



**HAL**  
open science

# Evaluation des services fourragers et environnementaux des prairies permanentes à partir de la végétation, du milieu et des pratiques de gestion

Audrey A. Michaud

► **To cite this version:**

Audrey A. Michaud. Evaluation des services fourragers et environnementaux des prairies permanentes à partir de la végétation, du milieu et des pratiques de gestion. Sciences agricoles. Institut National Polytechnique de Lorraine, 2011. Français. NNT : 2011INPL039N . tel-01749522

**HAL Id: tel-01749522**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01749522>**

Submitted on 29 Mar 2018

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

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



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE  
ÉCOLE DOCTORALE : RP2E

UR Herbivores, Clermont Ferrand  
LAE Nancy Université INPL

**THÈSE**

Présentée et soutenue publiquement le 27/06/2011  
pour l'obtention du grade de Docteur de l'INPL  
(Spécialité : Sciences agronomiques et forestières, biologie et écologie, biotechnologies)

par

Audrey MICHAUD

Evaluation des services fourragers et  
environnementaux des prairies permanentes  
à partir de la végétation, du milieu et des  
pratiques de gestion



**Composition du jury :**

*Président du jury :*

*Rapporteurs :*

*Examineurs :*

*Directeurs de thèse:*

*Membres invités :*

Didier ALARD

Olivier HUGUENIN

Jean-Louis PEYRAUD

Dominique ORTH

Jacques LUCBERT

René BAUMONT

Sylvain PLANTUREUX

Eric POTTIER

Professeur des Universités (Bordeaux)

Chercheur (ART Suisse)

Directeur de Recherches (INRA Rennes)

Maître de conférences (Clermont Ferrand)

Ingénieur Institut de l'Élevage (Paris)

Directeur de Recherches (INRA Theix)

Professeur (ENSAIA-INRA-INPL Nancy)

Ingénieur Institut de l'Élevage (Limoges)



Lors d'un après midi d'escalade, Denis m'a demandé sur quoi je travaillais. Après une longue explication scientifique, j'ai fini par dire un peu péjorativement que je travaillais sur l'herbe...

Il m'a alors envoyé un poème de René Char dans lequel l'herbe a une connotation très positive. Ce poème reflète ma vision de l'herbe et ma passion pour elle...

La truite :

*« Rives qui croulez en parure  
Afin de remplir tout le miroir  
Gravier où balbutie la barque  
Que le courant presse et retrousse,  
Herbe, herbe toujours étirée,  
Herbe, herbe jamais en répit,  
Que devient votre créature  
Dans les orages transparents  
Où son cœur la précipita ? »*

René Char



## Remerciements

Après avoir découvert la recherche comme je ne l'imaginai pas... dans le cadre de mon stage de fin de cycle ingénieur, j'ai longtemps hésité à continuer dans ce domaine. Ma première pensée va donc vers Anne Mathieu et Alain Havet qui m'ont fortement incitée à poursuivre dans une thèse. Merci à Catherine Disenhaus pour m'avoir aidée dans ma réflexion personnelle et transmis cette offre de thèse, qui m'a permis de continuer l'aventure.

Je remercie l'Institut de l'Élevage et particulièrement Eric Pottier pour m'avoir permis de réaliser ce travail sur les prairies permanentes et de concilier un travail de recherche et développement dans le cadre d'une thèse CIFRE.

Je tiens à remercier mes deux encadrants, René Baumont et Sylvain Plantureux pour m'avoir guidée durant ces trois années et pour m'avoir enseignée l'écriture scientifique.

Un grand merci aux membres de mon comité de thèse (Pascal Carrère, Luc Delaby, Michel Duru, Anne Farruggia, Bernard Jeangros et Eric Pottier) qui se sont impliqués dans mon travail tout au long de ma thèse. Je me souviendrai toujours de mon 1<sup>er</sup> comité de thèse où une expression m'a marquée : "il faut théoriser les choses"... J'ai alors senti que ces trois années pourraient être compliquées....

Merci aux membres du jury pour le temps qu'ils ont bien voulu consacrer à ma thèse.

Je remercie les équipes dans lesquelles j'ai travaillé : l'équipe RAPA, le LAE et le service "fourrages et conduite des troupeaux allaitants". Merci à Angélique, Emilie et Fabienne pour votre gros travail au laboratoire. Angélique, j'espère que tu ne cherches pas trop à savoir sur quelles espèces de graminées tu marches quand tu te ballades... Merci à Aline pour ton aide notamment dans la réalisation des macros. Merci à Jean-Marie et Marc Auguergouz pour les trajets qu'ils ont faits pour aller chercher à travers la France les échantillons d'herbe. Merci à Marie-Madeleine Mialon pour ton aide précieuse dans mes débuts sur SAS et merci à Thierry Brun d'avoir pris le relais et m'avoir montré que les statistiques peuvent être un jeu. Je remercie Béatrice Noirtin pour son aide dans la réalisation des cartes sous SIG. Merci à Bernard Amiaud et Etienne Gaujour pour nos conversations passionnantes lors de mes séjours sur Nancy et pour votre aide en traitements statistiques et en foresterie. Merci à Sandrine Fougère pour ton aide logistique durant ces trois années. Je remercie également Météo-France pour sa collaboration.

Je tiens à remercier tous les stagiaires qui ont travaillé sur ce programme CASDAR : merci à Gwenn, Estelle, Mathieu et particulièrement à Julia, qui m'a permis de faire ma première expérience d'encadrement. Merci à toi Julia pour ton dynamisme, ta bonne humeur et tous ces bons moments.

Ce travail n'aurait jamais été possible sans l'aide de tous les membres du CAS DAR. Un grand merci à tous ceux et celles qui ont fait les prélèvements d'herbe durant ces deux années (Patrice Pierre, Edith Capel, Nicolas Bulot, Damien Dutertre, Michel Harivel, Jean Laurent, Sophie Hard, Olivier Camacho, Eric Kerneis, Pascal Faure, Raphael Ralu, Delphine Breton, Bertrand Dury, Carine Chatain, Jean-Marc Arranz, Christophe Gominard, Pascale Faure, Stéphane Violleau, Jean Zapata, Michel Desmidt, Stéphane Martignac, Claire Brajot, Hervé Feugère, Mélanie Thirion, Marc Lamy, Fanny Mesot, Rémi Georgel, Julien Lorent, Gaetan Leborgne, Aude Auriou, Daniel Ragon, Jean-François Strehler, Jean-Louis Fiorelli, Jean-Yves Vansteelant, Sébastien Rosset, Keran Larue, tintin, Daniel Leconte, Jean-Baptiste Goujeon, Le Mourier, INRA de Marcenat, INRA de Laqueuille). J'espère n'avoir oublié personne. Merci pour votre travail et votre implication. J'espère que les étapes des mises en défens et des P<sub>2</sub> ne sont plus que de mauvais souvenirs... Merci à tous ceux qui ont travaillé sur les échantillons d'herbe dans les centres INRA et Institut. Merci à Jean-Pierre Farrié et Fabienne Launay pour votre aide. Merci à Luc Delaby pour tes conseils et ton soutien depuis le début de la thèse. Un grand merci à tous les agriculteurs qui ont accepté de prêter leurs parcelles : sans eux, le CASDAR n'aurait pas eu lieu.

Je remercie également Rémy Delargarde pour ses très bons conseils sur l'herbe et son aide dans la gestion des fichiers. Merci à Jean Devun pour nos discussions passionnantes sur l'herbe et pour tes conseils et ton aide durant ces trois années. Merci à Jean-Yves Vansteelant pour ton travail durant ces 3 années et pour m'avoir permis de participer au concours des prairies fleuries. Merci également à Philippe Fleury et François Gillet pour m'avoir aidée et conseillée sur ce travail. Je remercie particulièrement Stéphane Ingrand pour son aide précieuse durant ces trois années et pour nos longues conversations sur la recherche et sur la vie.

