œuvre en temps quasi réel les actions en réponse à l'aléa. C'est aussi un moyen efficace pour constituer des références régionales de production des prairies permettant aux agriculteurs d'analyser la cohérence entre leur système d'élevage et la production fourragère sur le moyen et long terme.

Liste des tableaux

Tableau 1-1. Typologie des prairies.....	17
Tableau 1-2. Synthèse des mécanismes et outils disponibles pour l'éleveur selon une stratégie de gestion du risque de sécheresse par anticipation (<i>ex ante</i>) ou en réaction (<i>ex post</i>) de la perte de production.....	27
Tableau 1-3. Typologie des assurances récolte dans l'assurance agricole.....	33
Tableau 1-4. Synthèse des avantages et inconvénients des assurances indicielles dans les assurances récoltes.	35
Tableau 1-5. Typologie des approches existantes selon les critères retenus pour apprécier la qualité d'un indice dans un contexte assurantiel.....	38
Tableau 1-6. Avantages et limites des indices météorologiques et des indices de végétation en fonction du risque de base, de la tarification et de l'administration du produit.....	40
Tableau 1-7. Synthèse des caractéristiques des indices utilisés dans les produits opérationnels d'assurance indicielle des prairies.	42
Tableau 1-8. Caractéristiques des capteurs MODIS et MERIS.	49
Tableau 1-9. Source de données pour la constitution de la base de couverture des occupations du sol.	52
Tableau 2-1 : Caractéristiques des 6 parcelles sélectionnées.	63
Tableau 2-2. Descriptif du protocole expérimental proposé pour l'estimation de la quantité d'herbe sur pied dans des prairies de fauche.....	68
Tableau 2-3. Caractéristiques des capteurs des images constituant les séries temporelles HR.	70
Tableau 2-4. Bilan des acquisitions terrain et images satellitaires. Evolution des valeurs de fCover (▲) et des productions mesurées (■) sur les 6 parcelles. Les barres représentent les valeurs d'écart-type des prélèvements réalisés à la date considérée.	72
Tableau 2-5 : Caractéristiques des matériels utilisés pour l'estimation du poids des bottes. ..	80
Tableau 2-6. Caractéristiques des capteurs Deimos et Landsat-7 constituant les séries temporelles HR.....	85

Liste des tableaux

Tableau 2-7. Bilan des acquisitions de données satellitaires à haute résolution spatiale pour la constitution des séries temporelles en 2013 et 2014 dans le cadre de la validation d'IPF par comparaison indirecte.	86
Tableau 2-8. Données utilisées pour le dispositif ISOP et principales caractéristiques.....	95
Table 3-1. Strengths and weaknesses of "rainfall" and "vegetation estimates" indexes regarding three criteria: the basis risk, the availability of data and the simplicity of product/administration.	103
Table 3-2. Overview of the characteristics of the 6 studied parcels.....	107
Table 3-3. Description of the 6 levels of analysis carried out.....	111
Table 3-4. Results of the linear regression between field measured biomass and FPI derived from fCover (green), fAPAR (light green) and Efficiency Index (in italic). All regressions are significant to the Fischer test ($\alpha < 0.001$). *= without data acquired during the senescent period. Figures in brackets indicate the total number of observations in the dataset. NRMSE and MSE are in FPI unit.	113
Table 4-1. List of the High Resolution images processed for the computation of the Forage Production Index.	142
Table 5-1. Description of the main characteristics of the existing index-based insurances for grassland in the World.....	158

Liste des figures

Figure 1-1. Représentation schématique de la fonction d'accumulation de biomasse en fonction du rayonnement incident après une coupe sévère (biomasse initiale nulle) ou partielle (biomasse initiale non nulle), en l'absence de déficit hydrique et selon un apport en azote.....	18
Figure 1-2. Saisonnalité de la production d'herbe. Représentation schématique de la réponse de la production des prairies (a) à la variabilité des conditions climatiques; (b) par zone climatique; (c) par espèces et par mécanismes de photosynthèse dominants.	20
Figure 1-3. Schéma conceptuel de l'effet de la variabilité des conditions climatiques (précipitations et température) sur la disponibilité en eau du sol et réponse des prairies	26
Figure 1-4. Fréquence et coût relatif de chaque sinistre enregistrés sur la France entière par le FNGRA (en % de l'ensemble des sinistres 1980-2006).....	31
Figure 1-5. Chaîne de traitement de l'IPF mise en place par Airbus Defence & Space.....	46
Figure 1-6 : Illustration de la solution AIRBUS Defence & Space pour la génération du fCover.....	48
Figure 1-7. Illustration des pixels, unités de traitement, mailles et des valeurs de fCover associées.	51
Figure 2-1. Localisation des parcelles de prairies étudiées et des stations météorologiques utilisées pour caractériser les conditions climatiques locales (T°: température; R: rayonnement).....	61
Figure 2-2. Diagramme ombrothermique du premier semestre des années 2012 et 2013 et des normales (période 1981-2010). Les données de précipitations (PP) et de températures (T°) proviennent de la station météorologique de Blagnac.....	62
Figure 2-3. Prélèvements de biomasse à l'aide d'une motofaucheuse.	67
Figure 2-4. Illustration de l'échantillonnage et la répartition des blocs de la parcelle 2 durant l'année 2013 avec un zoom sur les points de prélèvements du bloc F.	69
Figure 2-5. Sites d'étude pour la validation par comparaison directe. La localisation des stations météorologiques de Millau et Gourdon apparaît sur la figure.	76

Liste des figures

- Figure 2-6. Diagramme ombrothermique des villes de Millau (sud-est de l'Aveyron) et Gourdon (nord-ouest du Lot) réalisé à partir des données climatiques moyennes calculées sur la période 1981-2010..... 77
- Figure 2-7. Caractérisation des départements du Lot et de l'Aveyron en fonction des conditions topographiques et climatiques (température moyenne, précipitations annuelles, cumul de rayonnement). Les données climatiques sont des moyennes calculées sur la période 2000-2011. Les parcelles de prairies échantillonnées sont symbolisées par des points. 78
- Figure 2-8. Variations en pourcentage de la somme des températures [$^{\circ}\text{C}$], du rayonnement [$\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$] et des précipitations [mm] du 1^{er} février au 31 juillet dans la zone d'étude. La variation d'une année est exprimée par rapport à la moyenne des deux autres..... 79
- Figure 2-9. Illustration des mailles de 3600 ha et des mailles de 1152 ha redéfinies pour la validation par comparaison directe avec des mesures de biomasse. 82
- Figure 2-10. Caractérisation du département du Lot en fonction des conditions climatiques (température moyenne, précipitations annuelles, cumul de rayonnement) et du pourcentage de prairie dans les mailles utilisées pour le calcul de l'IPF à haute et moyenne résolution spatiale. Les données climatiques moyennes couvrent la période 2000-2011. Les mailles sur la figure en bas à droite sont celles utilisées dans la chaîne de production de l'IPF. 84
- Figure 2-11. Séries temporelles de fCover sur les parcelles de prairies du Lot en 2013 et 2014. Les losanges sur les profils correspondent aux dates d'acquisitions des images satellitaires..... 87
- Figure 2-12. Caractérisation des 25 régions fourragères sélectionnées selon l'altitude, le pourcentage de prairie, la température annuelle et le cumul annuel des précipitations moyennes sur la période 2003-2012..... 89
- Figure 2-13. Caractérisation des 25 régions fourragères sélectionnées selon le ou les modes d'exploitation les plus recensés dans chaque région fourragère d'après l'enquête du SCEES en 1998 90
- Figure 2-14. Présentation des 30 modes d'exploitations issus de l'enquête du SCEES en 1998 selon le niveau de fertilisation, le nombre de coupes et les intervalles entre coupes. Le trait horizontal rouge indique la somme de température généralement disponible, et le

Liste des figures

- symbole supérieur indique la possibilité d'une coupe supplémentaire si la température est particulièrement élevée. Le niveau de fertilisation est représenté par une taille plus importante du symbole ; le chiffre placé à côté renseigne sur la quantité apportée..... 91
- Figure 2-15. (a) Précipitations et (b) températures annuelles, printanières et estivales pour les cinq années sélectionnées comparées aux moyennes (2003/2012) observées sur les 25 régions fourragères..... 93
- Figure 2-16. Production des prairies selon le dispositif ISOP des 25 régions fourragères en 2003, 2007, 2009 en moyenne pour les cinq années sélectionnées..... 96
- Figure 3-1. Location of the studied plots (●) with meteorological tower (▲ : weather stations for temperature and rainfalls; ▲: weather stations for temperature, rainfalls and radiation). Top right: example of the sampling methodology with the grid pixel and the colored plots on parcel 2. 106
- Figure 3-2. Scatterplots showing the correlations between field measured biomass (T of Dry Matter/ha) and FPI derived from fCover (a) for all plots (n=488) - Data collected during senescence are in red; (b) for only the growing period data (n=488); (c) for the data grouped according grassland types (Permanent Grassland with *Poaceae* species n=232; Temporary with *Fabaceae* Species (Alfalfa) n=18; Temporary grassland with mono-species or mixed *Poaceae* species n=176); (d) for the data acquired in 2012 and 2013 on parcel 2 (respectively, n= 132 and 56); (e) for the data acquired during the two growing periods on parcel 3 (n = 31 and n=12). 114
- Figure 3-3. Comparison of fCover produced by OverlandTM from multi-sensor HR images: e.g., SPOT-4 and Formosat-2 acquired March, 4th 2013..... 116
- Figure 3-4. Example of fCover (in red) and field measured biomass profiles (in green) for parcels 3 and 4. Parcel 3 was harvested at x=775° (06/05/2013). Y-bar lines correspond to standard deviation values. 118
- Figure 4-1. The processing chain of the Forage Production Index (FPI). Rectangles in black bold illustrate the main step of the processing chain. Green dotted rectangles are the intermediate products. PROSPECT= Properties Spectra; SAIL= Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves; LOWTRAN= Low Resolution Transmission; D&S= Defence & Space; MVC= Maximum Value Composite; NPV= Non-Productive Vegetation; fCover= Fraction of Green Cover 129

Liste des figures

- Figure 4-2. Sampling sites in the Lot and Aveyron departments. Colored dots represent the grassland plot sampled with each color representing one of 28 participating farms. 132
- Figure 4-3. Variation in percentage of the averaged sum of temperature ($^{\circ}\text{C}$), visible radiation (J.cm^{-1}) and rainfall (mm) from February 1 to July 31 in the defined ESU of the study area. Values were calculated by the value of a given year divided by the average of the other two years for each parameter. 133
- Figure 4-4. Workflow of the direct comparison methodology. fCover= fraction of green vegetation cover; MODIS= Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer; MR= Moderate Resolution; FPI= Forage Production Index 134
- Figure 4-5. Examples of two resized ESUs containing sampled grassland plots and designed for FPI direct comparison. The background image is a 10-day MODIS fCover image from 11/02/12 to 20/02/2012 at a spatial resolution of 300 m. 135
- Figure 4-6. Scatterplot of the linear regression between ΔFPI_{MR} and $\Delta Yield$ measured at 13 resized ESUs of 1152ha for the period 2012-2014 in the Lot and Aveyron departments. Circles represent ESUs with the triangle highlighting one ESU where the indices vary in opposite directions. ΔFPI_{MR} and $\Delta Yield$ are respectively given by Equations 4-4 and 4-5. 137
- Figure 4-7. Grassland plots extracted from the Common Agricultural Policy database and used for indirect comparison. The background image is a 10-day MODIS fCover product for the period 11/02/12 to 20/02/2012 at a spatial resolution of 300 m. 139
- Figure 4-8. Geographic extent of the Lot department with the original ESUs used for indirect comparison of Forage Production Index (FPI)..... 140
- Figure 4-9. Scatterplots of the Production Index (PI) and Forage Production Index (FPI) derived from high resolution (HR) and moderate resolution (MR) images of 2013 and 2014. The HR and MR index values shown were obtained from 69 and 173 ESUs, respectively. While PI indicates overall productivity without land cover distinction, FPI exclusively focuses on productivity in grassland. RMSE= Root Mean Square Error. .. 144
- Figure 4-10. Standardized Residuals of the linear regression for 2014 between FPI_{MR} and FPI_{HR} according to (a) the percentage of grassland surface in the ESU (for 173 ESUs of 3600 ha). (b) The percentage of grassland sampled to build the FPI_{HR} in the ESU (for 173 ESUs of 3600 ha). 146

Liste des figures

Figure 4-11. Root mean square error of the linear regression for 2014 between ΔFPI_{MR} and ΔFPI_{HR} (Y-axis) according to the percentage of grassland surface in the ESU (Z-axis) and the available ESUs for the analysis according to the grassland surface threshold (X-axis).	147
Figure 5-1. Grassland phenology variability in 5 forage regions. Curves correspond to the mean fCover observed between 2003 and 2012. Colors of the curves allow identifying the corresponding forage region on the map.	163
Figure 5-2. Characterization of the 25 FRs selected for the study according to altitude, grassland surface percentage, temperature, and rainfall, both averaged over 2003 to 2012.	165
Figure 5-3. Annual, spring and summer (a) rainfall and (b) temperature variations for the five selected years compared to a historical reference (2003/2012) observed in the 25 FRs.	166
Figure 5-4. Example of the three time series of "grassland" remote sensing indices available for a forage region situated in South of France in 2003.	167
Figure 5-5. Grassland production, given by the ISOP model, of the 25 FRs selected for 2003, 2007, 2009 and in average of the 5 years studied.	169
Figure 5-6. Overall procedural flowchart for inter-comparison of models.	172
Figure 5-7. Scatterplots of the power value in the regression (x) and the SRMSE for the 64 models outperforming the baseline model.	173
Figure 5-8. Scatterplots of the baseline model with (a) linear and (b) power regression functions ($x=0.50$) between the observed (Y) and modelled (B) productions with the baseline model and considering the whole validation dataset. Dashed black line highlights the power function link between the two datasets. (c) Scatterplots of the power regression function ($x=0.50$) between the observed (Y) and modelled (B) productions with the best performing model.	174
Figure 5-9. Scatterplots between the observed (Y) and modelled (B) productions of the (a) baseline and (b) best developed model estimated by considering only either drought years (2003 and 2011) or normal/humid years (2007, 2009 and 2012).	175
Figure 6-1. Sites d'acquisition des programmes SPOT-4 Take5 et SPOT-5 Take5.	190