Enfin ma dernière pensée va vers mes amis et ma famille. Merci à Amélie, Anne, Loic, pour nos superbes moments durant ces trois années, et à Audrey, Cécile, Pauline, Cyrille, Amandine et Anne Croute d'avoir été là. Merci à vous les "morues" pour votre soutien quotidien, pour ces superbes moments passés en France et au Québec. A présent, à nous d'avancer assurément quelque part sur la terre...on a fait tous nos bagages, on est prêtes à partir... (comme le chante si bien François Duschenes). Enfin ces dernières lignes vont pour mes parents, mes frères et Jérôme. Merci de m'avoir soutenue et merci pour votre aide que ce soit pour la lecture du manuscrit, pour les prélèvements d'herbe ou pour les parcelles mises à disposition... Merci à toi Jérôme pour ton soutien et tes encouragements durant ces trois années et merci de m'avoir supportée dans les moments difficiles.









## SOMMAIRE

<b><u>Du contexte à la problématique</u></b>	17
1. <u>Quelle place pour les prairies en France ?</u>	17
2. <u>Un programme pour revaloriser les prairies permanentes</u>	19
3. <u>Un travail de thèse au sein d'une démarche de recherche et développement</u>	21
<b><u>Partie 1. Aptitude des prairies permanentes à rendre des services fourragers et environnementaux</u></b>	27
<b><u>A Etat de l'art</u></b>	29
<b><u>I. Les services fourragers et environnementaux rendus par les prairies permanentes</u></b>	29
1. <u>Fonctions ou services des prairies permanentes ?</u>	29
2. <u>Les services fourragers des prairies permanentes</u>	34
3. <u>Les services environnementaux des prairies permanentes</u>	36
3.1. <u>Séquestration du carbone</u>	36
3.2. <u>Maintien de la diversité ordinaire et patrimoniale</u>	37
3.3. <u>Pollinisation</u>	38
3.4. <u>Aspect esthétique de la prairie</u>	39
<b><u>II. Etude des liens entre les services fourragers et environnementaux des prairies permanentes, les critères d'aptitude, les états de la végétation et leurs descripteurs</u></b>	40
1. <u>Les états de la végétation pour prédire les services fourragers et environnementaux</u>	40
1.1. <u>Fonctionnement d'un couvert prairial et liens avec la production et qualité de la prairie</u>	40
1.2. <u>La composition botanique ou taxonomique</u>	45
1.3. <u>La composition fonctionnelle</u>	46
2. <u>Quels sont les liens entre les états de la végétation et les critères d'aptitude des services fourragers et environnementaux ?</u>	52
2.1. <u>Les états de végétation pour prédire les critères d'aptitude des services fourragers</u>	52
2.2. <u>Les états de végétation pour prédire les critères d'aptitude des services environnementaux</u>	55
2.2.1. <u>Séquestration du carbone</u>	55
2.2.2. <u>Maintien de la diversité ordinaire</u>	55
2.2.3. <u>Maintien de la diversité patrimoniale</u>	56
2.2.4. <u>Pollinisation</u>	56
2.2.5. <u>Aspect esthétique de la prairie</u>	56
3. <u>Quels sont les liens entre les descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion et les états de la végétation ?</u>	58
3.1. <u>Composition botanique</u>	58
3.2. <u>Composition fonctionnelle</u>	59
<b><u>B. Sélection des services, critères d'aptitude, états de la végétation et descripteurs étudiés</u></b>	66
<b><u>I. Services fourragers et environnementaux étudiés</u></b>	66
1. <u>Services fourragers</u>	66

1.1. Matériels et méthodes	66
1.2. Services identifiés par les éleveurs sur les zones considérées	67
2. Services environnementaux	69
<b><u>II. Critères d'aptitudes des services fourragers et environnementaux étudiés</u></b>	70
1. Critères d'aptitude des services fourragers	70
2. Critères d'aptitude des services environnementaux	71
<b><u>III. Etats de la végétation et descripteurs étudiés</u></b>	71
<b><u>Objectif et stratégie du travail de thèse</u></b>	73
<b><u>I. Objectif et hypothèses du travail de thèse</u></b>	75
<b><u>II. Dispositifs expérimentaux utilisés</u></b>	76
<b><u>III. Démarche adoptée</u></b>	77
1. <u>Etude des liens entre les descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion et les états de la végétation</u>	77
2. <u>Etude des liens entre les états de la végétation et les critères d'aptitude</u>	77
3. <u>Une méthode pour lier les critères d'aptitude aux services fourragers et environnementaux des prairies permanentes</u>	78
<b><u>Partie 2. Résultats</u></b>	81
<b><u>Chapitre 1 : dispositifs expérimentaux mis en œuvre</u></b>	83
1. <u>Un dispositif principal basé sur un réseau national de parcelles en prairies permanentes ("réseau national")</u>	85
1.1. <u>Construction du réseau national</u>	85
1.2. <u>Protocole de mesures sur le terrain</u>	88
1.2.1. <u>Durée et périodes de mesures</u>	88
1.2.2. <u>Détermination de la composition botanique et fonctionnelle de la prairie</u>	89
1.2.3. <u>Mesures effectuées sur la prairie</u>	91
1.2.4. <u>Mesures et analyses au laboratoire</u>	95
a. <u>Mesures de la composition botanique et fonctionnelle de la prairie</u>	96
b. <u>Analyses de la production et de la valeur nutritive de la prairie</u>	99
2. <u>Un dispositif expérimental "Prairies Marcenat"</u>	100
2.1. <u>Plan expérimental</u>	100
2.1.1. <u>Mesures sur le terrain</u>	101
2.1.2. <u>Mesures et analyses au laboratoire</u>	101
a. <u>Mesures de la composition botanique et fonctionnelle de la prairie</u>	101
b. <u>Mesures de la phénologie de la prairie</u>	101
c. <u>Analyses de la production et de la valeur nutritive de la prairie</u>	101
<b><u>Chapitre 2 : étude des liens entre les descripteurs et les états de la végétation</u></b>	103
1. <u>Identification des descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion permettant de prédire la composition botanique et fonctionnelle des prairies permanentes : introduction à l'article</u>	106
2. <u>Résultats de l'étude des liens entre les descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion et de la proportion de graminées, légumineuses et diverses</u>	139
3. <u>Discussion sur l'étude des liens entre les descripteurs pédoclimatiques et des</u>	

<u>pratiques de gestion, et la proportion de graminées, légumineuses et diverses</u>	140
<u>4. Conclusion générale</u>	143
<b><u>Chapitre 3 : étude des liens entre les états de la végétation et les critères d'aptitude fourragers</u></b>	145
<u>1. Evaluation des différences de production et de qualité liées aux types fonctionnels dans un même milieu : introduction à l'article soumis à la revue Grass and Forage Science</u>	148
<u>2. Dans quelle mesure la composition fonctionnelle permet-elle de prédire la production et la valeur nutritive des prairies permanentes ? Etude sur un réseau national (projet d'article)</u>	179
<u>3. Conclusion générale</u>	204
<b><u>Chapitre 4 : une méthode pour lier les critères d'aptitude aux services fourragers et environnementaux des prairies permanentes</u></b>	207
<u>1. Le choix d'une méthode d'analyse multicritères</u>	210
<u>2. Evaluation des services fourragers et environnementaux par une approche multicritères</u>	213
<u>3. Evaluation de l'aspect esthétique d'une prairie permanente</u>	221
<b><u>Partie 3. Discussion générale</u></b>	227
<u>1. Retour sur l'échantillon et les méthodes de travail</u>	235
<u>1.1. Etude sur un réseau national de parcelles</u>	235
<u>1.2. L'adéquation des méthodes mise en œuvre à l'hétérogénéité de la végétation</u>	238
<u>2. De nouvelles références de composition botanique, productions et valeurs nutritives</u>	241
<u>3. Qualité des modèles de prédiction des états de la végétation et des critères d'aptitude fourrager</u>	243
<u>4. Intérêt de la composition fonctionnelle pour prédire les critères d'aptitude des services fourragers et environnementaux des prairies permanentes</u>	245
<u>5. La diversité botanique des prairies permanentes influence-t-elle les critères d'aptitude des services fourragers ?</u>	247
<u>6. Evaluation des services fourragers et environnementaux des prairies permanentes</u>	249
<u>7. Des connaissances scientifiques à des outils techniques</u>	249
<b><u>Conclusions et perspectives</u></b>	253
<b><u>Références bibliographiques</u></b>	257
<b><u>Liste des publications</u></b>	281
<b><u>Annexes</u></b>	285