Bibliographie

Bibliographie

- AGABRIEL, J. (2010). *Alimentation des bovins ovins et caprins - Besoins des animaux – Valeurs des aliments - Tables INRA 2010*. Versailles, 312 p.
- AGRESTE (2006). *Production fourragère à nouveau déficitaire sur de nombreuses régions*. Agreste Conjoncture, 1 p.
- AGRESTE (2009). *De 1998 à 2008, dix ans de suivi de la production des prairies avec le modèle Isop*. Agreste Conjoncture - Grandes cultures et fourrages - Prairies. Montreuil Sous Bois. 68, 5 p.
- AGRESTE. (2010). "Recensement Agricole." *Consulté le 04/06/2015, Lien:* http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf_R7311RA01.pdf.
- AGRESTE (2011). *Les prairies vues par ISOP en septembre 2011*. Agreste Conjoncture - Grandes cultures et fourrages - Prairies. Montreuil Sous Bois. n° 6/7, 4 p.
- AGRESTE (2014). *Statistique Agricole Annuelle. V-Cultures fourragères*. Paris, Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, 1 p.
- AGRICULTURE FINANCIAL SERVICES CORPORATION (2014a). *Protection for Perennial Crops*, AFSC, 88 p.
- AGRICULTURE FINANCIAL SERVICES CORPORATION (2014b). *Satellite Yield Insurance*. Protection for Perennial Crops, 88 p.
- AGRICULTURE INSURANCE COMPANY OF INDIA LIMITED (2010). *Insurance regulatory and development authority india*. Annual Report 2009–2010. New Delhi, AIC, 247 p.
- AGROASEMEX (2006). *La experiencia mexicana en el desarrollo y operacion de seguros paramétricos orientados a la ganaderia*. Santiago de Queretaro, Agroasemex.
- AGROSEGURO (2012). *Consulta de indices de vegetacion para seguros por teledeteccion. Informe annual*. Madrid, Agroseguro.
- AL HAJ KHALED, R., DURU, M., THEAU, J. P., PLANTUREUX, S. & CRUZ, P. (2005). "Variation in leaf traits through seasons and N-availability levels and its consequences for ranking grassland species." *Journal of Vegetation Science*, 16-(4): 391-398.
- ALARD, D. & BALENT, G. (2007). "Sécheresse: quels impacts sur la biodiversité en systèmes prairiaux et pastoraux." *Fourrages*, 190: 197-206.
- ARRANZ, J. (2012). *Changements observés dans les prairies permanentes de l'extrême sud-ouest de la France et perspectives pour les systèmes d'élevages herbivores*, Journées AFPP–Les atouts des prairies permanentes pour demain, 7 p.
- ASAM, S., FABRITIUS, H., KLEIN, D., CONRAD, C. & DECH, S. (2013). "Derivation of leaf area index for grassland within alpine upland using multi-temporal RapidEye data." *International Journal of Remote Sensing*, 34-(23): 8628-8652.
- ASNER, G. P., BATESON, C. A., PRIVETTE, J. L., EL SALEOUS, N. & WESSMAN, C. A. (1998a). "Estimating vegetation structural effects on carbon uptake using satellite data fusion and inverse modeling." *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 103-(D22): 28839-28853.
- ASNER, G. P., WESSMAN, C. A. & ARCHER, S. (1998b). "Scale dependence of absorption of photosynthetically active radiation in terrestrial ecosystems." *Ecological Applications*, 8-(4): 1003-1021.
- ATZBERGER, C. (2013). "Advances in Remote Sensing of Agriculture: Context Description, Existing Operational Monitoring Systems and Major Information Needs." *Remote Sensing*, 5-(2): 949-981.
- ATZBERGER, C., FORMAGGIO, A. R., SHIMABUKURO, Y. E., UDELHOVEN, T., MATTIUZZI, M., SANCHEZ, G. A. & ARAI, E. (2014). "Obtaining crop-specific time profiles of NDVI: the use of

Bibliographie

- unmixing approaches for serving the continuity between SPOT-VGT and PROBA-V time series." *International Journal of Remote Sensing*, 35-(7): 2615-2638.
- BACOUR, C., BARET, F., BÉAL, D., WEISS, M. & PAVAGEAU, K. (2006). "Neural network estimation of LAI, fAPAR, fCover and LAI×Cab, from top of canopy MERIS reflectance data: Principles and validation." *Remote Sensing of Environment*, 105-(4): 313-325.
- BARET, F., HAGOLLE, O., GEIGER, B., BICHERON, P., MIRAS, B., HUC, M., BERTHELOT, B., NINO, F., WEISS, M., SAMAIN, O., *ET AL.* (2007). "LAI, fAPAR and fCover CYCLOPES global products derived from VEGETATION - Part 1: Principles of the algorithm." *Remote Sensing of Environment*, 110-(3): 275-286.
- BARET, F., MORISSETTE, J. T., FERNANDES, R. A., CHAMPEAUX, J. L., MYNENI, R. B., CHEN, J., PLUMMER, S., WEISS, M., BACOUR, C. & GARRIGUES, S. (2006). "Evaluation of the representativeness of networks of sites for the global validation and intercomparison of land biophysical products: Proposition of the CEOS-BELMANIP." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44-(7): 1794-1803.
- BARET, F., NIGHTINGALE, J., GARRIGUES, S. & NICKESON, J. (2009). *Report on the CEOS Land Product Validation sub-group meeting* The Earth Observer. Missoula, Montana. 21, 26-30 p.
- BARET, F. & WEISS, M. (2010). *Towards an Operational GMES Land Monitoring Core Service-BioPar Methods Compendium-LAI, FAPAR, F COVER NDVI*. Issue 1.5; Geoland2. EC Proposal Reference No. FP-7-218795, Geoland2, 50 p.
- BARET, F., WEISS, M., ALLARD, D., LEROY, M., JEANJEAN, H., FERNANDES, R., MYNENI, R., PRIVETTE, J. & MORISSETTE, J. (2005). "VALERI: a network of sites and a methodology for the validation of medium spatial resolution land satellite products." *Remote Sensing of Environment*.
- BARNETT, B. J. & MAHUL, O. (2007). "Weather Index Insurance for Agriculture and Rural Areas in Lower-Income Countries." *American Journal of Agricultural Economics*, 89-(5): 1241-1247.
- BAUMONT, R., AUFRERE, J. & MESCHY, F. (2009). "La valeur alimentaire des fourrages: rôle des pratiques de culture, de récolte et de conservation." *Fourrages*, 198: 153-173.
- BEER, C., REICHSTEIN, M., TOMELLERI, E., CIAIS, P., JUNG, M., CARVALHAIS, N., RÖDENBECK, C., ARAIN, M. A., BALDOCCHI, D. & BONAN, G. B. (2010). "Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate." *Science*, 329-(5993): 834-838.
- BEIERKUHNLIN, C., THIEL, D., JENTSCH, A., WILLNER, E. & KREYLING, J. (2011). "Ecotypes of European grass species respond differently to warming and extreme drought." *Journal of Ecology*, 99-(3): 703-713.
- BENTLER, P. M. (2007). "On tests and indices for evaluating structural models." *Personality and Individual Differences*, 42-(5): 825-829.
- BERGEOT, S. (2015). *Pacifica lance l'assurance des prairies pour 2016*. La France Agricole. 3592.
- BEURS, K. & HENEERY, G. (2010). "Spatio-Temporal Statistical Methods for Modelling Land Surface Phenology". In: *Phenological Research*. Hudson, I. L. & Keatley, M. R., Springer Netherlands: 177-208.
- BINSWANGER-MKHIZE, H. P. (2012). "Is There Too Much Hype about Index-based Agricultural Insurance?" *The Journal of Development Studies*, 48-(2): 187-200.
- BLACK, A. & STEPHEN, H. (2014). "Relating temperature trends to the normalized difference vegetation index in Las Vegas." *GIScience & Remote Sensing*, 51-(4): 468-482.
- BOURG, L. & ETANCHAUD, F. (2007). *The AMORGOS MERIS CFI (Accurate MERIS Ortho-Rectified Geo-location Operational Software) software user manual & interface control document*. ACRI-ST. Sophia-Antipolis, France. 3, 74 p.
- BOX, G. E. & COX, D. R. (1964). "An analysis of transformations." *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*: 211-252.

Bibliographie

- BOYER, P. (2008). "Assurer les calamités agricoles?" *Notes et études économiques du Ministère de l'Agriculture*, 30: 7-32.
- BREUSCH, T. S. & PAGAN, A. R. (1979). "A simple test for heteroscedasticity and random coefficient variation." *Econometrica: Journal of the Econometric Society*: 1287-1294.
- BRISSON, N., MARY, B., RIPOCHE, D., JEUFRROY, M. H., RUGET, F., NICOULLAUD, B., GATE, P., DEVIENNE-BARRET, F., ANTONIOLETTI, R. & DURR, C. (1998). "STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn." *Agronomie*, 18-(5-6): 311-346.
- BROWN, M. E., PINZON, J. E., DIDAN, K., MORISETTE, J. T. & TUCKER, C. J. (2006). "Evaluation of the consistency of long-term NDVI time series derived from AVHRR, SPOT-vegetation, SeaWiFS, MODIS, and Landsat ETM+ sensors." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44-(7): 1787-1793.
- BSAIBES, A., COURAULT, D., BARET, F., WEISS, M., OLIOSSO, A., JACOB, F., HAGOLLE, O., MARLOIE, O., BERTRAND, N., DESFOND, V., ET AL. (2009). "Albedo and LAI estimates from FORMOSAT-2 data for crop monitoring." *Remote Sensing of Environment*, 113-(4): 716-729.
- BURKE, M., DE JANVRY, A. & QUINTERO, J. (2010). *Providing indexbased agricultural insurance to smallholders: Recent progress and future promise*. Berkeley, CA, University of California, 38 p.
- CAI, W., YUAN, W., LIANG, S., LIU, S., DONG, W., CHEN, Y., LIU, D. & ZHANG, H. (2014). "Large Differences in Terrestrial Vegetation Production Derived from Satellite-Based Light Use Efficiency Models." *Remote Sensing*, 6-(9): 8945.
- CAMACHO, F. & CERNICHARO, J. (2011). *Geoland2. Validation Report Medium Resolution (MERIS) Vegetation Parameters*. Geoland2, EOLAB, 62 p.
- CAMACHO, F. & TORRALBA, I. (2010). *Geoland2. Validation Report High Resolution Vegetation Parameters*. . Geoland2, EOLAB, 65 p.
- CAO, M., PRINCE, D. S., SMALL, J. & GOETZ, J. S. (2004). "Remotely Sensed Interannual Variations and Trends in Terrestrial Net Primary Productivity 1981–2000." *Ecosystems*, 7-(3): 233-242.
- CAYROL, P., CHEHBOUNI, A., KERGOAT, L., DEDIEU, G., MORDELET, P. & NOUVELLON, Y. (2000). "Grassland modeling and monitoring with SPOT-4 VEGETATION instrument during the 1997-1999 SALSA experiment." *Agricultural and Forest Meteorology*, 105-(1-3): 91-115.
- CECCATO, P., BROWN, M., FUNK, C., SMALL, C., HOLTHAUS, E., SIEBERT, A. & WARD, N. (2008). "Remote Sensing Vegetation". In: *Index Insurance and Climate Risk: Prospects for Development and Disaster Management*. Hellmuth, M. E., Osgood, D. E., Hess, U., Moorhead, A. & Bhojwani, H. New York: Columbia University.
- CHANTARAT, S., MUDE, A. G., BARRETT, C. B. & CARTER, M. R. (2013). "Designing Index-Based Livestock Insurance for Managing Asset Risk in Northern Kenya." *Journal of Risk and Insurance*, 80-(1): 205-237.
- CHANTARAT, S., MUDE, A. G., BARRETT, C. B. & TURVEY, C. G. (2009). "The performance of index based livestock insurance: ex ante assessment in the presence of a poverty trap." 46.
- CHEN, F., WEBER, K. T., ANDERSON, J. & GOKHALE, B. (2010). "Comparison of MODIS fPAR Products with Landsat-5 TM-Derived fPAR over Semiarid Rangelands of Idaho." *GIScience & Remote Sensing*, 47-(3): 360-378.
- CHEN, F., WEBER, K. T. & GOKHALE, B. (2011). "Herbaceous Biomass Estimation from SPOT 5 Imagery in Semiarid Rangelands of Idaho." *GIScience & Remote Sensing*, 48-(2): 195-209.
- CHERWIN, K. & KNAPP, A. (2012). "Unexpected patterns of sensitivity to drought in three semi-arid grasslands." *Oecologia*, 169-(3): 845-852.
- CHETAILLE, A., DUFFAU, A., HORREARD, G., LAGANDRE, D., OGGIERI, B. & ROZENKOPF, I. (2011). "Gestion des risques agricoles par les petits producteurs: focus sur l'assurance récolte indicielle et

Bibliographie

- le warrantage." *document de travail, Agence Française de Développement, Département de la Recherche*-(113).
- COMMISSION, E. (2011). *Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on support for rural development by the European Agricultural Fund for Rural Development (EAFRD)* Brussels, 143 p.
- COOK, R. D. & WEISBERG, S. (1983). "Diagnostics for heteroscedasticity in regression." *Biometrika*, 70-(1): 1-10.
- COOPS, N. C., FERSTER, C. J., WARING, R. H. & NIGHTINGALE, J. (2009). "Comparison of three models for predicting gross primary production across and within forested ecoregions in the contiguous United States." *Remote Sensing of Environment*, 113-(3): 680-690.
- COQUIL, B. & BORDES, J. (2005). *FARMSTAR: an efficient decision support tool for near real time crop management from satellite images*. 5th European Conference on Precision Agriculture, Uppsala, Sweden, Wageningen Academic Publishers.
- CORDIER, J. & DEBAR, J. (2005). *Gestion des risques agricoles: la voie nord-américaine - Quels enseignements pour l'Union européenne ?* Paris, 69 p.
- CORDIER, J., ERHEL, A., PINDARD, A. & COURLEUX, F. (2008). "La gestion des risques en agriculture de la théorie à la mise en oeuvre: éléments de réflexion pour l'action publique." *Notes et études économiques*-(30): 33-71.
- COURAULT, D., HADRIA, R., RUGET, F., OLIOSSO, A., DUCHEMIN, B., HAGOLLE, O. & DEDIEU, G. (2010). "Combined use of FORMOSAT-2 images with a crop model for biomass and water monitoring of permanent grassland in Mediterranean region." *Hydrology and Earth System Sciences*, 14-(9): 1731-1744.
- CRAINE, J. M., NIPPERT, J. B., ELMORE, A. J., SKIBBE, A. M., HUTCHINSON, S. L. & BRUNSELL, N. A. (2012a). "Timing of climate variability and grassland productivity." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109-(9): 3401-3405.
- CRAINE, J. M., OCHELTREE, T. W., NIPPERT, J. B., TOWNE, E. G., SKIBBE, A. M., KEMBEL, S. W. & FARGIONE, J. E. (2012b). "Global diversity of drought tolerance and grassland climate-change resilience." *Nature Climate Change*, 3-(1): 63-67.
- CREDIT AGRICOLE (2013). "Satellite et assurance, un couple en orbite." *Crédit Agricole Magazine*, 119: 18-19.
- CROS, M. J., DURU, M., GARCIA, F. & MARTIN-CLOUAIRE, R. (2003). "A biophysical dairy farm model to evaluate rotational grazing management strategies." *Agronomie*, 23-(2): 105-122.
- DE LEEUW, J., VRIELING, A., SHEE, A., ATZBERGER, C., HADGU, K., BIRADAR, C., KEAH, H. & TURVEY, C. (2014). "The Potential and Uptake of Remote Sensing in Insurance: A Review." *Remote Sensing*, 6-(11): 10888-10912.
- DELÉCOLLE, R., MAAS, S. J., GUÉRIF, M. & BARET, F. (1992). "Remote sensing and crop production models: present trends." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 47-(2-3): 145-161.
- DÉQUÉ, M. (2007). "Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values." *Global and Planetary Change*, 57-(1-2): 16-26.
- DESARMENIEN, D., BENOIT, M. & DEVUN, J. (2013). *Evaluation de l'impact des conditions climatiques de 2011 sur l'élevage herbivore français*., Institut de l'Élevage.
- DI BELLA, C., FAIVRE, R., RUGET, F., SEGUIN, B., GUERIF, M., COMBAL, B., WEISS, A. & REBELLA, C. (2004). "Remote sensing capabilities to estimate pasture production in France." *International Journal of Remote Sensing*, 25-(23): 5359-5372.