## Liste des figures

- Figure 1.** Localisation des partenaires du programme CASDAR Prairies Permanentes ( : Institut de l'Élevage ;  : centres INRA ;  : Institut National Polytechnique de Lorraine ; ARDAR : Association Régionale pour le Développement Agricole et Rural ; CDA : Chambre Départementale d'Agriculture ; CRA : Chambre Régionale d'Agriculture ; EDE : Etablissement Départemental d'Élevage ; GIS : Groupement d'Intérêt Scientifique ; PNR : Parc Naturel Régional,  : lycée agricole de Charolles). 20
- Figure 2.** Schéma conceptuel de la démarche de thèse en quatre étapes : prévision des services fourragers et environnementaux à partir des critères d'aptitude, des états de la végétation, et des descripteurs pédoclimatiques, et des pratiques de gestion. 24
- Figure 3.** Des éléments biotiques et abiotiques aux services rendus par les écosystèmes prairiaux (en rouge les services liés à un couvert permanent et en vert les services dépendant des états de la végétation) (*adapté de Wallace 2007*). 31
- Figure 4.** Classification des services rendus par les écosystèmes prairiaux gérés par l'agriculture et organisés autour de l'exploitation agricole (*adapté de Leroux et al. 2008*). 32
- Figure 5.** Démarche de sélection des services étudiés. 34
- Figure 6.** Morphologie, d'une graminée (a), d'une légumineuse (b) et d'une plante d'une autre famille (diverse) (c). 41
- Figure 7.** Différenciation entre croissance et développement d'une plante. 41
- Figure 8.** Evolution de la proportion de gaines, feuilles et tiges pour une espèce de graminée (Dactyle) (a) et de légumineuse (Luzerne) (b) pour trois cycles de végétation pour le Dactyle et quatre cycles de végétation pour la Luzerne (*Demarquilly et Andrieu 1988*). 42
- Figure 9.** Démarche du travail de thèse en quatre étapes (descripteurs, états de végétation, critères d'aptitude et services) et mise en évidence des liens entre ces quatre étapes. 63
- Figure 10.** Démarche du travail de thèse illustrée par les dispositifs mis en place et les articles scientifiques rédigés. 79
- Figure 11.** Localisation des parcelles étudiées dans le cadre du réseau national, sur un fond de carte représentant la surface toujours en herbe / surface fourragère principale (SFP) (limite des départements issus de l'IGN. *INPL-ENSAIA-INRA. B. Noirtin*). 86
- Figure 12.** Echantillonnage des parcelles selon les pratiques de gestion effectuées, à partir d'un pool de 1500 parcelles recensées dans les enquêtes. 86
- Figure 13.** Schéma récapitulatif des périodes de mesures effectuées sur le réseau de parcelle : quatre prélèvements (2 au printemps, un en été et un en automne) et deux années de mesures. 89
- Figure 14.** Localisation sur le faciès dominant de la parcelle des relevés botaniques complets () et des zones de prélèvements et mises en défens (). 91
- Figure 15.** Illustrations des mises en défens dans le Haut Rhin (photos en haut, Aude Auriou) et dans l'Orne (photo en bas, Michel Harivel). 92
- Figure 16.** Récapitulatif des prélèvements effectués au niveau d'une mise en défens : mesure de composition botanique, de hauteurs d'herbe et coupe de l'herbe. 93
- Figure 17.** Récapitulatif des mesures effectuées sur le terrain pour le réseau national. 94
- Figure 18.** Notation en 13 classes de l'aspect esthétique de la parcelle, en tenant compte des descripteurs visuels (couleur, grain...) et repères phénologiques (durée de la pousse, ...). 95
- Figure 19.** Grille de classification des espèces de graminées en types fonctionnels (A, B, b, C, D, E) selon leur stade de développement (*Cruz et al. 2010*). 98
- Figure 20.** Démarche du travail de thèse illustrée par les dispositifs mis en place et les articles scientifiques rédigés. 105
- Figure 21.** Location of farms where grasslands were studied. 123

<b>Figure 22.</b> Variability of leaf dry matter content (mg g <sup>-1</sup> ) for fourteen species dominance type (SD) identified (cf. tableau 4).	132
<b>Figure 23.</b> Variability of leaf dry matter content (mg g <sup>-1</sup> ) for the twelve floristic composition types (FC) identified (cf. tableau 5).	132
<b>Figure 24.</b> Démarche du travail de thèse illustrée par les dispositifs mis en place et les articles scientifiques rédigés.	147
<b>Figure 25.</b> Monthly rainfall and mean temperature in Marcenat in years 2007 and 2008.	164
<b>Figure 26.</b> Measurements (EF ● (early phenology and fertile area grassland), MF ■ (medium phenology and fertile area grassland) and LP ▲ (late phenology and poor area grassland) and prediction (EF solid line, MF dashed line and LP dotted line) of dry matter yield for 2 years and respectively for first (a), second (b) and third (c) cycles.	171
<b>Figure 27.</b> Measurements (EF ● (early phenology and fertile area grassland), MF ■ (medium phenology and fertile area grassland) and LP ▲ (late phenology and poor area grassland) and prediction (EF solid line, MF dashed line and LP dotted line) of organic matter digestibility for 2 years and respectively for first (a), second (b) and third (c) cycles.	172
<b>Figure 28.</b> Measurements (EF ● (early phenology and fertile area grassland), MF ■ (medium phenology and fertile area grassland) and LP ▲ (late phenology and poor area grassland) and prediction (EF solid line, MF dashed line and LP dotted line) of crude protein content for 2 years and respectively for first (a), second (b) and third (c) cycles.	173
<b>Figure 29.</b> Measurements (EF ● (early phenology and fertile area grassland), MF ■ (medium phenology and fertile area grassland) and LP ▲ (late phenology and poor area grassland) and prediction (EF solid line, MF dashed line and LP dotted line) of medium plant stage for 2 years and respectively for first (a), second (b) and third (c) cycles.	174
<b>Figure 30.</b> Prediction (EF solid line (early phenology and fertile area grassland), MF dashed line (medium phenology and fertile area grassland) and LP dotted line (late phenology and poor area grassland)) of yield of digestible dry matter (OMD*DMY) and yield of crude protein (CP content*DMY) for first (a), second (b) and third cycle (c).	175
<b>Figure 31.</b> Graphique des observés selon les prédicts pour la production d'herbe au prélèvement 1 (P <sub>1</sub> ) (en t MS/ha).	192
<b>Figure 32.</b> Démarche du travail de thèse illustrée par les dispositifs mis en place et les articles scientifiques rédigés.	210
<b>Figure 33.</b> Proposition d'arbre DEXI pour 7 services fourragers et environnementaux.	215
<b>Figure 34.</b> Attribution des seuils pour les services fourragers.	217
<b>Figure 35.</b> Attribution des seuils pour les services environnementaux.	219
<b>Figure 36.</b> Exemple d'évaluation de quatre services fourragers et trois services environnementaux pour quatre types de prairies : des prairies d'altitude extensives (PA1), de plaines et collines très fertilisées (PSC5), de l'ouest humides et intensifiées (PO1) et atlantiques très humides et peu fertilisées (PL1).	221
<b>Figure 37.</b> Illustration photographiques des pictogrammes représentant les 13 classes d'états visuels ( <i>Pa. Fleury 1995</i> ).	223
<b>Figure 38.</b> Exemple d'un calendrier des états visuels pour une parcelle suivie une année ( <i>Pa. Fleury 1995</i> ).	223
<b>Figure 39.</b> Schéma récapitulatif de la démarche de prédiction des services fourragers et environnementaux, avec en vert l'étude des liens entre les descripteurs et les états de la végétation (descripteur et états de la végétation étudiés), en bleu l'étude des liens entre les états de la végétation et les critères d'aptitude (états de la végétation et critères étudiés) et en rouge l'étude des liens entre les critères d'aptitude et les services fourragers et environnementaux (critères et services étudiés).	231
<b>Figure 40.</b> Nombre d'espèces rencontrées dans le réseau de 190 prairies (" <i>réseau national</i> ") en comparaison avec les espèces recensées dans la base de données e-FLORA-sys.	241
<b>Figure 41.</b> Représentation des productions d'herbe des prairies permanentes (en t MS/ha) du dispositif " <i>réseau national</i> " en début de printemps (P <sub>1</sub> en degré jours (DJ)), en fin de printemps (P <sub>2</sub> en degré jours (DJ)), en été (P <sub>3</sub> en semaines) et en automne (P <sub>4</sub> en semaine) en considérant les deux années de suivi sous forme de boîtes à moustache.	242

- Figure 42.** Représentation de la digestibilité des prairies permanentes (en %) du dispositif "réseau national" en début de printemps ( $P_1$ ), en fin de printemps ( $P_2$ ), en été ( $P_3$ ) et en automne ( $P_4$ ) en considérant les deux années de suivi sous forme de boîtes à moustache. 243
- Figure 43.** Etude du lien entre la production en  $P_2$  (en t MS/ha) et la richesse floristique des prairies du réseau. 248
- Figure 44.** Etude du lien entre la dMO en  $P_2$  (en % MS) et la richesse floristique des prairies du réseau. 248

### Liste des tableaux

- Tableau 1.** Caractérisation des types fonctionnels par les traits de vie (TMS : teneur en matière sèche des feuilles ; SSF : surface spécifique foliaire ; DVF : durée de vie des feuilles ; FLO : date de floraison (phénologie) ; Hmax : hauteur maximum), les espèces présentes et leurs caractéristiques (*adapté de Cruz et al. 2010*). 50
- Tableau 2.** Services fourragers, critères, états de la végétation et descripteurs retenus à partir de l'étude bibliographique. 64
- Tableau 3.** Services fourragers recensés à partir des enquêtes réalisées en 2008 dans le cadre de l'action 1 du programme CASDAR. 68
- Tableau 4.** Caractéristiques des parcelles du réseau (pratiques de gestion et caractéristiques du milieu). 88
- Tableau 5.** Détermination des stades de végétation (*adapté de Moore et al. 1991*). 97
- Tableau 6.** Caractéristiques statistiques des équations de calibration en spectrométrie dans le proche infra-rouge utilisées pour estimer la digestibilité à la pepsine-cellulase (dcell), la concentration en protéines (% N) et la teneur en parois cellulaire (%NDF et %ADF). 100
- Tableau 7.** Caractéristiques statistiques des équations de calibration en spectrométrie dans le proche infra-rouge utilisées pour estimer la digestibilité à la pepsine-cellulase (dcell), la concentration en protéines (% N) et la teneur en parois cellulaire (%NDF et %ADF). 102
- Tableau 8.** Management, edaphic and climatic factors available by survey, calculation (e-flora-sys software) and from Meteo France database. 124
- Tableau 9.** Management, edaphic and climatic factors retained for the study of links between those factors and characteristics of vegetation. 125
- Tableau 10.** Number of data (n), mean, minimum, maximum, median and standard deviation data for quantitative characteristics of vegetation. 126
- Tableau 11.** Classification of grasslands according to species categories and main dominating species. 127
- Tableau 12.** Classification of grasslands according to their floristic composition and frequency of presence species of each class of grassland. 128
- Tableau 13.** Main pedoclimatic and management features of the classes of grassland according to the floristic composition typology (types FC1 to FC12). Missing information on features indicate that the variability of the feature within the class is too high. Soil properties are estimated from the values of Ellenberg indexes, N fertilization includes mineral and organic fertilization, stocking rates are calculated from data collected by interviewing farmers. 129
- Tableau 14.** Correlation matrix between vegetation characteristics. Linear regressions were performed between functional characteristics, variance analysis between botanical characteristics (qualitative variable) and functional characteristics (quantitative variables), and a  $\chi^2$  test between types of species dominance and types of floristic composition. 131
- Tableau 15.** Significance of management, edaphic and climatic factors on functional composition (date of flowering, number of oligotrophic species, percentage of entomophily species, and LDMC): stepwise shortlisted factors (main factors) and significant factors (secondary factors). Main factors were classified weight hierarchy in the stepwise. See Table 2 for description of factors. 133

<b>Tableau 16.</b> Significance of management, edaphic and climatic factors on botanical composition (dominance species and floristic composition): stepwise shortlisted factors (main factors) and significant factors (secondary factors). Main factors were classified weight hierarchy in the stepwise. See Table 11 for description of factors.	134
<b>Tableau 17.</b> Matrice de corrélation entre les états de la végétation. Des régressions linéaires ont été effectuées entre les différents variables de la composition fonctionnelle, des analyses de variance entre les variables de la composition botanique et les variables de la composition fonctionnelle, et un test du Khi2 entre les variables de la composition botanique.	141
<b>Tableau 18.</b> Nombre de données (n), moyenne, minimum, maximum, médiane et écart type de la proportion de graminées, légumineuses et diverses.	142
<b>Tableau 19.</b> Significativité des descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion sur la proportion de graminées, légumineuses et diverses. Les descripteurs principaux ont été classés par une hiérarchie de leur poids dans la stepwise.	142
<b>Tableau 20.</b> Récapitulatif des liens entre descripteurs, états de la végétation, critères d'aptitude et services après étude des liens entre descripteurs et états de la végétation.	144
<b>Tableau 21.</b> Definitions of the 13 plant stages used to characterize medium plant stage of the grasslands (adapted from Moore et al., 1991).	165
<b>Tableau 22.</b> Botanical composition (proportion of dry matter, as % with “-“ for absence), plant functional types (PTF) of grasses, unknown and senescent material in EF (early phenology and fertile area) MF (medium phenology and fertile area) and LP (late phenology and poor area) grasslands. Values are averages for the three samples analysed in 2007.	166
<b>Tableau 23.</b> Average values for the proportion of grasses, legumes and forbs, of senescent and unknown material and of plant functional type A (PFT A), B (PFT B), b (PFT b), C (PFT C) and E (PFT E) of the three grasslands, with ANOVA significance levels for the effect of grassland type (G).	167
<b>Tableau 24.</b> Least squares means ( $\pm$ SEM), significance of fixed effects and parameter estimates for the relationship of dry matter yield (DMY) (t DM.ha <sup>-1</sup> ), organic matter digestibility (OMD) (g.g <sup>-1</sup> ), crude protein concentration (CP) (g.kg <sup>-1</sup> ) and medium plant stage (MPS) with the sum of temperature for the three grassland types (G) during the first vegetation cycle.	168
<b>Tableau 25.</b> Least squares means ( $\pm$ SEM), significance of fixed effects and parameter estimates for the relationship of dry matter yield (DMY) (t DM.ha <sup>-1</sup> ), organic matter digestibility (OMD) (g.g <sup>-1</sup> ), crude protein concentration (CP) (g.kg <sup>-1</sup> ) and medium plant stage (MPS) with the regrowth days for the three grassland types (G) during the second vegetation cycle.	169
<b>Tableau 26.</b> Least squares means ( $\pm$ SEM), significance of fixed effects and parameter estimates for the relationship of dry matter yield (DMY) (t DM.ha <sup>-1</sup> ), organic matter digestibility (OMD) (g.g <sup>-1</sup> ), crude protein concentration (CP) (g.kg <sup>-1</sup> ) and medium plant stage (MPS) with the regrowth days for the three grassland types (G) during the third vegetation cycle.	170
<b>Tableau 27.</b> Caractéristiques statistiques des équations de calibration en spectrométrie dans le proche infra-rouge utilisées pour estimer la digestibilité à la pepsine-cellulase (dcell) et la concentration en protéines (% N).	184
<b>Tableau 28.</b> Description des critères d'aptitudes fourragers mesurés sur les 190 parcelles pour les deux années: valeur minimum (min), maximum (max), moyenne, médiane et quartile 1 et 3 pour les critères de production (en t MS/ha), de digestibilité de la matière organique (dMO en %), de teneur en matières azotées (MAT en g/kg de MS), de production annuelle (en t de MS/ha), de croissance au printemps (en kg MS/ha/ °C jours) et d'évolution de dMO ou de MAT (en %/°C jours ou g/kg MS/ °C jours).	187
<b>Tableau 29.</b> Description des états de végétation mesurés sur les 190 parcelles pendant les deux années : valeur minimum (min), maximum (max), moyenne, médiane et quartile 1 et 3 pour la proportion de graminées, légumineuses et diverses (%), la proportion de types fonctionnels (TF) A, B, b, C et D (%), la teneur en matière sèche, (%) et le stade moyen de végétation.	188
<b>Tableau 30.</b> Résultat des régressions multiples entre la production d'herbe (en t de MS/ha) et la composition fonctionnelle (proportion de légumineuses et diverses, types fonctionnels (TF) B, b et C, le stade moyen de végétation, la teneur en matière sèche (MS) pour les trois hypothèses (H1, H2, H3) et pour les prélèvements	