Bibliographie

- DI BELLA, C. M., NEGRI, I. J., POSSE, G., JALMES, F. R., JOBBAGY, E. G., GARBULSKY, M. F. & DEREGIBUS, V. A. (2009). "Forage Production of the Argentine Pampa Region Based on Land Use and Long-Term Normalized Difference Vegetation Index Data." *Rangeland Ecology & Management*, 62-(2): 163-170.
- DIDAN, K. (2015). "MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006." Lien: <http://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.006>.
- DINKU, T., FUNK, C. & GRIMES, D. (2008). "The Potential of Satellite Rainfall Estimates for Index Insurance". In: *Index Insurance and Climate Risk: Prospects for Development and Disaster Management*. Hellmuth, M. E., Osgood, D. E., Hess, U., Moorhead, A. & Bhojwani, H. New York: Columbia University.
- DIOUF, A., BRANDT, M., VERGER, A., JARROUDI, M., DJABY, B., FENSHOLT, R., NDIONE, J. & TYCHON, B. (2015). "Fodder Biomass Monitoring in Sahelian Rangelands Using Phenological Metrics from FAPAR Time Series." *Remote Sensing*, 7-(7): 9122.
- DONET, I., RUGET, F., LE BAS, C. & RABAUD, V. (2000). *Guide d'utilisation d'ISOP*. Agreste, Chiffres et Données Agriculture. Montreuil sous-bois. 134, 55 p.
- DONET, I., RUGET, F., RABAUD, V., PERARNAUD, V., DELECOLLE, R. & BONNEVIALE, N. (1999). *ISOP : an integrated system to real-time assessment of forage production variability over France*. European Conference. Norrköping, 4 p.
- DORIGO, W. A., ZURITA-MILLA, R., DE WIT, A. J. W., BRAZILE, J., SINGH, R. & SCHAEPMAN, M. E. (2007). "A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9-(2): 165-193.
- DOUCHE, H., ROUDIER, P., HOUDRY, P. & BLONDLOT, A. (2008). *Farmstar: an operational remote sensing service for precision agriculture*. Proceedings of the 9th international conference on precision agriculture, Denver, USA: Colorado State University.
- DRUSCH, M., DEL BELLO, U., CARLIER, S., COLIN, O., FERNANDEZ, V., GASCON, F., HOERSCH, B., ISOLA, C., LABERINTI, P., MARTIMORT, P., ET AL. (2012). "Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services." *Remote Sensing of Environment*, 120: 25-36.
- DUAN, M., GAO, Q., WAN, Y., LI, Y., GUO, Y., GANZHU, Z., LIU, Y. & QIN, X. (2012). "Biomass estimation of alpine grasslands under different grazing intensities using spectral vegetation indices." *Canadian Journal of Remote Sensing*, 37-(4): 413-421.
- DUMONT, B., VANCUTSEM, F., SEUTIN, B., BODSON, B., DESTAIN, J.-P. & DESTAIN, M.-F. (2012). "Simulation de la croissance du blé à l'aide de modèles écophysiologicals: synthèse bibliographique des méthodes, potentialités et limitations." *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 16-(3): 382-392.
- DUNCAN, J. M. A., DASH, J. & ATKINSON, P. M. (2015). "The potential of satellite-observed crop phenology to enhance yield gap assessments in smallholder landscapes." *Frontiers in Environmental Science*, 3.
- DURAND, J.-L., ONILLON, B., SCHNYDER, H. & RADEMACHER, I. (1995). "Drought effects on cellular and spatial parameters of leaf growth in tall fescue." *Journal of Experimental Botany*, 46-(9): 1147-1155.
- DURAND, J. (2007). "Les effets du déficit hydrique sur la plante: aspects physiologiques." *Fourrages*, 190: 181-195.
- DURAND, J., LORGEOU, J., PICON-COCHARD, C. & VOLAIRE, F. (2013). *Ecophysiological de la réponse et de l'adaptation des plantes fourragères et prairiales au changement climatique*, Fourrages.

Bibliographie

- DURU, M., ADAM, M., CRUZ, P., MARTIN, G., ANSQUER, P., DUCOURTIEUX, C., JOUANY, C., THEAU, J. P. & VIEGAS, J. (2009). "Modelling above-ground herbage mass for a wide range of grassland community types." *Ecological Modelling*, 220-(2): 209-225.
- DURU, M., BALENT, G., GIBON, A., MAGDA, D., THEAU, J., CRUZ, P. & JOUANY, C. (1998). "Fonctionnement et dynamique des prairies permanentes. Exemple des Pyrénées centrales." *Fourrages*, 153: 97-113.
- DURU, M., CRUZ, P., MARTIN, G., THEAU, J. P., CHARRON, M. H., DESANGE, M., JOUANY, C. & ZEROUROU, A. (2010). "Herb'sim, a model for a rational management of grass production and grass utilization." *Fourrages*-(201): 37-46.
- DUSSEUX, P., HUBERT-MOY, L., CORPETTI, T. & VERTES, F. (2015). "Evaluation of SPOT imagery for the estimation of grassland biomass." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 38-(0): 72-77.
- DUVEILLER, G., BARET, F. & DEFOURNY, P. (2013). "Using thermal time and pixel purity for enhancing biophysical variable time series: An interproduct comparison." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51-(4): 2119-2127.
- ESTEVE, P. (1998). *Inversion du modèle de transfert radiatif DART*, Université Paul SABATIER Toulouse, 147 p.
- EUROPEAN SPATIAL AGENCY. (2014). "MERIS products overview." ESA Consulté le 13/10/2015, 2015, Lien: <https://earth.esa.int/handbooks/meris/CNTR2.html>.
- FAIDHERBE, L., HASNAOUI, N., DEBORDE, I., MORINEAU, J. & LUSSON, J.-M. (2007). "Pistes d'adaptations à la sécheresse des systèmes d'élevage bovin économes basés sur le pâturage." *Fourrages*, 191: 297-310.
- FAIVRE, R. & FISCHER, A. (1997). "Predicting Crop Reflectances Using Satellite Data Observing Mixed Pixels." *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, 2-(1): 87-107.
- FIELD, C. B., RANDERSON, J. T. & MALMSTRÖM, C. M. (1995). "Global net primary production: Combining ecology and remote sensing." *Remote Sensing of Environment*, 51-(1): 74-88.
- FINGER, R. & EL BENNI, N. (2014). "Alternative Specifications of Reference Income Levels in the Income Stabilization Tool". In: *Agricultural Cooperative Management and Policy*. Zopounidis, C., Kalogeras, N., Mattas, K., van Dijk, G. & Baourakis, G., Springer International Publishing: 65-85.
- FOUCHEROT, C. & BELLASSEN, V. (2014). *La gestion des risques climatiques dans le secteur agricole*, CDC Climat Recherche, 35 p.
- GAITAN, J. J., BRAN, D., OLIVA, G., CIARI, G., NAKAMATSU, V., SALOMONE, J., FERRANTE, D., BUONO, G., MASSARA, V., HUMANO, G., ET AL. (2013). "Evaluating the performance of multiple remote sensing indices to predict the spatial variability of ecosystem structure and functioning in Patagonian steppes." *Ecological Indicators*, 34: 181-191.
- GAO, F., MASEK, J., SCHWALLER, M. & HALL, F. (2006). "On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: predicting daily Landsat surface reflectance." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44-(8): 2207-2218.
- GAO, T., XU, B., YANG, X., JIN, Y., MA, H., LI, J. & YU, H. (2013). "Using MODIS time series data to estimate aboveground biomass and its spatio-temporal variation in Inner Mongolia's grassland between 2001 and 2011." *International Journal of Remote Sensing*, 34-(21): 7796-7810.
- GARRIGUES, S., ALLARD, D., BARET, F. & WEISS, M. (2006). "Influence of landscape spatial heterogeneity on the non-linear estimation of leaf area index from moderate spatial resolution remote sensing data." *Remote Sensing of Environment*, 105-(4): 286-298.
- GARRIGUES, S., LACAZE, R., BARET, F., MORISETTE, J. T., WEISS, M., NICKESON, J. E., FERNANDES, R., PLUMMER, S., SHABANOV, N. V., MYNENI, R. B., ET AL. (2008). "Validation and

Bibliographie

- intercomparison of global Leaf Area Index products derived from remote sensing data." *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113-(G2): G02028.
- GEERAERT, J.-M. (2012). *L'assurance récoltes : L'exemple de Pacifica*. Séances hebdomadaire de l'AAF, Paris.
- GILABERT, M. A., MORENO, A., MASELLI, F., MARTINEZ, B., CHIESI, M., SANCHEZ-RUIZ, S., GARCIA-HARO, F. J., PEREZ-HOYOS, A., CAMPOS-TABERNER, M., PEREZ-PRIEGO, O., *ET AL.* (2015). "Daily GPP estimates in Mediterranean ecosystems by combining remote sensing and meteorological data." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 102-(0): 184-197.
- GOMMES, R. & KAYITAKIRE, F. (2013). *The challenges of index-based insurance for food security in developing countries*, Ispra Varese, Italy, Publications Office of the European Union.
- GOSSE, G., VARLET-GRANCHER, C., BONHOMME, R., CHARTIER, M., ALLIRAND, J.-M. & LEMAIRE, G. (1986). "Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal." *Agronomie*, 6-(1): 47-56.
- GOWER, S. T., KUCHARIK, C. J. & NORMAN, J. M. (1999). "Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR, and net primary production of terrestrial ecosystems." *Remote Sensing of Environment*, 70-(1): 29-51.
- GRAUX, A.-I., BELLOCCHI, G., LARDY, R. & SOUSSANA, J.-F. (2013). "Ensemble modelling of climate change risks and opportunities for managed grasslands in France." *Agricultural and Forest Meteorology*, 170-(0): 114-131.
- GRIGERA, G., OESTERHELD, M. & PACÍN, F. (2007). "Monitoring forage production for farmers' decision making." *Agricultural Systems*, 94-(3): 637-648.
- GRIME, J. P., BROWN, V. K., THOMPSON, K., MASTERS, G. J., HILLIER, S. H., CLARKE, I. P., ASKEW, A. P., CORKER, D. & KIELTY, J. P. (2000). "The response of two contrasting limestone grasslands to simulated climate change." *Science*, 289-(5480): 762-765.
- GRUBER, A. & LEVIZZANI, V. (2008). *Assessment of global precipitation products*. WCRP-128, WMO Technical Document. 1430, 57 p.
- GU, Y., WYLIE, B. K., HOWARD, D. M., PHUYAL, K. P. & Ji, L. (2013). "NDVI saturation adjustment: A new approach for improving cropland performance estimates in the Greater Platte River Basin, USA." *Ecological Indicators*, 30: 1-6.
- HAGOLLE, O., HUC, M., DEDIEU, G., SYLVANDER, S., HOUPERT, L., LEROY, M., CLESSE, D. D., F., ARINO, O., KOETZ, B., PAGANINI, M., *ET AL.* (2013). *SPOT4 (Take5) Time Series over 45 Sites to Prepare Sentinel-2 - Applications and Methods*. ESA's Living Planet Symposium, Edinburgh, UK.
- HAZELL, P. R. & HESS, U. (2010). "Drought insurance for agricultural development and food security in dryland areas." *Food Security*, 2-(4): 395-405.
- Hellmuth, M. E., Osgood, D. E., Hess, U., Moorhead, A. & Bhojwani, H., Eds. (2009). *Index insurance and climate risk: Prospects for development and disaster management*. Climate and Society. Columbia University, New York, USA, International Research Institute for Climate and Society (IRI).
- HENTGEN, A. (1982). "Une méthode pour améliorer la connaissance de la production disponible des surfaces herbagères au niveau national." *Fourrages*-(92): 15-49.
- HERBOLD, J. (2013). "RS Technology for Crop Insurance " *Geospatial World*: 3.
- HOLBEN, B. N. (1986). "Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data." *International Journal of Remote Sensing*, 7-(11): 1417-1434.
- HUETE, A., DIDAN, K., MIURA, T., RODRIGUEZ, E. P., GAO, X. & FERREIRA, L. G. (2002). "Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices." *Remote Sensing of Environment*, 83-(1-2): 195-213.