de printemps (début (P1) et fin (P2)), d'été (P3), d'automne (P4), pour la production annuelle et pour la croissance entre P1 et P2.	191
<b>Tableau 31.</b> Résultat des régressions multiples entre la digestibilité de la matière organique (dMO en %) et la composition fonctionnelle (proportion de légumineuses et diverses, types fonctionnels (TF) B, b et C, le stade moyen, et la teneur en matière sèche (MS)) pour les trois hypothèses (H1, H2, H3) et pour les prélèvements de printemps (début (P1) et fin (P2)), d'été (P3), d'automne (P4) et pour l'évolution entre P1 et P2.	194
<b>Tableau 32.</b> Résultat des régressions multiples entre la teneur en matières azotées (MAT en g/kg) et la composition fonctionnelle (proportion de légumineuses et diverses, types fonctionnels (TF) B, b et C, stade moyen, teneur en matière sèche (MS)) pour les trois hypothèses (H1, H2, H3) et pour les prélèvements de printemps (début (P1) et fin (P2)), d'été (P3), d'automne (P4) et pour l'évolution entre P1 et P2.	196
<b>Tableau 33.</b> Récapitulatif des liens mis en évidence entre la composition fonctionnelle (types fonctionnels (TF) B, b et C, proportion de graminées légumineuses et diverses, teneur en matière sèche (MS) et stade moyen) et les critères d'aptitude fourragers (production, digestibilité (dMO) et teneur en matière azotée totale (MAT)).	206
<b>Tableau 34.</b> Exemple d'agrégation entre deux critères ou attributs et résultats de la règle de décision.	212
<b>Tableau 35.</b> Critères d'aptitude à prendre en compte dans la démarche multicritères d'évaluation des services fourragers et environnementaux des prairies permanentes.	214
<b>Tableau 36.</b> Classification des parcelles selon leur aspect visuel au cours du temps et calendriers des états visuels pour chaque classe.	225

## Liste des encadrés

<b>Encadré 1.</b> Logiciel e-flora-sys	90
--	----

## Liste des annexes

<b>Annexe 1.</b> Enquête "Caractérisation des Prairies Permanentes"	287
<b>Annexe 2.</b> Article proposé aux 3R sur les fonctions fourragères des prairies permanentes	297
<b>Annexe 3.</b> Liste des espèces aromatiques recensées à partir de la bibliographie	301
<b>Annexe 4.</b> Notation de l'aspect visuel de la parcelle selon la méthode de Fleury (1995)	303
<b>Annexe 5.</b> Etude des liens entre la composition fonctionnelle et les critères d'aptitude des services fourragers : modèles de prédiction complets	306
<b>Annexe 6 :</b> Construction d'une typologie des prairies permanentes : document de présentation	309



## GLOSSAIRE ET ABREVIATIONS

ACM : Analyse en Composantes Multiples  
ADF : Acid Detergent Fibre, teneur en lignocellulose  
AGPIs : Acides Gras Poly-Instaurés  
AOP : Appellations d'Origine Protégées  
ARDAR : Association Régionale de Développement Agricole et Rural  
CA : Chambres d'Agriculture  
CASDAR : Compte d'Affectation Spécial "Développement Agricole et Rural"  
CCA : Canonical Correspondance Analysis  
CIFRE : Convention Industrielle de Formation par la REcherche  
CO<sub>2</sub> : Dioxyde de Carbone  
CP : Crude Protein  
DM : Dry Matter  
dMO : digestibilité de la matière organique  
DMY : Dry Matter Yield  
DVF : Durée de Vie des Feuilles  
EDE : Etablissement Départemental de l'Elevage  
EF : Early Fertile (Type of grassland)  
ET: Evapotranspiration  
ETP : EvapoTransPiration  
FC : Floristic Composition  
FE : Fauche Exclusive  
Flo : date de Floraison  
ENSAIA : École Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires  
G : Grassland  
GIS : Groupement d'Intérêt Scientifique  
Ha : hectare  
Hmax : Hauteur maximum  
INPL : Institut National Polytechnique de Lorraine  
INRA : Institut National de la Recherche Agronomique  
K : Potassium  
LAE : Laboratoire Agronomie et Environnement  
LDMC : Leaf Dry Matter Content  
LLS : Leaf Life Span  
LP : Late Poor (type of grassland)  
LU: Lifestock Unit  
M : Mixte  
MADM : Multi-Attribute Decision Making  
MAT : Matière Azotée Totale  
MCA : Multiple Component Analysis  
MCDA : Multi-Criteria Decision Analysis  
MF : prairie à phénologie Moyenne et Fertile / Medium Fertile (tye of grassland)  
MODM: Multi-Objective Decision Making  
MPLS: Modified Partial Least Square  
MPS: Medium Plant Stage (stade moyen)  
MS : Matière Sèche  
N : Nitrogen / Azote  
NDF : Neutral Detergent Fibre  
NIRS : Near-Infrared Reflectance Spectroscopy

NNI: Nitrogen Nutrient Index  
OMD : Organic Matter Digestibility  
P : Phosphorus  
PCA : Principal Component Analysis  
PDRH : Plan de Développement Rural et Hexagonal  
PE : Pâturage Exclusif  
PF : prairie à phénologie Précoce et Fertile  
PFT : Plant Functional Types  
PNR : Parc Naturel Régional  
RAPA : Relation Animal Plantes Aliments  
RMSD : Residual Mean Square Deviation  
RD: Regrowth Day  
S: Summer  
SAU : Surface Agricole Utile  
SD: Species Dominance  
SEM : Standard Error of the Mean  
SFP : Surface Fourragère Principale  
SLA : Specific Leaf Area  
SPIR : Spectrométrie de Proche Infra Rouge  
SSF : Surface Spécifique Foliaire  
ST: Somme de Température / Sum of Temperature  
SUACI : Servie d'Utilité Agricole à Compétences Inter départementales  
T : Temperature  
TF : Types Fonctionnels  
TMS : Teneur en Matière Sèche  
TP : prairie à phénologie Tardive et Pauvre (peu fertile)  
U : Unité de mesure pour la fertilisation  
UGB: Unité Gros Bovins  
UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature  
W : Winter

## Du contexte à la problématique

### 1. Quelle place pour les prairies en France ?

Les prairies occupent une place considérable en France : en 2009 elles représentaient 13,1 millions d'hectares soit 44,5% de la SAU<sup>1</sup> (Agreste 2011 ; Devun et Legarto 2011). Selon le ministère de l'agriculture, les prairies au sens général englobent les prairies temporaires, les prairies artificielles et les prairies permanentes, dites "naturelles". Les prairies temporaires sont semées depuis moins de 6 ans et les prairies artificielles sont un type particulier de prairie temporaire qui est exclusivement composé de légumineuses pures (luzerne, trèfle, ...). Les prairies permanentes, quant à elles, correspondent à des parcelles où la végétation spontanée est herbacée ou à des parcelles issues d'un semis plus ou moins récent : au minimum 6 ans du point de vue des statistiques mais souvent implantées il y a plusieurs décennies ou siècles (Agreste 2000).

Les prairies permanentes représentent des surfaces importantes en Europe et en France puisqu'en 2008 elles occupaient respectivement 176 millions d'hectares (ha) et 9,9 millions ha (7,4 millions ha pour les prairies productives et 2,5 millions ha pour les parcours et landes (Devun et Legarto 2011)) (FAOSTAT 2011), ce qui représentait 33,7% de la SAU française (Agreste 2011). Avec une part importante dans la SFP<sup>2</sup> (67,0%, Agreste 2011), elles ont un rôle majeur dans beaucoup de systèmes fourragers et peuvent être l'unique ressource fourragère (cas des exploitations d'altitude). Les prairies permanentes valorisent souvent des surfaces difficilement ou non cultivables notamment du fait des problèmes de relief ou d'hydromorphie. A l'opposé, elles peuvent se situer dans des conditions extrêmement favorables à la croissance de l'herbe, notamment en climat océanique. Elles contribuent de façon importante à l'alimentation des troupeaux d'herbivores : en 2009 la production récoltée à partir des prairies permanentes s'élevait à 41.2 millions de tonnes de matière sèche, soit 47.9% de la production fourragère française (Agreste 2011). Dans les systèmes herbagers, les prairies permanentes favorisent une production fourragère à faible coût notamment par la réduction des intrants ou du temps de travail mais peuvent également être gérées de manière intensive avec beaucoup d'intrants. Elles sont uniquement pâturées, fauchées ou encore utilisées en usage mixte (pâturage et fauche) : en 1998, 56% des prairies permanentes étaient uniquement pâturées, 8% uniquement fauchées et 36% utilisées en usage mixte (Agreste 2000). Pour optimiser leur gestion, des outils d'aide ont été développés : l'utilisation des

---

<sup>1</sup> SAU : Surface Agricole Utile

<sup>2</sup> SFP : Surface Fourragère Principale

quantités d'herbe disponible ou le raisonnement par les surfaces (Institut Technique de l'Élevage Bovin 1991) ont été mis en place pour aider à la gestion du pâturage. Des outils techniques ont également été introduits comme l'utilisation de l'herbomètre (Defrance *et al.* 2004), des modèles de gestion du pâturage telle Pâtur'IN (Delaby *et al.* 2001) ou des typologies régionale (Ph. Fleury *et al.* 1996 ; Petit *et al.* 2004). Récemment, la gestion des surfaces par l'utilisation des types fonctionnels a été introduite (Cruz *et al.* 2002, 2010).

Les prairies permanentes remplissent d'autres rôles que celui de l'alimentation animale. En effet, en plus de leur intérêt agronomique reconnu, elles procurent des bénéfices environnementaux répondant aux attentes de la société : préservation de la biodiversité animale et végétale (Farruggia *et al.* 2008), puits de carbone (Soussana et Lüscher 2007), limitation du risque d'érosion, prévention des risques de pollution des eaux de surface et des eaux souterraines (nitrates, pesticides), contrôle des inondations (Leroux *et al.* 2008). Elles constituent de plus une ressource culturelle et contribuent au façonnement du paysage (Beranger 2002 ; Parris 2002 ; Hopkins et Holtz 2006 ; Leroux *et al.* 2008). Ces intérêts environnementaux sont d'ailleurs souvent mis en avant dans des productions de qualité comme les AOP<sup>3</sup>. Ainsi maintenir et développer la multifonctionnalité des prairies permanentes constitue un enjeu important pour le monde agricole (Mieville-Ott 2002).

Malgré l'intérêt agronomique et environnemental des prairies permanentes, ces surfaces ont souvent été retournées depuis 50 ans, au profit de productions plus attractives en termes de rendement (maïs ensilage, céréales, prairies temporaires...). Ce mouvement a été particulièrement fort entre 1970 et 2000. La diminution des surfaces en prairies permanentes peut s'expliquer par une très forte disparité entre le soutien public aux cultures et aux prairies mais aussi par un déficit de connaissances techniques et scientifiques sur la valeur agronomique des prairies ou sur l'optimisation de leur gestion et par un manque de diffusion des savoir-faire existants. Ainsi, par exemple, la variabilité de la valeur alimentaire des prairies permanentes est mal caractérisée et les références disponibles dans les tables INRA (INRA 2007) sont issues d'études anciennes, ne concernant que quelques régions (plaine de Normandie, moyenne montagne d'Auvergne, Alpes du Nord). Les niveaux de production de matière sèche et leurs évolutions intra- et interannuelle sont également estimés avec une faible précision dans de nombreux contextes.

La volonté de revaloriser les prairies permanentes dans les systèmes d'élevage s'est traduite au début des années 2000 par l'inflexion de la Politique Agricole Commune, et des

---

<sup>3</sup> AOP : Appellation d'Origine Protégée

dispositions du Grenelle de l'Environnement (en particulier la trame verte). L'Union Européenne a donc demandé à ses états membres de conserver leurs surfaces en prairie permanente, et le gouvernement français a inscrit en 2007 dans son plan de développement rural et hexagonal (PDRH) un système d'aides financières aux agriculteurs en vue de préserver des prairies de qualité (Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche, de la ruralité et de l'aménagement du territoire 2007). Ainsi, mieux connaître la valeur des prairies permanentes, en impliquant l'ensemble des acteurs de la recherche, de la formation, du développement agricole et les éleveurs dans cette démarche, apparaît comme un élément nécessaire pour redonner une place plus importante à ces surfaces dans les systèmes herbagers et pour optimiser leur gestion.

## 2. Un programme pour revaloriser les prairies permanentes

Afin de revaloriser les prairies permanentes dans les systèmes fourragers des élevages herbivores français, un programme CASDAR<sup>4</sup> "Prairies Permanentes", financé par le Ministère de l'Agriculture, a été mis en place en 2008. Il a rassemblé des partenaires agricoles représentant les grandes régions herbagères en France<sup>5</sup> (Figure 1). Intitulé *les prairies permanentes françaises au cœur d'enjeux agricoles et environnementaux : de nouveaux outils pour une nouvelle approche de leur gestion*, ce programme avait pour objectif d'apporter des références sur les services des prairies permanentes dans les systèmes fourragers et sur leur valeur fourragère et environnementale au cours de la saison. L'objectif finalisé de ce programme était d'intégrer ces références dans un outil de caractérisation de la valeur agronomique et environnementale des prairies permanentes (typologie nationale), mis à disposition des conseillers agricoles, afin d'aider les éleveurs à mieux gérer ces surfaces dans les systèmes fourragers, en tenant compte de leur multifonctionnalité.

Ce programme national porté par l'Institut de l'Elevage, a associé des organismes techniques et gestionnaires (18 CA<sup>6</sup>, 1 EDE, 1 GIS, 1 ARDAR, 1 PNR, 1 lycée agricole) et des

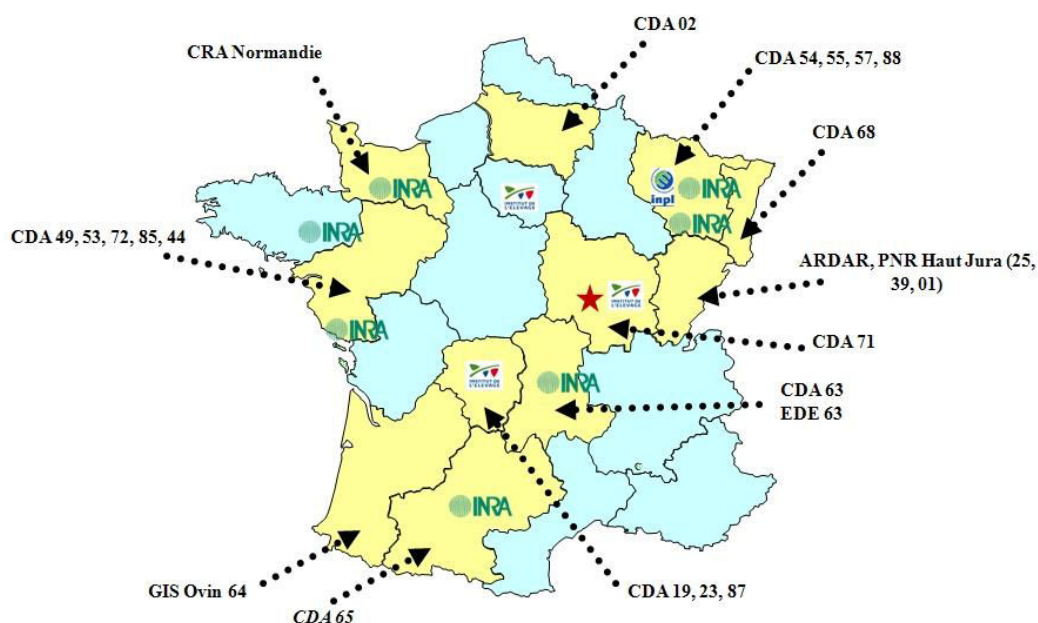
---





<sup>4</sup> CASDAR : Compte d'Affectation Spécial "Développement Agricole et Rural"

<sup>5</sup> Sauf le massif alpin qui avait déjà mis en place un programme sur le sujet dans le cadre du SUACI-GIS Alpes du Nord

<sup>6</sup> CA : Chambres d'Agriculture ; EDE : Etablissement Départemental d'Elevage ; GIS : Groupement d'Intérêts Scientifiques ; ARDAR : Association Régionale de Développement Agricole et Rural ; PNR : Parc Naturel Régional

organismes de recherche et d'enseignement supérieur (INRA, INPL<sup>7</sup>) (Figure 1). Il est articulé en trois actions :



**Figure 1. Localisation des partenaires du programme CASDAR Prairies Permanentes** (  : Institut de l'Élevage ;  : centres INRA ;  : Institut National Polytechnique de Lorraine ; ARDAR : Association Régionale pour le Développement Agricole et Rural ; CDA : Chambre Départementale d'Agriculture ; CRA : Chambre Régionale d'Agriculture ; EDE : Etablissement Départemental d'Élevage ; GIS : Groupement d'Intérêt Scientifique ; PNR : Parc Naturel Régional,  : lycée agricole de Charolles).