Bibliographie

- HUETE, A., JUSTICE, C. & VAN LEEUWEN, W. (1999). *MODIS vegetation index (MOD13) algorithm theoretical basis document*. Greenbelt: NASA Goddard Space Flight Centre. Greenbelt: NASA Goddard Space Flight Center.
- HUYGHE, C. (2005). *Prairies et cultures fourragères en France: entre logiques de production et enjeux territoriaux*, 228 p.
- HUYGHE, C. & DELABY, L. (2013). *Prairies et systèmes fourragers: pâturage, ensilage, foin*, 529 p.
- ITIER, B. & SEGUIN, B. (2007). "La sécheresse: caractérisation et occurrence, en lien avec le climat et l'hydrologie." *Fourrages*, 190: 147-162.
- JACOB, F. & WEISS, M. (2014). "Mapping Biophysical Variables From Solar and Thermal Infrared Remote Sensing: Focus on Agricultural Landscapes With Spatial Heterogeneity." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 11-(10): 1844-1848.
- JACQUEMOUD, S. & BARET, F. (1990). "PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra." *Remote Sensing of Environment*, 34-(2): 75-91.
- JACQUEMOUD, S., VERHOEF, W., BARET, F., BACOUR, C., ZARCO-TEJADA, P. J., ASNER, G. P., FRANÇOIS, C. & USTIN, S. L. (2009). "PROSPECT+SAIL models: A review of use for vegetation characterization." *Remote Sensing of Environment*, 113, Supplement 1: S56-S66.
- JARQUE, C. M. & BERA, A. K. (1980). "Efficient tests for normality, homoscedasticity and serial independence of regression residuals." *Economics letters*, 6-(3): 255-259.
- JENSEN, M. E. & HAISE, H. R. (1963). "Estimating evapotranspiration from solar radiation." *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 89: 15-41.
- Ji, L. & PETERS, A. J. (2005). "Lag and seasonality considerations in evaluating AVHRR NDVI response to precipitation." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71-(9): 1053-1061.
- JIN, Y., YANG, X., QIU, J., LI, J., GAO, T., WU, Q., ZHAO, F., MA, H., YU, H. & XU, B. (2014). "Remote sensing-based biomass estimation and its spatio-temporal variations in temperate grassland, Northern China." *Remote Sensing*, 6-(2): 1496-1513.
- JOUVEN, M., CARRÈRE, P. & BAUMONT, R. (2006). "Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage in managed permanent pastures. 1. Model description." *Grass and Forage Science*, 61-(2): 112-124.
- JUNG, M., VERSTRAETE, M., GOBRON, N., REICHSTEIN, M., PAPALE, D., BONDEAU, A., ROBUSTELLI, M. & PINTY, B. (2008). "Diagnostic assessment of European gross primary production." *Global Change Biology*, 14-(10): 2349-2364.
- JUSTICE, C., BELWARD, A., MORISSETTE, J., LEWIS, P., PRIVETTE, J. & BARET, F. (2000). "Developments in the 'validation' of satellite sensor products for the study of the land surface." *International Journal of Remote Sensing*, 21-(17): 3383-3390.
- JUSTICE, C., STARR, D., WICKLAND, D., PRIVETTE, J. & SUTTLES, T. (1998a). "EOS land validation coordination: an update." *Earth Observer*, 10-(3): 55-60.
- JUSTICE, C. O., VERMOTE, E., TOWNSHEND, J. R. G., DEFRIES, R., ROY, D. P., HALL, D. K., SALOMONSON, V. V., PRIVETTE, J. L., RIGGS, G., STRAHLER, A., ET AL. (1998b). "The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36-(4): 1228-1249.
- KELLNER, U. & MUSSHOF, O. (2011). "Precipitation or water capacity indices? An analysis of the benefits of alternative underlyings for index insurance." *Agricultural Systems*, 104-(8): 645-653.
- KERNEÏS, E., CHEVALLIER, C. & PONS, Y. (2007). "Production prairiale, gestion de l'eau et conflits d'usage dans les marais de l'ouest de la France : l'été est-il une période clé ?" *Fourrages*, 191-(191): 13.

Bibliographie

- KNAPP, A. K., FAY, P. A., BLAIR, J. M., COLLINS, S. L., SMITH, M. D., CARLISLE, J. D., HARPER, C. W., DANNER, B. T., LETT, M. S. & MCCARRON, J. K. (2002). "Rainfall Variability, Carbon Cycling, and Plant Species Diversity in a Mesic Grassland." *Science*, 298-(5601): 2202-2205.
- KNEIZYS, F. X., SHETTLE, E. P., GALLERY, W. O., ABREU, L. W., SELBY, J. E. A., CHETWYND, J. H. & CLOUGH, S. A. (1988). *Users Guide to Lowtran 7*, Air Force Geophysics Laboratory.
- KOETZ, B., BARET, F., POILVÉ, H. & HILL, J. (2005). "Use of coupled canopy structure dynamic and radiative transfer models to estimate biophysical canopy characteristics." *Remote Sensing of Environment*, 95-(1): 115-124.
- KREYLING, J., THIEL, D., SIMMNACHER, K., WILLNER, E., JENTSCH, A. & BEIERKUHNLEIN, C. (2012). "Geographic origin and past climatic experience influence the response to late spring frost in four common grass species in central Europe." *Ecography*, 35-(3): 268-275.
- LAFONT, S., KERGOAT, L., DEDIEU, G., CHEVILLARD, A., KARSTENS, U. T. E. & KOLLE, O. (2002). "Spatial and temporal variability of land CO₂ fluxes estimated with remote sensing and analysis data over western Eurasia." *Tellus B*, 54-(5): 820-833.
- LAND PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER (2010). *MODIS Swath Reprojection Tool (MRT Swath) 2.2*, 49 p.
- LAUNAY, M. & GUERIF, M. (2005). "Assimilating remote sensing data into a crop model to improve predictive performance for spatial applications." *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 111-(1-4): 321-339.
- LE GALL, A., DELATTRE, J. & CABON, G. (1998). "Les céréales immatures et la paille: une assurance pour les systèmes fourragers." *Fourrages*, 156: 557-572.
- LEMAIRE, G. (2008). "Sécheresse et production fourragère." *Innovations Agronomiques*, 2: 107-123.
- LEMAIRE, G., MICOL, D., DELABY, L., FIORELLI, J., DURU, M. & RUGET, F. (2006). "ESCo - Sécheresse et agriculture" - *Sensibilité à la sécheresse des systèmes fourragers et de l'élevage des herbivores* Sécheresse et agriculture: réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Rapport de l'expertise scientifique collective réalisée par l'Inra à la demande du ministère de l'Agriculture et de la Pêche, INRA. Chapitre 1.1.4, 88-108 p.
- LOEHLIN, J. C. (2004). *Latent variable models: An introduction to factor, path, and structural equation analysis*, Psychology Press.
- LONGEOU, J., BATTEGAY, S. & PELLETIER, P. (2007). "Adaptations à la sécheresse par les choix techniques de conduite des cultures pour les prairies et le maïs." *Fourrages*, 190: 207-221.
- LU, D. (2006). "The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation." *International Journal of Remote Sensing*, 27-(7): 1297-1328.
- MA, W., LIU, Z., WANG, Z., WANG, W., LIANG, C., TANG, Y., HE, J. S. & FANG, J. (2010). "Climate change alters interannual variation of grassland aboveground productivity: evidence from a 22-year measurement series in the Inner Mongolian grassland." *Journal of plant research*, 123-(4): 509-517.
- MAHUL, O. & SKEES, J. R. (2007). "Managing agricultural risk at the country level: The case of index-based livestock insurance in Mongolia." *World Bank Policy Research Working Paper*-(4325): 37.
- MAHUL, O. & STUTLEY, C. J. (2010). *Government support to agricultural insurance: challenges and options for developing countries*. Washington, DC, World Bank Publications, 250 p.
- MAKAUDZE, E. M. & MIRANDA, M. J. (2010). "Catastrophic drought insurance based on the remotely sensed normalised difference vegetation index for smallholder farmers in Zimbabwe." *Agrekon*, 49-(4): 418-432.
- MARTINEZ, B., GARCIA-HARO, F. J. & CAMACHO-DE COCA, F. (2009). "Derivation of high-resolution leaf area index maps in support of validation activities: Application to the cropland Barrax site." *Agricultural and Forest Meteorology*, 149-(1): 130-145.

Bibliographie

- MASELLI, F., ARGENTI, G., CHIESI, M., ANGELI, L. & PAPALE, D. (2013). "Simulation of grassland productivity by the combination of ground and satellite data." *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 165-(0): 163-172.
- MASELLI, F., PAPALE, D., PULETTI, N., CHIRICI, G. & CORONA, P. (2009). "Combining remote sensing and ancillary data to monitor the gross productivity of water-limited forest ecosystems." *Remote Sensing of Environment*, 113-(3): 657-667.
- MCCALLUM, I., WAGNER, W., SCHMULLIUS, C., SHVIDENKO, A., OBERSTEINER, M., FRITZ, S. & NILSSON, S. (2009). "Satellite-based terrestrial production efficiency modeling." *Carbon Balance and Management*, 4-(1): 8.
- MENG, Q., COOKE, W. H. & RODGERS, J. (2013). "Derivation of 16-day time-series NDVI data for environmental studies using a data assimilation approach." *GIScience & Remote Sensing*, 50-(5): 500-514.
- MERONI, M., ATZBERGER, C., VANCUTSEM, C., GOBRON, N., BARET, F., LACAZE, R., EERENS, H. & LEO, O. (2013a). "Evaluation of Agreement Between Space Remote Sensing SPOT-VEGETATION fAPAR Time Series." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51-(4): 1951-1962.
- MERONI, M., MARINHO, E., SGHAIER, N., VERSTRATE, M. & LEO, O. (2013b). "Remote Sensing Based Yield Estimation in a Stochastic Framework — Case Study of Durum Wheat in Tunisia." *Remote Sensing*, 5-(2): 539-557.
- MERONI, M., REMBOLD, F., VERSTRAETE, M. M., GOMMES, R., SCHUCKNECHT, A. & BEYE, G. (2014a). "Investigating the Relationship between the Inter-Annual Variability of Satellite-Derived Vegetation Phenology and a Proxy of Biomass Production in the Sahel." *Remote Sensing*, 6-(6): 5868-5884.
- MERONI, M., VERSTRAETE, M. M., REMBOLD, F., URBANO, F. & KAYITAKIRE, F. (2014b). "A phenology-based method to derive biomass production anomalies for food security monitoring in the Horn of Africa." *International Journal of Remote Sensing*, 35-(7): 2472-2492.
- MICHAUD, A., PLANTUREUX, S., POTTIER, E. & BAUMONT, R. (2015). "Links between functional composition, biomass production and forage quality in permanent grasslands over a broad gradient of conditions." *Journal of Agricultural Science*, 153-(5): 891-906.
- MINISTERE DE L'AGRICULTURE, D. L. A. E. D. L. F. (2013). "La gestion des risques climatiques en agriculture." *Consulté le 04/06/2015, Lien: <http://agriculture.gouv.fr/risques-agriculture>*.
- MINISTERE DE L'ÉCOLOGIE, D. D. D. E. D. L. É. (2015). "Observations et Statistique - Base de données Corine Land Cover " *Consulté le 13/10/2015, 2015, Lien: <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-ligne/li/1825.html>*.
- MIURA, T., HUETE, A. & YOSHIOKA, H. (2006). "An empirical investigation of cross-sensor relationships of NDVI and red/near-infrared reflectance using EO-1 Hyperion data." *Remote Sensing of Environment*, 100-(2): 223-236.
- MONTEITH, J. (1965). *Evaporation and the environment*. XIXth Symposia of the Society for Experimental Biology, University Press, Swansea, Cambridge.
- MONTEITH, J. L. (1972). "Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems." *Journal of Applied Ecology*, 9-(3): 747-766.
- MONTEITH, J. L. & MOSS, C. J. (1977). "Climate and the Efficiency of Crop Production in Britain [and Discussion]." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 281-(980): 277-294.
- MOREAU, J. & LORGEOU, J. (2007). "Premiers éléments de perspectives sur les conséquences des changements climatiques." 191: 285-295.
- MORGENSTERN, O. & VON NEUMANN, J. (1944). "Theory of games and economic behavior."

Bibliographie

- MORISSETTE, J. T., BARET, F., PRIVETTE, J. L., MYNENI, R. B., NICKESON, J. E., GARRIGUES, S., SHABANOV, N. V., WEISS, M., FERNANDES, R. A., LEBLANC, S. G., *ET AL.* (2006). "Validation of global moderate-resolution LAI products: a framework proposed within the CEOS land product validation subgroup." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44-(7): 1804-1817.
- MOSNIER, C. (2015). "Self-insurance and multi-peril grassland crop insurance: the case of French suckler cow farms." *Agricultural Finance Review*, 75-(4): 533-551.
- MOSNIER, C., AGABRIEL, J., LHERM, M. & REYNAUD, A. (2008). *Assessing economic and technical impacts of non expected weather events on french suckler cow farms dynamics : A dynamic recursive farm model*. 12° Congress of the European Association of Agricultural Economists (EAAE). Ghent, 13 p.
- MOSNIER, C., FOURDIN, S., MOREAU, J.-C., BOUTRY, A., LE FLOCH, E., LHERM, M. & DEVUN, J. (2014). *Impacts des aléas climatiques en élevages bovin et ovin allaitants et demande de couverture assurantielle*. Notes et études socio-économiques, Centre d'études et de prospective. 38, 26 p.
- MOULE, C. & BUSTARRET, J. (1971). *Fourrages*, La maison rustique, 84 p.
- MU, Q., HEINSCH, F. A., ZHAO, M. & RUNNING, S. W. (2007). "Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data." *Remote Sensing of Environment*, 111-(4): 519-536.
- MU, Q., ZHAO, M., KIMBALL, J. S., MCDOWELL, N. G. & RUNNING, S. W. (2013a). "A remotely sensed global terrestrial drought severity index." *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94-(1): 83-98.
- MU, Q., ZHAO, M. & RUNNING, S. W. (2013b). "MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (MOD16A2/A3) - Algorithm Theoretical Basis Document." 5. Lien: http://www.ntsg.umd.edu/sites/ntsg.umd.edu/files/MOD16_ATBD.pdf.
- MULLER, B., SALL, M., LEBLOIS, A., BALDE, A., FALL, M., KOUAKOU, P. & AFFHOLDER, F. (2013). "L'assurance agricole indicielle en Afrique de l'Ouest: principes, premières réalisations et perspectives." *Agronomie Africaine*-(6): 95-111.
- NASA. "MODIS Specifications." *Consulté le 13/10/2015, Lien:* <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>.
- NOURY, J.-M., FOURDIN, S. & PAUTHENET, Y. (2013). "Livestock farming systems and climate change: perception of farmers and adaptation strategies." *Fourrages*-(215): 211-219.
- NOUVELLON, Y., MORAN, M. S., SEEN, D. L., BRYANT, R., RAMBAL, S., NI, W., BEGUE, A., CHEHBOUNI, A., EMMERICH, W. E., HEILMAN, P., *ET AL.* (2001). "Coupling a grassland ecosystem model with Landsat imagery for a 10-year simulation of carbon and water budgets." *Remote Sensing of Environment*, 78-(1-2): 131-149.
- OSGOOD, D. E., MCLAURIN, M., CARRIQUIRY, M., MISHRA, A., FIONDELLA, F., HANSEN, J. W., PETERSON, N. & WARD, M. N. (2007). *Designing Weather Insurance Contracts for Farmers in Malawi, Tanzania and Kenya*. Final Report to the Commodity Risk Management Group, A., World Bank. Columbia University, New York, USA., International Research Institute for Climate and Society (IRI), 100 p.
- PARSONS, A. (1988). "The effects of season and management on the growth of grass swards". In: *The grass crop*, Springer: 129-177.
- PARUELO, J. M., EPSTEIN, H. E., LAUENROTH, W. K. & BURKE, I. C. (1997). "ANPP estimates from NDVI for the Central Grassland Region of the United States." *Ecology*, 78-(3): 953-958.
- PENNINGS, J. M. E., ISENGILDINA-MASSA, O., IRWIN, S. H., GARCIA, P. & GOOD, D. L. (2008). "Producers' complex risk management choices." *Agribusiness*, 24-(1): 31-54.