- Action 1 : **analyse des services et des modes d'utilisation des prairies permanentes**. Il s'agissait de comprendre à quoi servent ces surfaces et comment elles sont gérées. Pour cela, 78 exploitations herbagères représentant les principaux systèmes d'élevage présents sur les zones étudiées (bovin lait et viande, ovin lait et viande) ont été enquêtées en 2008 (Annexe 1). L'objectif des enquêtes était d'identifier le rôle attribué aux prairies permanentes par les éleveurs ainsi que le mode d'utilisation de ces surfaces. Au total, 1500 parcelles ont été recensées. Des informations quantifiables ou à dire d'éleveurs, concernant l'utilisation et les caractéristiques des prairies permanentes ont été récoltées : caractéristiques de sol (régime hydrique, profondeur...), pratiques de gestion (fertilisation, types d'animaux, durée de pâturage...), localisation de la parcelle (exposition, ...). A partir de ces enquêtes, un travail de statistiques et d'expertise a permis d'identifier les principaux

<sup>7</sup> INRA : Institut Nationale de la Recherche Agronomique ; INPL : Institut National Polytechnique de Lorraine

services fourragers rendus par les prairies permanentes et ce, pour l'ensemble des systèmes d'élevage concernés par l'enquête ;

- Action 2 : **acquisition de références sur les prairies permanentes.** Il s'agissait de caractériser les prairies permanentes par des valeurs agronomiques et environnementales à partir du suivi de leur production, de leur valeur alimentaire et de leur composition botanique. Pour cela, un réseau de 190 parcelles a été construit à partir des 1500 parcelles recensées dans le cadre de l'action 1. L'échantillonnage a été réalisé selon la conduite des prairies et leur localisation géographique. Les parcelles du réseau ont fait l'objet d'un suivi à différentes périodes de l'année selon un protocole commun et ce, durant 2 ans. Ce suivi a été mis en œuvre par des experts pour les relevés floristiques, par les techniciens (CA, EDE, ...) pour les observations et les prélèvements d'herbe, par les stations expérimentales de l'Institut de l'Élevage, de l'INRA et le laboratoire INRA de l'équipe RAPA<sup>8</sup> de l'unité herbivore pour le conditionnement des échantillons et les mesures de valeur alimentaire et de composition botanique.
- Action 3 : **construction d'une typologie des prairies permanentes.** Les données et informations acquises dans les deux actions précédentes ont été combinées dans un outil d'aide à la gestion. Les prairies ont été regroupées selon leurs caractéristiques de végétation, puis selon leur valeurs fourragères (production, valeur nutritive) et environnementales : 19 types de prairies permanentes ont ainsi été identifiés. Afin d'être utilisé par l'ensemble des acteurs du milieu agricole, cet outil d'aide à la gestion des prairies permanentes est basé sur une entrée simple : le milieu et les pratiques de gestion.

### 3. Un travail de thèse au sein d'une démarche de recherche et développement

Mon travail de thèse était inscrit dans le programme CASDAR, en explorant les questions scientifiques posées par les enjeux de ce programme. Ce travail a fait l'objet d'une collaboration entre l'Institut de l'Élevage (service Fourrages et Conduite des Troupeaux Allaitants), l'INRA de Clermont Ferrand (Unité de Recherches sur les Herbivores, équipe RAPA) et l'ENSAIA<sup>9</sup> de l'INPL (Laboratoire Agronomie et Environnement (LAE)).

---

<sup>8</sup> RAPA : Relation Animal Plantes Aliments

<sup>9</sup> ENSAIA : École Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires

Employée par l'Institut de l'Élevage (thèse CIFRE<sup>10</sup>), j'ai contribué à la réalisation du programme CASDAR, notamment en tant qu'animatrice de l'action 2. Pour cela, j'ai assuré le suivi du réseau de parcelles et des expérimentations durant les deux années ainsi que l'animation de ce réseau. Ce travail effectué en partenariat avec des organismes de développement agricole était basé sur une approche de terrain : le suivi des parcelles du réseau a donc été effectué en exploitations agricoles, ce qui nous permis d'étudier des parcelles réellement utilisées dans les systèmes fourragers de ces exploitations. Ces expérimentations de terrain ont constitué un des dispositifs de mon travail de thèse. Du fait de son lien étroit avec le programme CASDAR, ce travail de thèse était également associé à la production d'un outil de conseil et de diagnostic (typologie). Les résultats de cette thèse ont permis de construire et d'alimenter cet outil.

L'enjeu du travail de thèse est de mieux comprendre, à l'échelle de la parcelle, les liens entre les services que les prairies permanentes peuvent rendre et les caractéristiques de la végétation, du milieu et des pratiques de gestion. Ceci permettra d'améliorer la gestion des prairies permanentes pour un bénéfice économique (meilleure estimation de la valeur agricole des prairies permanentes), technique (optimisation de la gestion des prairies permanentes) et environnemental (meilleure estimation de la valeur environnementale). Scientifiquement, le but était de construire une méthode pour prévoir ces services. **L'objectif de la thèse est ainsi d'identifier les descripteurs pédoclimatiques et les pratiques de gestion ainsi que les états de la végétation pertinents permettant de prédire les services rendus par les prairies permanentes.** Ces services peuvent avoir un intérêt pour la production agricole ou un intérêt environnemental. Il s'agit de construire une méthode de prévision des services rendus par les prairies permanentes à partir de facteurs pédoclimatiques, des pratiques de gestion et des états de la végétation des prairies permanentes. Des travaux ont été effectués sur les services écosystémiques des prairies et les services rendus à l'homme et à la nature ont été identifiés, notamment dans le cadre du Millenium Ecosystem Assesment (2005). Cependant, l'évaluation de ces services reste difficile à faire. Ce travail de thèse a pour objectif de contribuer à évaluer une partie de ces services écosystémiques.

Pour répondre à cet objectif, nous avons structuré notre démarche en plusieurs étapes, en caractérisant dans un premier temps les services étudiés (Figure 2). Ces services fourragers et