Bibliographie

- PERVANÇON, F., BOCKSTALLER, C., AMIAUD, B., PEIGNÉ, J., BERNARD, P.-Y., VERTÈS, F., FIORELLI, J.-L. & PLANTUREUX, S. (2005). "A novel indicator of environmental risks due to nitrogen management on grasslands." *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 105-(1-2): 1-16.
- PETTORELLI, N., VIK, J. O., MYSTERUD, A., GAILLARD, J.-M., TUCKER, C. J. & STENSETH, N. C. (2005). "Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change." *Trends in Ecology & Evolution*, 20-(9): 503-510.
- PFLIMLIN, A. (1997). *Sécheresse: gérer les risques. Méthodes et exemples de scénarios d'adaptation par grandes zones d'élevage*, Dossier spécial, Institut de l'Élevage, 113 p.
- PHILLIPS, R., WEST, M., SALIENDRA, N., RUNDQUIST, B. & POOL, D. (2013). "Prediction of senescent rangeland canopy structural attributes with airborne hyperspectral imagery." *GIScience & Remote Sensing*, 50-(2): 133-153.
- PIGEON, G., SOUBEYROUX, J. & DEQUE, M. (2013). "Observations et projections climatiques à l'échelle de la France: l'exemple de la ressource en eau." *Fourrages*, 214: 91-97.
- PIÑEIRO, G., OESTERHELD, M. & PARUELO, J. (2006). "Seasonal Variation in Aboveground Production and Radiation-use Efficiency of Temperate rangelands Estimated through Remote Sensing." *Ecosystems*, 9-(3): 357-373.
- POILVÉ, H. (2010a). *Towards an Operational GMES Land Monitoring Core Service - BioPar Methods Compendium - MERIS FR Biophysical*, Geoland2, 45 p.
- POILVÉ, H. (2010b). *Towards an Operational GMES Land Monitoring Core Service - BioPar Product User Manual - MERIS FR Biophysical Products*, Geoland2, 50 p.
- POLLEY, H. W., PHILLIPS, R. L., FRANK, A. B., BRADFORD, J. A., SIMS, P. L., MORGAN, J. A. & KINIRY, J. R. (2011). "Variability in Light-Use Efficiency for Gross Primary Productivity on Great Plains Grasslands." *Ecosystems*, 14-(1): 15-27.
- POTTER, C. (2014). "Regional analysis of MODIS satellite greenness trends for ecosystems of interior Alaska." *GIScience & Remote Sensing*, 51-(4): 390-402.
- POTTER, C. S., RANDERSON, J. T., FIELD, C. B., MATSON, P. A., VITOUSEK, P. M., MOONEY, H. A. & KLOOSTER, S. A. (1993). "Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data." *Global Biogeochemical Cycles*, 7-(4).
- POTTIER, E., DELABY, L. & AGABRIEL, J. (2007). "Adaptations de la conduite des troupeaux bovins et ovins aux risques de sécheresse." *Fourrages*, 191: 267-284.
- POTTIER, E., MICHAUD, A., FARRIE, J., PLANTUREUX, S. & BAUMONT, R. (2012). "Les prairies permanentes françaises au cœur d'enjeux agricoles et environnementaux." *Innovations Agronomiques*, 25.
- PROPASTIN, P. (2013). "Large-scale mapping of aboveground biomass of tropical rainforest in Sulawesi, Indonesia, using Landsat ETM+ and MODIS data." *GIScience & Remote Sensing*, 50-(6): 633-651.
- PROTIN, P., CORRE-HELLOU, G., NAUDIN, C. & TROCHARD, R. (2009). "Impact des pratiques de fertilisation sur la productivité des prairies et mélanges céréales-protéagineux et la qualité du fourrage." *Fourrages*, 198: 115-130.
- PUYDARRIEUX, P. & DEVAUX, J. (2013). *Quelle évaluation économique pour les services écosystémiques rendus par les prairies en France métropolitaine?* Notes et études socio-économiques, Centre d'études et de prospective. 37, 51-86 p.
- QUINTANA-SEGUI, P., LE MOIGNE, P., DURAND, Y., MARTIN, E., HABETS, F., BAILLON, M., CANELLAS, C., FRANCHISTEGUY, L. & MOREL, S. (2008). "Analysis of near-surface atmospheric variables: Validation of the SAFRAN analysis over France." *Journal of applied meteorology and climatology*, 47-(1): 92-107.

- RAO, K. N. (2010). "Index based Crop Insurance." *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 1: 193-203.
- REMBOLD, F., ATZBERGER, C., SAVIN, I. & ROJAS, O. (2013). "Using Low Resolution Satellite Imagery for Yield Prediction and Yield Anomaly Detection." *Remote Sensing*, 5-(4): 1704-1733.
- RICHARDSON, A. D., KEENAN, T. F., MIGLIAVACCA, M., RYU, Y., SONNENTAG, O. & TOOMEY, M. (2013). "Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system." *Agricultural and Forest Meteorology*, 169: 156-173.
- RISK MANAGEMENT AGENCY (2013). *Rainfall and Vegetation Index Insurance Standards Handbook*. Kansas City, MO, RMA, 53 p.
- RODRIGUEZ, J. D., PEREZ, A. & LOZANO, J. A. (2010). "Sensitivity Analysis of k-Fold Cross Validation in Prediction Error Estimation." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32-(3): 569-575.
- ROSEMA, A., VAN HUYSTEE, J., FOPPES, S., VAN DER WOERD, J., KLAASSEN, E., BARENDSE, J., VAN ASSELDONK, M., DUBREUIL, M., RÉGENT, S., WEBER, S., ET AL. (2010). *FESA Micro-Insurance: Methodology, validation, contract design*. Delft, The Netherlands, Scientific Final Report of Millennium Agreements Project no° 38. Commissioned by the Netherlands Ministry of Foreign Affairs, 96 p.
- ROSEMA, A., VAN HUYSTEE, J., FOPPES, S., VAN DER WOERD, J., KLAASSEN, E., BARENDSE, J., VAN ASSELDONK, M., DUBREUIL, M., RÉGENT, S., WEBER, S., ET AL. (2014). *FESA Micro-Insurance: Crop insurance reaching every farmer in Africa*. Delft, The Netherlands, Scientific Final Report of Millennium Agreements Project no. 38. Commissioned by the Netherlands Ministry of Foreign Affairs, 122 p.
- ROSSINI, M., MIGLIAVACCA, M., GALVAGNO, M., MERONI, M., COGLIATI, S., CREMONESE, E., FAVA, F., GITELSON, A., JULITTA, T., MORRA DI CELLA, U., ET AL. (2014). "Remote estimation of grassland gross primary production during extreme meteorological seasons." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 29: 1-10.
- ROTH, J. & MCCORD, M. J. (2008). "Agricultural microinsurance: global practices and prospects." *Microinsurance Centre*: 50.
- ROUMIGUIE, A., JACQUIN, A., SIGEL, G., POILVE, H., HAGOLLE, O. & DAYDE, J. (2015a). "Validation of a Forage Production Index (FPI) Derived from MODIS fCover Time-Series Using High-Resolution Satellite Imagery: Methodology, Results and Opportunities." *Remote Sensing*, 7-(9): 11525.
- ROUMIGUIE, A., JACQUIN, A., SIGEL, G., POILVE, H., LEPOIVRE, B. & HAGOLLE, O. (2015b). "Development of an index-based insurance product: validation of a forage production index derived from medium spatial resolution fCover time series." *GIScience & Remote Sensing*, 52-(1): 94-113.
- ROUMIGUIE, A., SIGEL, G., POILVE, H., BOUCHARD, B., VRIELING, A. & JACQUIN, A. (accepté). "Insuring forage through satellites: testing alternative indices against grassland production estimates for France." *International Journal of Remote Sensing*.
- ROUSE, J. W., HAAS, R. H., SCHELL, J. A. & DEERING, D. W. (1974). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, United States.
- ROWLEY, R. J., PRICE, K. P. & KASTENS, J. H. (2007). "Remote Sensing and the Rancher: Linking Rancher Perception and Remote Sensing." *Rangeland Ecology & Management*, 60-(4): 359-368.
- ROY, D., KOVALSKYY, V., ZHANG, H., YAN, L. & KOMMAREDDY, I. (2015). "The Utility of Landsat Data for Global Long Term Terrestrial Monitoring". In: *Remote Sensing Time Series*. Kuenzer, C., Dech, S. & Wagner, W., Springer International Publishing. 22: 289-305.

Bibliographie

- ROYSTON, P. (1992). "Approximating the Shapiro-Wilk W-Test for non-normality." *Statistics and Computing*, 2-(3): 117-119.
- RUGET, F., DELECOLLE, R., LE BAS, C., DURU, M., BONNEVIALE, N., RABAUD, V., DONET, I., PERARNAUD, V. & PANIAGUA, S. (2001). *L'estimation régionale des productions fourragères. Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision*. Montpellier, Cirad-Inra, 263-282 p.
- RUGET, F., NOVAK, S. & GRANGER, S. (2006). "Du modèle Stics au système Isop pour estimer la production fourragère. Adaptation à la prairie, application spatialisée." *Fourrages*, 186: 241-256.
- RUGET, F., SATGER, S., VOLAIRE, F. & LELIEVRE, F. (2009). "Modeling tiller density, growth, and yield of Mediterranean perennial grasslands with STICS." *Crop Science*, 49-(6): 2379-2385.
- RUNNING, S., BALDOCCHI, D., TURNER, D., GOWER, S., BAKWIN, P. & HIBBARD, K. (1999). "A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data." *Remote Sensing of Environment*, 70-(1): 108-127.
- RUNNING, S. W., NEMANI, R. R., HEINSCH, F. A., ZHAO, M. S., REEVES, M. & HASHIMOTO, H. (2004). "A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production." *Bioscience*, 54-(6): 547-560.
- SANDMARK, T., DEBAR, J.-C. & TATIN-JALERAN, C. (2013). *The Emergence and Development of Agriculture Microinsurance*, Discussion Paper, Luxembourg: Microinsurance Network, 86 p.
- SASAI, T., ICHII, K., YAMAGUCHI, Y. & NEMANI, R. (2005). "Simulating terrestrial carbon fluxes using the new biosphere model "biosphere model integrating eco-physiological and mechanistic approaches using satellite data" (BEAMS)." *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 110-(G2).
- SAUTIER, M. (2013). *Outiller l'adaptation des élevages herbagers au changement climatique: de l'analyse de la vulnérabilité à la conception participative de systèmes d'élevage*, INP Toulouse. Toulouse, France, 256 p.
- SEAQUIST, J. W., OLSSON, L. & ARDÖ, J. (2003). "A remote sensing-based primary production model for grassland biomes." *Ecological Modelling*, 169-(1): 131-155.
- SENI, G. & ELDER, J. F. (2010). "Ensemble Methods in Data Mining: Improving Accuracy Through Combining Predictions." *Synthesis Lectures on Data Mining and Knowledge Discovery*, 2-(1): 1-126.
- SKEES, J. R., BLACK, J. R. & BARNETT, B. J. (1997). "Designing and rating an area yield crop insurance contract." *American journal of agricultural economics*, 79-(2): 430-438.
- SMITH, M. D. (2011). "An ecological perspective on extreme climatic events: a synthetic definition and framework to guide future research." *Journal of Ecology*, 99-(3): 656-663.
- SON, N.-T., CHEN, C.-F., CHEN, C.-R., DUC, H.-N. & CHANG, L.-Y. (2013). "A Phenology-Based Classification of Time-Series MODIS Data for Rice Crop Monitoring in Mekong Delta, Vietnam." *Remote Sensing*, 6-(1): 135.
- STAMPFLI, A. & ZEITER, M. (2004). "Plant regeneration directs changes in grassland composition after extreme drought: a 13-year study in southern Switzerland." *Journal of Ecology*, 92-(4): 568-576.
- STATISTIQUE AGRICOLE ANNUELLE AGRESTE (2015a). *2013 - 2014 provisoire - Cultures fourragères*.
- STATISTIQUE AGRICOLE ANNUELLE AGRESTE (2015b). *2013 - 2014 provisoire - Répartition du territoire*.
- STÖCKLE, C. O., DONATELLI, M. & NELSON, R. (2003). "CropSyst, a cropping systems simulation model." *European Journal of Agronomy*, 18-(3-4): 289-307.
- SUTTIE, J. M., REYNOLDS, S. G. & BATELLO, C. (2005). *Grasslands of the World*. Rome, Italia, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 514 p.

Bibliographie

- SWAIN, S., WARDLOW, B. D., NARUMALANI, S., TADESSE, T. & CALLAHAN, K. (2011). "Assessment of Vegetation Response to Drought in Nebraska Using Terra-MODIS Land Surface Temperature and Normalized Difference Vegetation Index." *GIScience & Remote Sensing*, 48-(3): 432-455.
- TAIB, C. M. I. C. & BENTH, F. E. (2012). "Pricing of temperature index insurance." *Review of Development Finance*, 2-(1): 22-31.
- TAN, B., WOODCOCK, C. E., HU, J., ZHANG, P., OZDOGAN, M., HUANG, D., YANG, W., KNYAZIKHIN, Y. & MYNENI, R. B. (2006). "The impact of gridding artifacts on the local spatial properties of MODIS data: Implications for validation, compositing, and band-to-band registration across resolutions." *Remote Sensing of Environment*, 105-(2): 98-114.
- TARDIEU, F., CRUIZIAT, P., DURAND, J., TRIBOI, E. & ZIVY, M. (2006). *Perception de la sécheresse par la plante. Conséquences sur la productivité et sur la qualité des produits récoltés*. ESCo "Sécheresse et Agriculture" Chapitre 1.1, 19 p.
- TIAN, Y. H., WOODCOCK, C. E., WANG, Y. J., PRIVETTE, J. L., SHABANOV, N. V., ZHOU, L. M., ZHANG, Y., BUERMANN, W., DONG, J. R., VEIKKANEN, B., ET AL. (2002a). "Multiscale analysis and validation of the MODIS LAI product - I. Uncertainty assessment." *Remote Sensing of Environment*, 83-(3): 414-430.
- TIAN, Y. H., WOODCOCK, C. E., WANG, Y. J., PRIVETTE, J. L., SHABANOVA, N. V., ZHOU, L. M., ZHANG, Y., BUERMANN, W., DONG, J. R., VEIKKANEN, B., ET AL. (2002b). "Multiscale analysis and validation of the MODIS LAI product - II. Sampling strategy." *Remote Sensing of Environment*, 83-(3): 431-441.
- TRISHCHENKO, A. P., CIHLAR, J. & LI, Z. (2002). "Effects of spectral response function on surface reflectance and NDVI measured with moderate resolution satellite sensors." *Remote Sensing of Environment*, 81-(1): 1-18.
- TURVEY, C. G. & MCLAURIN, M. K. (2012). "Applicability of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in Index-Based Crop Insurance Design." *Weather, Climate, and Society*, 4-(4): 271-284.
- UNION EUROPEENNE (2013). *Règlement (UE) n° 1305/2013 du Parlement européen et du Conseil du 17/12/2013. Relatif au soutien au développement rural par le Fonds européen agricole pour le développement rural (Feader) et abrogeant le règlement (CE) n° 1698/2005 du Conseil*. Articles 36 - 37 - 38, Journal officiel de l'Union européenne, 487-548 p.
- VALLS, M., SAPIN, M. & ECKERT, C. (2015). *Projet de loi de Finances rectificative pour 2015 - Rapport sur l'évolution de la situation économique et budgétaire et exposé général des motifs*. N°3217. République Française. Paris, 226 p.
- VAN LEEUWEN, W. J. D., ORR, B. J., MARSH, S. E. & HERRMANN, S. M. (2006). "Multi-sensor NDVI data continuity: Uncertainties and implications for vegetation monitoring applications." *Remote Sensing of Environment*, 100-(1): 67-81.
- VELANDIA, M., REJESUS, R. M., KNIGHT, T. O. & SHERRICK, B. J. (2009). "Factors affecting farmers' utilization of agricultural risk management tools: the case of crop insurance, forward contracting, and spreading sales." *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 41-(1): 107-123.
- VERHOEF, W. (1984). "Light-scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling - The SAIL model." *Remote Sensing of Environment*, 16-(2): 125-141.
- VEROUSTRAETE, F., SABBE, H. & EERENS, H. (2002). "Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-Fix model and Euroflux data." *Remote Sensing of Environment*, 83-(3): 376-399.
- VEYSSET, P., BEBIN, D. & LHERM, M. (2007). "Impacts de la sécheresse 2003 sur les résultats technico-économiques en élevage bovin allaitant charolais." *Fourrages*, 191: 311-322.
- VIDAL, J.-P., MARTIN, E., FRANCHISTEGUY, L., BAILLON, M. & SOUBEYROUX, J.-M. (2010). "A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system." *International Journal of Climatology*, 30-(11): 1627-1644.

Bibliographie

- VRIELING, A., MERONI, M., MUDE, A. G., CHANTARAT, S., UMMENHOFER, C. C. & DE BIE, K. (2016). "Early assessment of seasonal forage availability for mitigating the impact of drought on East African pastoralists." *Remote Sensing of Environment*, 174: 44-55.
- VRIELING, A., MERONI, M., SHEE, A., MUDE, A. G., WOODARD, J., DE BIE, C. A. J. M. & REMBOLD, F. (2014). "Historical extension of operational NDVI products for livestock insurance in Kenya." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 28-(0): 238-251.
- WANG, J., RICH, P. & PRICE, K. (2003). "Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA." *International Journal of Remote Sensing*, 24-(11): 2345-2364.
- WANG, Q., ADIKU, S., TENHUNEN, J. & GRANIER, A. (2005). "On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site." *Remote Sensing of Environment*, 94-(2): 244-255.
- WEISS, M., BARET, F., BLOCK, T., KOETZ, B., BURINI, A., SCHOLZE, B., LECHARPENTIER, P., BROCKMANN, C., FERNANDES, R., PLUMMER, S., ET AL. (2014). "On Line Validation Exercise (OLIVE): A Web Based Service for the Validation of Medium Resolution Land Products. Application to FAPAR Products." *Remote Sensing*, 6-(5): 4190-4216.
- WEISS, M., BARET, F., GARRIGUES, S. & LACAZE, R. (2007). "LAI and fAPAR CYCLOPES global products derived from VEGETATION. Part 2: validation and comparison with MODIS collection 4 products." *Remote Sensing of Environment*, 110-(3): 317-331.
- WHITE, T. A., CAMPBELL, B. D., KEMP, P. D. & HUNT, C. L. (2000). "Sensitivity of three grassland communities to simulated extreme temperature and rainfall events." *Global Change Biology*, 6-(6): 671-684.
- WORLD BANK (2012). *Argentina - NDVI Pasture Index-Based Insurance for livestock producers in south west Buenos Aires province. Feasibility study*. Washington, DC, The World Bank. Final Report, 120 p.
- WU, H. & LI, Z. L. (2009). "Scale Issues in Remote Sensing: A Review on Analysis, Processing and Modeling." *Sensors*, 9-(3): 1768-1793.
- WU, M., ZHANG, X., HUANG, W., NIU, Z., WANG, C., LI, W. & HAO, P. (2015). "Reconstruction of Daily 30 m Data from HJ CCD, GF-1 WFV, Landsat, and MODIS Data for Crop Monitoring." *Remote Sensing*, 7-(12): 15826.
- XU, B., YANG, X., TAO, W., QIN, Z., LIU, H. & MIAO, J. (2007). "Remote sensing monitoring upon the grass production in China." *Acta Ecologica Sinica*, 27-(2): 405-413.
- YANG, Y., FANG, J., MA, W. & WANG, W. (2008). "Relationship between variability in aboveground net primary production and precipitation in global grasslands." *Geophysical Research Letters*, 35-(23): 4.
- YANG, Y., GUAN, H., SHANG, S., LONG, D. & SIMMONS, C. T. (2014). "Toward the use of the MODIS ET product to estimate terrestrial GPP for nonforest ecosystems." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 11-(9): 1624-1628.
- ZHANG, H., CHEN, J. M., HUANG, B., SONG, H. & LI, Y. (2014). "Reconstructing Seasonal Variation of Landsat Vegetation Index Related to Leaf Area Index by Fusing with MODIS Data." *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of*, 7-(3): 950-960.
- ZHANG, J. (2010). "Multi-source remote sensing data fusion: status and trends." *International Journal of Image and Data Fusion*, 1-(1): 5-24.
- ZHANG, P. (1993). "Model Selection Via Multifold Cross Validation." *The Annals of Statistics*, 21-(1): 299-313.
- ZHANG, X., FRIEDL, M. A. & SCHAAF, C. B. (2006). "Global vegetation phenology from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Evaluation of global patterns and comparison with in situ measurements." *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 111-(G4): 14.

Bibliographie

- ZHAO, M. & RUNNING, S. W. (2010). "Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009." *Science*, 329-(5994): 940-943.
- ZHU, X., CHEN, J., GAO, F., CHEN, X. & MASEK, J. G. (2010). "An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions." *Remote Sensing of Environment*, 114-(11): 2610-2623.

Annexes

Annexe 1 : Fiche terrain pour l'acquisition des données de production dans le cadre du protocole HR (p.227).

Annexe 2 : Données de production pour la comparaison directe avec l'IPF_{MR} (p.228).

Annexe 3 : Note de synthèse sur le dispositif ISOP (p.231).

Fiche terrain pour l'acquisition des données de production dans le cadre du protocole HR.

Lieu :

Date :

Personnes :

Poids barquette :			Poids Sacs :								
Id	X WGS84	Y WGS84	Heure de prélèv	Id point GPS	Longueur prélèv (en m)	Poids vert coupée (en g) + sac	Poids vert coupé (en g)	Poids vert échantillon + boîtes	Poids vert échantillon (en g)	Poids sec 48h + boîtes (en g)	Poids sec 48h (en g)
P_1A	1.396977	43.604461									
P_1B	1.396001	43.603644									
P_1C	1.397481	43.603926									
P_1D	1.395392	43.603099									
P_1E	1.396876	43.603112									
P_1F	1.394411	43.602551									
P_1G	1.395529	43.602292									
P_1H	1.394301	43.601742									
P_1I	1.395295	43.601481									

Données de production pour la comparaison directe avec l'IPF_{MR}

Tableau 1. Données de production calculées sur les mailles expérimentales durant l'année 2014.

2014	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Date de Fauche 1	13/06	11/06		15/05	08/06	08/06	29/05	29/05		10/05	09/06	27/05	21/05	20/06	06/06	23/05	03/06	01/06
Production 1	3.72	3.64		1.76	4.46	4.67	5.19	5.70		4.03	3.53	3.09	3.82	2.71	3.03	2.69	3.27	2.40
Nb de parcelle 1	23	31		14	23	3	25	9		44	34	29	7	5	54	31	24	38
Surface de prairie 1	72.9	65.9		30.1	59.4	19.8	48.1	42.3		101.3	54.9	39.0	33.9	17.0	68.3	45.5	28.6	41.3
% Surface prairie 1	13%	12%		14%	21%	10%	32%	17%		27%	9%	6%	7%	7%	11%	6%	6%	9%
Date de Fauche 2	21/07				28/07	18/07	23/07	07/08		21/07	21/07	18/07			31/07	09/07		
Production 2	1.48				1.92	2.39	3.91	2.62		2.40	1.79	2.55			1.77	1.25		
Nb de parcelle 2	7				14	2	12	9		23	15	10			17	16		
Surface de prairie 2	28.2				49.6	13.1	20.5	42.3		51.8	26.0	13.2			25.5	32.9		
% Surface prairie 2	5%				18%	7%	14%	17%		14%	4%	2%			4%	5%		
Date de Fauche 3					06/09	04/09	01/09	04/09		14/09								
Production 3					1.28	2.03	1.12	1.43		1.06								
Nb de parcelle 3					9	2	7	4		6								
Surface de prairie 3					0.0	4.6	16.2	0.0		18.7								
% Surface prairie 3					0%	2%	11%	0%		5%								

Annexes

Tableau 2. Données de production calculées sur les mailles expérimentales durant l'année 2013.

2013	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Date de Fauche 1	27/06	28/06	08/06	13/06	19/06	16/06	13/06	16/06	29/06	31/05	18/06	31/05	15/06	02/07	02/06	31/05	14/06	12/06
Production 1	4.08	3.96	1.92	2.78	3.34	5.93	3.69	4.45	4.78	5.42	3.55	3.41	3.34	2.64	3.72	3.27	3.79	3.54
Nb de parcelle 1	31	35	10	18	32	16	28	12	9	50	28	27	38	24	60	45	26	35
Surface de prairie 1	84.4	76.2	33.7	37.0	77.5	66.7	47.2	53.5	27.2	104.9	42.5	64.4	81.2	35.0	64.9	88.2	29.1	35.0
% Surface prairie 1	15%	14%	14%	18%	27%	35%	31%	22%	7%	28%	7%	10%	18%	14%	10%	12%	6%	7%
Date de Fauche 2	23/07	11/08	19/07	16/07	22/07	26/07	27/07	27/07	26/07	25/07	30/07	07/07	15/07	09/08	16/07	08/07		
Production 2	1.58	1.17	1.50	0.70	2.15	2.08	2.65	2.14	1.94	2.31	2.49	1.86	1.36	1.44	1.45	2.54		
Nb de parcelle 2	7	3	10	7	12	11	23	7	1	24	11	12	9	4	12	17		
Surface de prairie 2	21.9	10.5	33.7	20.4	48.3	47.6	39.0	30.4	2.9	45.7	19.4	32.8	25.2	6.3	14.3	48.1		
% Surface prairie 2	4%	2%	14%	10%	17%	25%	26%	12%	1%	12%	3%	5%	6%	3%	2%	7%		
Date de Fauche 3			28/08		29/08	10/09	20/09	08/09		06/09		01/09	12/09	15/09	15/09	27/08		
Production 3			0.97		0.96	1.20	1.13	0.85		1.35		0.72	0.72	1.28	1.56	0.52		
Nb de parcelle 3			8		9	9	10	6		1		2	8	3	12	2		
Surface de prairie 3			27.4		33.9	40.5	18.7	24.5		1.5		5.3	23.6	4.5	14.3	9.8		
% Surface prairie 3			12%		12%	21%	12%	10%		0%		1%	5%	2%	2%	1%		

Annexes

Tableau 3. Données de production calculées sur les mailles expérimentales durant l'année 2012.

2012	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Date de Fauche 1	22/06		06/06	25/05	01/07	06/06	16/06		17/06	22/05	28/06		30/05	15/06		09/06		03/06
Production 1	2.92		3.10	2.08	2.43	3.86	4.36		4.45	2.90	2.38		3.47	2.13		2.46		2.15
Nb de parcelle 1	5		9	21	7	15	12		9	17	9		13	15		5		19
Surface de prairie 1	9.5		30.1	48.0	46.6	28.3	18.2		27.7	39.8	22.8		63.4	19.6		8.0		17.1
% Surface prairie 1	2%		13%	23%	16%	15%	12%		7%	10%	4%		14%	8%		1%		4%
Date de Fauche 2			24/07	02/07	30/07	19/07	29/07		23/07	04/07	18/07		07/07	20/07		17/07		
Production 2			1.59	0.67	0.69	2.29	2.07		1.37	2.39	1.08		1.73	0.81		1.41		
Nb de parcelle 2			9	8	2	12	8		2	10	1		4	9		4		
Surface de prairie 2			30.1	24.9	6.6	30.8	13.1		7.0	19.4	1.8		20.6	13.7		3.9		
% Surface prairie 2			13%	12%	2%	16%	9%		2%	5%	0%		5%	6%		1%		
Date de Fauche 3			02/09	27/08		09/09	06/09						10/09	05/09				
Production 3			0.47			1.08	1.32						0.88	1.35				
Nb de parcelle 3			5	2		4	4						1	1				
Surface de prairie 3			18.9	5.9		13.7	7.2						5.4	3.0				
% Surface prairie 3			8%	3%		7%	5%						1%	1%				

Note de synthèse sur le dispositif ISOP

"L'Information et Suivi Objectif des Prairies" (ISOP) est un dispositif, créé par l'INRA, le SCEES et MétéoFrance, dont l'objectif est de fournir une estimation annuelle de la production des prairies à l'échelle des régions fourragères (RF). Cette source d'information permet aux statisticiens du SCEES d'affiner leurs estimations de production (Statistique Agricole Annuelle). La production de la RF est exprimée en relatif par rapport à la référence historique correspondant à la production moyenne de la RF mesurée entre 1981 et 2009. Entre mars et octobre, une actualisation de la production annuelle est faite tous les mois, la valeur obtenue pour le mois d'octobre est retenue comme indicateur final de la production annuelle.

Depuis son lancement opérationnel en 2000, des actions de Recherche et Développement des 3 partenaires impliqués permettent des mises à jour du dispositif ISOP :

- Suite à la sécheresse de 2003, modification du modèle STICS-prairie pour améliorer la modélisation de la réponse des prairies sous l'effet de stress hydrique (Souverain *et al.* 2007) ;
- En 2007, intégration de données climatiques spatialisées pour prendre en compte des événements localisés dans les RF (Souverain *et al.* 2007) ;
- En 2010, modification de l'aire géographique d'application d'ISOP avec l'ajout des RF du pourtour méditerranéen (Souverain *et al.* 2010).

Le présent document a pour objectif de faire une présentation du dispositif ISOP (principe, données utilisées, modalités de mise en œuvre, validation) afin d'en déduire ses limites et de discuter de l'intérêt de la télédétection comme source de données pour estimer et suivre la production fourragère.

1. Présentation du dispositif ISOP

ISOP repose sur le couplage d'un modèle de croissance de l'herbe, STICS Prairies, avec une base de données agro-pédo-climatiques spatialisées pour fournir chaque mois et annuellement une estimation du rendement moyen des prairies à l'échelle d'une région fourragère. Il convient donc de définir :

L'objet d'étude : les prairies. Parmi les 3 types de prairies que l'on peut distinguer, seuls les résultats des prairies permanentes productives (production supérieure à 1500 Unités Fourragères) et temporaires sont publiées, soit 80% des surfaces en prairies en France. Les

prairies artificielles, principalement semées en légumineuse, sont modélisées mais les sorties ne sont pas communiquées car les travaux sont encore en cours de calibration/validation.

Note : en France, les 12,79 millions d'hectares de prairies sont réparties ainsi (Agreste, 2014):

- Prairies permanentes productives : 6,99 millions d'ha ;
- Prairies permanentes peu productives : 2,42 millions d'ha (comprenant les landes, parcours, alpages et non incluses dans le dispositif ISOP) ;
- Prairies temporaires : 3,15 millions d'ha ;
- Prairies artificielles : 0,23 millions d'ha.

L'échelle spatiale d'application : la Région Fourragère. Il s'agit d'une unité spatiale définie par Hentgen (1982) découpant la France métropolitaine en 228 zones homogènes en termes de pratiques agricoles et de conditions pédologiques et climatiques.

L'aire géographique d'application. Le dispositif ISOP ne fournit pas une estimation de la production pour l'ensemble des prairies présentes sur le territoire métropolitain. Au sein de chaque RF, une typologie des prairies est faite lors de l'enquête TERUTI réalisée en 1997 et permet de déterminer les surfaces par types de prairies. Seuls les types de prairies avec plus de 7000 ha sont pris en compte, soit 82, 207 et 12 RF (sur 228) respectivement pour les prairies temporaires, permanentes productives et artificielles. Pour les RF du pourtour méditerranéen, compte tenu des faibles surfaces en prairie dans ces zones, le seuil est abaissé à 2000ha. Ainsi, quel que soit le type de prairies, les RF couvrant les départements de la Corse, de Paris, des Hauts-de-Seine, de la Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne ne sont jamais renseignées. Ensuite, selon le type de prairies, d'autres RF sont exclues du périmètre d'étude comme illustré sur la Figure 1 pour les prairies permanentes.

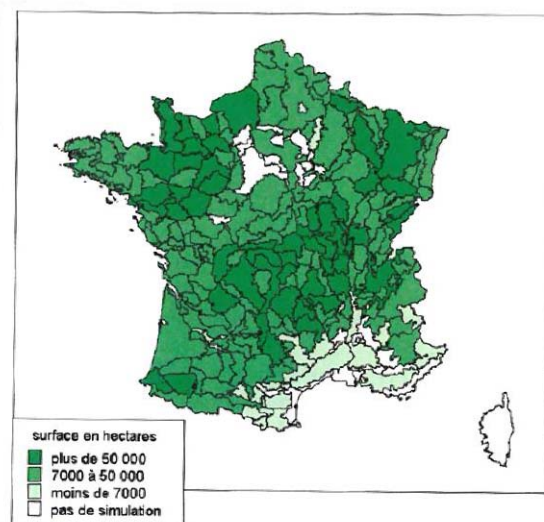


Figure 1 : Surface des prairies permanentes productives des 208 régions fourragères dans lesquelles sont réalisées des simulations.

Dans les deux paragraphes suivants, nous décrivons ce qui constitue le "cœur" du dispositif, à savoir, le modèle STICS-prairie et la base de données agro-pédo-climatiques servant à spatialiser les estimations de production fourragère à l'échelle des RF.

2. Le modèle STICS-prairie et son paramétrage pour ISOP

STICS est un modèle qui a pour but de simuler les variations du système sol-culture-climat à l'échelle d'une parcelle. A un pas de temps journalier, le modèle calcule des informations relatives au développement de la culture et des bilans azotés et hydriques. Le milieu physique et l'itinéraire technique sont fixés en début de simulation. Les paramètres météorologiques (températures, rayonnement, précipitations et ETP) sont ensuite utilisés en variables d'entrée au modèle.

Dans le cadre d'ISOP, les simulations STICS-prairies sont réalisées à l'échelle des RF. On distingue les données invariables quelle que soit la RF (paramètres de plante), les données variables d'une RF à l'autre mais fixes quelle que soit l'année (paramètres de sol, de modes d'exploitations) et les données variables d'une RF à l'autre et chaque année (paramètres climatiques).

Le modèle STICS-prairie présente des particularités du fait de son domaine d'application aux couverts prairiaux.

- La production annuelle des prairies est la résultante d'une succession de récoltes. Il y a une alternance entre les phases de croissance et de sénescence de la végétation variable

selon le mode d'exploitation. Afin de simuler correctement le comportement des prairies, il a été nécessaire d'adapter le modèle par l'ajout d'une fonction modélisant la fraction sénescence du couvert et l'ajout de paramètres d'entrée relatifs aux conditions de repousse (hauteurs de coupe, stade de développement, fertilisations). Les dates de fauche sont définies selon des dates, des sommes de températures ou bien des stades phénologiques. Ces caractéristiques sont spécifiées au niveau des paramètres des modes d'exploitation. Afin d'améliorer la qualité du modèle en situation de repousse après une période de sécheresse, le phénomène de tallage est directement simulé et permet d'influer sur le rendement futur de la prairie.

- Les prairies sont des couverts sensibles aux sécheresses surtout en zone méditerranéenne. Dans une situation de stress hydrique, le modèle induit un arrêt du renouvellement des feuilles et un allongement de la durée de vie des feuilles en place. Cette situation de sécheresse est détectée automatiquement selon les bilans hydriques calculés par le modèle. Dans les situations climatiques les plus extrêmes, la mortalité du couvert est modélisée selon une variable calculée à partir de la transpiration actuelle et potentielle.
- Les prairies artificielles sont simulées avec des paramètres caractérisant un couvert de luzerne et permettent notamment de prendre en compte la fixation symbiotique de l'azote (Ruget *et al.* 2009).

Enfin, des travaux de calibration/validation du modèle STICS adapté aux prairies ont été menés sur plusieurs saisons (printemps, été, automne) de plusieurs années (de 1982 à 1996) sur des parcelles présentant une variabilité d'espèces prairiales (dactyle, fétuque, Ray-Grass Anglais, prairies naturelles) dans des conditions pédoclimatiques diverses (parcelles localisées sur cinq sites : Lusignan - *Poitou-Charentes*, Toulouse - *Haute-Garonne*, Rennes - *Ille-et-Vilaine*, Mirecourt - *Vosges*, Saint-Laurent-de-la-Prée - *Charente-Maritime*) et en simulant la réponse des couverts en situation hydrique et azotée stressante ou pas. L'effet "espèce prairiale" s'observe par une faible augmentation de la dispersion des estimations de productions (Ruget *et al.* 2006). C'est pourquoi, dans le cadre d'ISOP, le modèle est paramétré pour une **espèce de graminée moyenne** pour laquelle les modes d'exploitation diffèrent (fréquence de fauches et fertilisation) et, combinés aux types de sol, expliquent la variabilité spatiale observée sur les rendements obtenus d'une RF à l'autre.

3. Les données utilisées dans ISOP pour la spatialisation des estimations de production

Chaque RF est caractérisée par des types de sols, des modes d'exploitation par type de prairie et des conditions climatiques. Dans ce paragraphe, nous décrivons les sources de données utilisées.

a) Les données climatiques

Le modèle STICS-prairie requiert en entrée cinq paramètres climatiques, Température minimale et maximale, Rayonnement global, Evapotranspiration (ETP) et Hauteurs de précipitations, acquis à un pas de temps journalier.

Dans le cadre d'ISOP, ces paramètres sont fournis par Météo France avec une archive démarrant au 01/02/1981. Il s'agit de données spatialisées (grille de 0,125° de latitude/longitude soit ~14 km), obtenues à partir d'une interpolation des valeurs des cinq stations les plus proches. La série climatique de la région fourragère est, pour chaque paramètre, la moyenne pondérée par la surface de l'ensemble des mailles de la région fourragère.

b) Les données de sols

Pour un même type de prairie, la production peut varier en fonction du type de sol. De ce fait, chaque RF est caractérisée par les types de sols dominants. Pour cela, la base de données des sols fournie par l'INRA d'Orléans (<http://www.gissol.fr/programme/bdgsf/contenu.php>) est utilisée. Elle se présente sous la forme d'une base de données cartographique à une échelle de 1/1 000 000, avec des polygones géoréférencés délimitant les zones similaires en termes de répartition des sols. Pour chaque polygone, une information attributaire décrit chaque type de sol selon ses caractéristiques pédologiques.

Parce qu'il existe une grande diversité de sols au sein même d'une RF, les sols ayant des caractéristiques proches sont regroupés. Seuls les groupes de sols les plus représentatifs sont sélectionnés : ils doivent couvrir au moins 50 % de la surface de la région fourragère. Un maximum de 5 groupes de sols est fixé. Pour chaque caractéristique de sol, une valeur moyenne est calculée à l'échelle de la région fourragère.

Le modèle STICS-prairie requiert en entrée 8 paramètres relatifs aux types de sols : Profondeur du sol, Réserve en eau, Profondeur d'humification, Densité apparente, Teneur en argile, Albédo, Teneur en carbonate de calcium, Teneur en azote organique. La majeure partie

est obtenue à partir de règles de pédotransfert, c'est-à-dire selon des règles établies à dire d'expert. La profondeur d'humification et la teneur en azote organique sont fixées initialement.

c) Les données de modes d'exploitation des prairies

Le modèle STICS-prairie requiert en entrée 5 paramètres relatifs aux modes d'exploitation des prairies : Taux de légumineuse, Fertilisation, Modes de récolte, Nombre de coupes, Quantité initiale d'Azote.

Dans le cadre d'ISOP, ces paramètres sont estimés à partir des résultats d'une enquête effectuée en 1998 sur les prairies. Les surfaces par classe de prairies (artificielles, permanentes, temporaires) ont été déterminées lors de l'enquête TERUTI en 1997. Ce premier niveau de résultat a permis de construire un plan d'échantillonnage afin de déterminer les parcelles à enquêter par région fourragère. Seuls les types de prairies avec plus de 7000 ha de surfaces dans la région fourragère ont été enquêtés (2000ha pour les régions méditerranéennes).

Une trentaine de parcelle de chaque type de prairie dans chaque RF a été sélectionnée soit un échantillon sur la France entière de 8643 parcelles couvrant 3 % des prairies artificielles, 30 % des prairies temporaires et 60 % de prairies permanentes. L'analyse des données collectées a permis de définir 30 modes d'exploitations (correspondant à des combinaisons entre fertilisation azotée – modes de récolte – nombre de coupes) sur l'aire géographique d'application d'ISOP. De même que pour les types de sols, pour chaque RF, sont retenus seuls les modes d'exploitation représentant un minimum de 50% des modes d'exploitation existant dans la RF, avec un maximum de 5 modes d'exploitation fixé.

En synthèse, le tableau 1 récapitule les données utilisées pour le dispositif ISOP et leurs principales caractéristiques.

Données	Source	Variable exploitée dans ISOP	Résolution spatiale	Acquisition	Traitement de l'information
Données sur les prairies	TERUTI	<ul style="list-style-type: none"> • Type de prairies 	RF	1997	-
Données de sol	INRA Orléans	<ul style="list-style-type: none"> • La profondeur du sol • La réserve en eau • La densité apparente • La teneur en argile • L'albédo • La teneur en carbonate de calcium 	RF	1998	Règle de pédotransfert – dires d'expert
		<ul style="list-style-type: none"> • La teneur en azote organique • La profondeur d'humification 	National	Définie à l'initiative d'ISOP	Fixer arbitrairement
Données sur les modes d'exploitation	Enquêtes SCEES	<ul style="list-style-type: none"> • Quantité initiale d'azote • Taux de légumineuses 	RF	1998	Une valeur moyenne est calculée pour caractériser les prairies de la RF
		<ul style="list-style-type: none"> • Fertilisation • Modes de récolte • Fréquence de coupes 	RF	1998	Des modes d'exploitation sont définis par RF
Données climatiques	Météo France	<ul style="list-style-type: none"> • Températures min et max • Hauteurs de précipitations • Rayonnement Global • EvapoTranspiration Potentielle 	Grille de 0,125° (~14 km)	Depuis 01/02/1981, acquisition journalière	Interpolation des données de stations puis moyenne par RF afin d'obtenir une série temporelle de chaque paramètre

Tableau 1. Données utilisées pour le dispositif ISOP et principales caractéristiques.

4. La mise en œuvre d'ISOP : Illustration du dispositif sur une RF

Dans ce paragraphe, nous décrivons le principe de mise en œuvre d'ISOP en prenant l'exemple d'une RF. Cette méthodologie est appliquée à l'ensemble des RF définies dans le périmètre d'ISOP pour produire une information spatialisée.

Au sein d'une RF, les surfaces par type de prairies (définies lors de l'enquête TERUTI de 1997) sont calculées. *Considérons que la RF contient 10 000 ha de prairies permanentes*

productives, 7 500 ha de prairies temporaires et 1 500 ha de prairies artificielles. Seuls les types de prairies avec plus de 7000 ha au sein de la RF sont simulés dans ISOP. Dans cet exemple, seules les prairies permanentes productives et temporaires font l'objet d'un suivi.

Les simulations de production fourragère sont effectuées en distinguant les types de prairies. Pour la suite de cet exemple, nous nous intéressons au type "prairies temporaires", le principe étant le même pour les prairies permanentes productives.

a) Ce qui est réalisé lors de l'initialisation d'ISOP...

- Caractérisation de la RF en combinaison "sol*mode d'exploitation"

Afin de simuler la production des prairies temporaires dans la RF prise comme exemple, il faut prendre en compte les combinaisons "sol * mode d'exploitation" existantes dans la RF et déterminer leurs fréquences d'occurrence. Pour définir les combinaisons, l'hypothèse d'équi-répartition des types de sol pour chaque type de prairies est faite.

Les principaux types de sol (maximum 5) sont identifiés, à partir d'une carte de sol au 1/1000000, pour couvrir plus de 50 % de la surface totale de la RF. Les caractéristiques pédologiques de chaque sol sont ensuite utilisées pour déterminer les valeurs des 8 paramètres d'entrées relatifs au sol dans le modèle STICS-prairie.

Dans cette RF, il y a 3 sols différents : sols A, B, E respectivement avec les fréquences d'occurrences suivantes 30 %, 10 % et 15 %.

A partir des enquêtes effectuées par le SCEES en 1998, les 5 modes d'exploitation les plus récurrents au sein de la RF ont été conservés pour représenter 50 % au minimum des modes existants. Il s'agit d'identifier le nombre et la fréquence d'exploitation des prairies et les niveaux de fertilisation.

Trois modes d'exploitation sont retenues pour les prairies temporaires de la RF prise en exemple :

- Mode 10 : 3 exploitations et 2 fertilisations de la prairie (25 %).
- Mode 20 : 4 exploitations et 2 fertilisations de la prairie (15 %).
- Mode 23 : 4 exploitations et 2 fertilisations de la prairie plus précoces (19 %).

Par la suite, les types de sol et les modes d'exploitation retenus pour la RF sont combinés pour déterminer les fréquences d'occurrence de chaque combinaison. Le tableau 2 indique pour la RF prise en exemple les combinaisons "sol*mode d'exploitation" identifiées pour les prairies

temporaires et la fréquence d'occurrence calculée. Chacune des combinaisons existantes fait l'objet d'une simulation qui utilise les données climatiques annuelles de la RF.

Type de sol	Fréquence d'occurrence par type de sol	Mode d'exploitation	Fréquence d'occurrence par mode d'exploitation	Fréquence d'occurrence (%)
A	30	10	25	$30\% \times (100/55) \times 25\% \times (100/59) = 23.1$
A	30	20	15	13.9
A	30	23	19	17.6
B	10	10	25	7.7
B	10	20	15	4.6
B	10	23	19	5.9
E	15	10	25	11.6
E	15	20	15	6.9
E	15	23	19	8.8

Tableau 2. Combinaisons "sol*mode d'exploitation" identifiées pour les prairies temporaires et fréquence d'occurrence calculée.

- Etablissement de la production fourragère de référence

La production fourragère de référence est établie à partir des estimations de production de chaque type de prairie en prenant en compte les combinaisons "sol*mode d'exploitation" identifiées et en utilisant la série temporelle moyenne des 5 paramètres climatiques requis en entrée par le modèle STICS-prairie pour la période 1981-2009.

Le tableau 3 indique les résultats de simulation pour les prairies temporaires de la RF prise en exemple avec les valeurs des paramètres climatiques pour la période de référence.

Type de sol	Mode d'exploitation	Fréquence d'occurrence (%) –	Rendement de référence (qx de MS / ha)	Rendement pour l'année étudiée (qx de MS / ha)
A	10	23.1	26	27
A	20	13.9	27.2	27.5
A	23	17.6	26.7	28
B	10	7.7	26	26.8
B	20	4.6	28.2	28.1
B	23	5.9	27.6	28
E	10	11.6	26.5	26.7
E	20	6.9	25.9	26.9
E	23	8.8	25	25.2

Tableau 3. Résultats d'estimation de production pour toutes les combinaisons identifiées dans la RF pour les prairies temporaires.

Au final, la valeur de production de référence pour les prairies temporaires de la RF s'obtient en faisant le calcul suivant : $26 \times 23.1 \% + 27.2 \times 13.9 \% + \dots + 25 \times 8.8 \%$ soit 26.5 qx/ha. Dans l'exemple traité, la même démarche est effectuée simultanément pour les prairies permanentes productives. La production de référence des prairies permanentes productives est de 18.3 qx/ha. Ces deux résultats sont pondérés par les surfaces respectives de chaque type de prairie pour obtenir la production de référence de la RF : $26.5 \times 7\,500/17\,500 + 18.3 \times 10\,000/17\,500 = 21.8$ qx/ha.

En synthèse, chaque RF est caractérisée par :

- Une composition en prairies (permanentes productives, permanentes peu productives, artificielles, temporaires) établie à partir de données d'occupation du sol de 1997 ;
- Des combinaisons "sol*mode d'exploitation", cette dernière donnée provenant d'une enquête de 1998 ;
- Une production de référence établie à partir d'une série climatique couvrant la période 1981-2009.

Seules les données climatiques sont réactualisées annuellement et servent à suivre et établir la production fourragère annuelle des RF.

b) Ce qui est réalisé tous les ans...

La production fourragère annuelle est établie de la même façon que celle de référence, c'est-à-dire à partir des estimations de production annuelle de chaque type de prairie en prenant en compte les combinaisons "sol*mode d'exploitation" identifiées et en utilisant la série temporelle des 5 paramètres climatiques requis en entrée par le modèle STICS-prairie pour l'année étudiée.

Ainsi, pour la RF prise en exemple, la production fourragère des prairies temporaires pour l'année étudiée est : $27 \times 23,1 \% + 27,5 \times 13,9 \% + \dots + 25,2 \times 8,8 \%$ soit une production pour l'année étudiée de 27,2 qx/ha. La production annuelle des prairies permanentes productives est de 19 qx/ha. Au final, la production annuelle des prairies de la RF est : $27,2 \times 7\,500/17\,500 + 19 \times 10\,000/17\,500$ soit 22,5 qx/ha.

Dans le cadre du dispositif ISOP, les chiffres publiés chaque année par RF correspondent au ratio entre la production annuelle des prairies et celle de référence. Cela permet d'identifier les RF affectées par un déficit de production fourragère. Dans notre exemple, la valeur de ce ratio est égale à 103,2 %. Pour les prairies de la RF, la production annuelle est supérieure à la normale.

c) Validation régionale d'ISOP

ISOP a été le fruit de validation réalisée à la demande du SCEES. Pour répondre à l'objectif initial, à savoir "caractériser la production fourragère par région et par type de prairie", deux types de travaux de validation ont été répertoriés.

Tout d'abord, dans le Guide d'utilisation ISOP V1 (Donet *et al.* 2001), une comparaison des estimations de productions des années 1982 à 1998 provenant des sorties ISOP et des données du SCEES permet de valider le modèle spatialement et temporellement. Les données du SCEES sont établies par des experts au niveau départemental. Il est complexe de spatialiser cette information qui est entachée de subjectivité. Les résultats de ces comparaisons sont les suivants :

- Au niveau national comme départemental, les variations interannuelles de production fourragère sont relativement bien retranscrites. En valeurs absolues, les rendements ISOP sont plus élevés que ceux du SCEES.
- Au niveau spatial, la confrontation des sorties du modèle pour les prairies temporaires et les prairies permanentes montrent bien le meilleur potentiel productif des premières.

Globalement, la comparaison des rendements ISOP et SCEES est aussi cohérente hormis pour le Sud-Ouest et le Massif Central.

- Enfin, sur 97 RF et 17 années, en définissant des classes de variation de production, le tableau de contingence suivant (Tableau 4) est obtenu (chiffre exprimé en fréquence).

		Classes des rendements SCEES			
		<75 %	75 <... < 90%	90 <...<110%	> 110 %
Classes des rendements ISOP	<75 %	2.2	3	2.6	0.2
	75 <... < 90%	3.5	7.6	10.6	3.4
	90 <... < 110%	3.6	6.2	19.1	9.3
	> 110 %	0.3	2.1	11.6	14.5

Tableau 4. Validation croisée entre estimations de production ISOP et SCEES pour 97 RF françaises et sur 17 années
Source : (Ruget *et al.* 2006).

D'après le tableau 4, ISOP estime les variations de production comme les experts du SCEES à 43.4% (somme des chiffres sur la diagonale). Avec ISOP, le risque de ne pas détecter un événement climatique majeur induisant une perte de production est de 7,4 % (chiffre en rouge) et celui d'estimer une sécheresse à tort est de 5.8% (chiffre en vert).

Ensuite, dans une communication de F. Ruget sur la validation ISOP (2006), une comparaison entre les experts du SCEES et les sorties ISOP en valeurs relatives donne des niveaux de résultats très variables selon les sites d'étude affichés (Champagne, Indre, Haute-Normandie, Pays de la Loire, Bretagne). Le coefficient de détermination varie entre 0 et 0,6. La totalité de l'étude n'est pas détaillée. Ces résultats peuvent être expliqués par la qualité intrinsèque du modèle ISOP, des incertitudes sur les données d'entrée et la mauvaise prise en compte de l'hétérogénéité des régions fourragères (climat / altitude) d'après Ruget *et al.* (2006).

Author: Antoine Roumigué

Thesis Title: Development and validation of a forage production index based on remote sensing time series - The case of an agricultural insurance in France

Abstract:

An index-based insurance is provided in response to the increasing number of droughts impacting grasslands. It is based on a forage production index (FPI) retrieved from medium resolution remote sensing images to estimate the impact of hazard in a specific geographical area. The main issue related to the development of such an insurance is to obtain an accurate estimation of losses. This study focuses on two objectives: the FPI validation and the improvement of this index. A validation protocol is defined to limit problems attached to the use of medium resolution products and scaling issues in the comparisons process. FPI is validated with different data: ground measurements production ($R^2 = 0.81$; $R^2 = 0.71$), high resolution remote sensing images ($R^2 = 0.78 - 0.84$) and modelled data ($R^2 = 0.68$). This study also points out areas of improvement for the IPF chain. A new index, based on semi-empirical modeling combining remote sensing data with exogenous data referring to climatic conditions and grassland phenology, allows improving production estimation accuracy by 18.6%. Results of this study open several new research perspectives on FPI development and its potential practical application.

Auteur : Antoine Roumiguié

Titre de la thèse : Développement et validation d'un indice de production des prairies basé sur l'utilisation de séries temporelles de données satellitaires - Application à un produit d'assurance en France

Directeur de thèse : Jean Daydé

Co-directeur de thèse : Anne Jacquin

Lieu et date de soutenance : Toulouse, le 22 avril 2016.

Résumé :

Une assurance indicielle est proposée en réponse à l'augmentation des sécheresses impactant les prairies. Elle se base sur un indice de production fourragère (IPF) obtenu à partir d'images satellitaires de moyenne résolution spatiale pour estimer l'impact de l'aléa dans une zone géographique définie. Le principal enjeu lié à la mise en place d'une telle assurance réside dans la bonne estimation des pertes subies. Les travaux de thèse s'articulent autour de deux objectifs : la validation de l'IPF et la proposition d'amélioration de cet indice. Un protocole de validation est construit pour limiter les problèmes liés à l'utilisation de produit de moyenne résolution et au changement d'échelle. L'IPF, confronté à des données de référence de différentes natures, montre de bonnes performances : des mesures de production *in situ* ($R^2 = 0,81$; $R^2 = 0,71$), des images satellitaires haute résolution spatiale ($R^2 = 0,78 - 0,84$) et des données issues de modélisation ($R^2 = 0,68$). Les travaux permettent également d'identifier des pistes d'amélioration pour la chaîne de traitement de l'IPF. Un nouvel indice, basé sur une modélisation semi-empirique combinant les données satellitaires avec des données exogènes relatives aux conditions climatiques et à la phénologie des prairies, permet d'améliorer la précision des estimations de production de 18,6 %. L'ensemble des résultats obtenus ouvrent de nombreuses perspectives de recherche sur le développement de l'IPF et ses potentiels d'application dans le domaine assurantiel.

Mots-clés : Prairies ; Télédétection ; Validation ; Modélisation ; Assurance indicielle ; Paramètres biophysiques.

Ecole Doctorale : SEVAB - Agrosystèmes, écosystèmes et environnement

UMR 1201 Dynafor - INRA Chemin de Borde-Rouge - BP 52627 - 31326 Castanet-Tolosan

Ecole d'Ingénieurs de Purpan - 75 voie du TOEC – BP 57611 – 31076 Toulouse Cedex 3