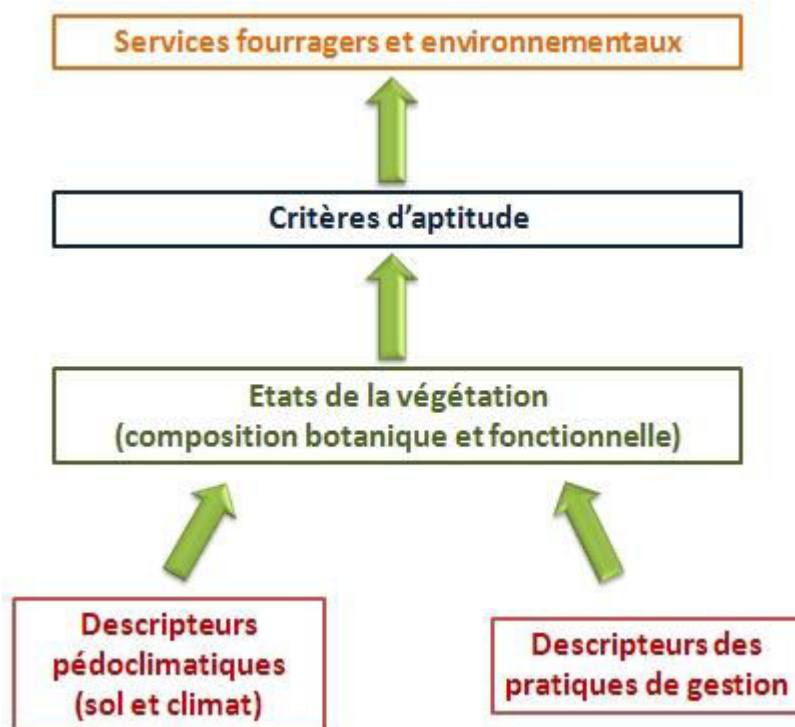
---

<sup>10</sup> CIFRE : Convention Industrielle de Formation par la REcherche



environnementaux ont été identifiés par un travail d'enquêtes et de bibliographie. Pour qu'un service soit rempli, il faut qu'une ou plusieurs conditions soient atteintes. Nous avons donc défini des **"critères d'aptitude"** pour que ces conditions soient remplies (Figure 2). Par exemple le service *"du foin pour le lait"* dépend au moins de deux critères d'aptitude, la production de biomasse et la valeur nutritive du fourrage (Ph. Fleury 1994). Ces critères d'aptitude ont été évalués et quantifiés dans les dispositifs expérimentaux mis en œuvre dans la thèse. Puis nous avons recherché les états de la végétation qui permettent le mieux d'expliquer les variations des critères d'aptitude (Jeangros et Schmid 1991 ; Baumont *et al.* 2008 ; Andueza *et al.* 2010 ; Cruz *et al.* 2010). Il existe plusieurs manières de décrire la végétation. En effet, la végétation peut être décrite par la composition botanique ou taxonomique, qui évalue la présence et la dominance en espèces, ou par les caractéristiques fonctionnelles des espèces qui permettent de les regrouper selon leur fonction dans l'écosystème (Duru *et al.* 2007). Nous avons donc considéré deux catégories d'états de la végétation liées soit à la composition botanique soit à la composition fonctionnelle de la prairie. Par exemple, la composition fonctionnelle comme la proportion en différents types de graminées, de légumineuses et d'autres plantes (diverses) a un effet sur le critère de production (Baumont *et al.* 2008). Ainsi les services sont prévus par des critères d'aptitude, eux-mêmes évalués par des états de la végétation (Figure 2). Enfin, ces états de la végétation dépendent des conditions pédoclimatiques et des pratiques de gestion des parcelles (Diaz *et al.* 1998 ; Lavorel et Garnier 2002 ; Kohouten *et al.* 2005 ; Duru *et al.* 2007). Nous avons donc recherché les facteurs ainsi que les descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion qui permettent de prévoir les états de végétation. En écologie, un facteur est un élément ou une condition de l'environnement susceptible d'agir directement sur un organisme vivant (Delpech *et al.* 1985), alors qu'un descripteur est un élément ou une condition caractérisant l'environnement (Daget et Gordon 1982). Les conditions pédoclimatiques et les pratiques de gestion peuvent être des facteurs ou descripteurs selon ceux considérés. **Par souci de clarté et de compréhension, nous regrouperons les deux termes sous l'unique terme "descripteur"**, en considérant un descripteur comme tout élément ou condition du climat, du sol ou des pratiques de gestion mesurable au niveau de la parcelle. Par exemple, les descripteurs de la proportion de graminées, légumineuses et diverses peuvent être les pratiques de gestion (fertilisation, ...) et des conditions de sol (fertilité, humidité, ...). Ainsi, nous avons distingué les descripteurs 1) édaphiques, caractérisant les conditions de sol sur la parcelle, 2) climatiques, relatifs aux conditions climatiques au niveau de la parcelle et 3) des pratiques de gestion effectuées par l'éleveur sur la parcelle. Les descripteurs de sol et de

climat seront regroupés ensemble et appelés descripteurs pédoclimatiques (Figure 2). Notre démarche est donc organisée en quatre étapes, partant des mesures des descripteurs à la parcelle pour prévoir les services fourragers et environnementaux des prairies permanentes (Figure 2).



**Figure 2. Schéma conceptuel de la démarche de thèse en quatre étapes : prévision des services fourragers et environnementaux à partir des critères d'aptitude, des états de la végétation, et des descripteurs pédoclimatiques, et des pratiques de gestion.**

Dans ce manuscrit de thèse nous ferons dans un premier temps, un état des connaissances acquises sur les services fourragers et environnementaux des prairies permanentes ainsi que sur les aptitudes des prairies à rendre ces services. Cela nous amènera à nous intéresser aux états de la végétation. Avant de définir ce que l'on entend par la composition taxonomique et fonctionnelle, nous rappellerons les bases de fonctionnement du végétal et son lien avec la production et valeur nutritive. Ensuite nous étudierons les états de la végétation en considérant leurs liens avec les critères d'aptitude et services. Nous identifierons également les liens entre les états de la végétation et les descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion. Après avoir effectué un état des lieux des travaux sur ces différents points, nous

préciserons les services, critères d'aptitude, états de la végétation et descripteurs étudiés. Puis, nous rappellerons les objectifs et enjeux du travail de thèse, décrirons la démarche de thèse et poserons les hypothèses. L'ensemble de ce contenu constituera la partie 1 du manuscrit. Dans une deuxième partie, nous présenterons les dispositifs expérimentaux et les résultats de la thèse. Après avoir présenté dans un premier chapitre les dispositifs expérimentaux mis en œuvre, nous étudierons 1) les liens entre les descripteurs et états de la végétation, dans le chapitre 2, 2) les liens entre les états de la végétation et les critères d'aptitude, dans le chapitre 3 et 3) les liens entre les critères d'aptitude et les services, dans le chapitre 4. Enfin, dans une troisième et dernière partie, nous discuterons de l'ensemble des résultats.



# **Partie 1**

**Aptitude des prairies  
permanentes à rendre des  
services fourragers et  
environnementaux**



## A. Etat de l'art

### I. Les services fourragers et environnementaux rendus par les prairies permanentes

#### 1. Fonctions ou services des prairies permanentes ?

Lorsqu'on parle d'un "service" d'une prairie, il faut être clair sur les termes car il existe souvent des confusions entre "service" et "fonction" d'une prairie. En agronomie comme en écologie, les deux termes sont employés, parfois en les distinguant clairement, parfois recouvrant partiellement ou totalement les mêmes notions. En écologie, la notion de fonction peut ainsi renvoyer soit aux services rendus par les prairies, considérées comme un écosystème (production de biomasse, séquestration de carbone, ...) soit à des processus de fonctionnement des écosystèmes prairiaux (production primaire, cycle des éléments, ...). Il est donc important de clarifier ces deux termes.

Dans le langage commun le terme "fonction" est défini comme le rôle ou l'activité d'une chose dans un ensemble<sup>11</sup>.

Dans le **domaine agronomique**, la notion de fonction est claire. Ph. Fleury (1994) définit la **fonction**, à l'échelle d'une parcelle, comme le rôle principal qui lui est assigné par l'agriculteur. Les fonctions parcellaires rendent compte de la contribution d'une parcelle dans l'élaboration du système fourrager : par exemple, la fonction "*du foin pour le lait*" traduit l'importance de la parcelle dans la contribution de la production laitière par le fourrage conservé (Ph. Fleury 1994). L'éleveur attend donc de cette prairie une quantité et qualité de foin suffisante pour produire du lait. Les fonctions identifiées dans le travail de Ph. Fleury (1994) s'apparentent à des services rendus par la prairie à l'homme. En agronomie, **les termes fonctions et services sont donc synonymes**.

**En écologie**, la définition de "**fonction des écosystèmes**" peut recouvrir différents aspects. Selon Wallace (2007), le terme est utilisé soit pour décrire le fonctionnement des écosystèmes, caractérisé par les processus écologiques (recyclage des flux d'énergie et des nutriments, ...), soit pour décrire les bénéfices obtenus des écosystèmes par les humains. Un écosystème est caractérisé par les interactions complexes entre des éléments, ici biotiques (organismes vivants) et abiotiques (climat, sol) alimentant des processus, qui conduisent à un résultat défini, à savoir un service (Figure 3). Par exemple, l'habitat est à considérer comme

---

<sup>11</sup> Définition du dictionnaire Larousse (<http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/fonction>)

un ensemble d'éléments biotiques et abiotiques qui alimente les processus de reproduction et de développement des organismes vivants au sein de l'habitat concerné. Les processus peuvent s'exprimer en taux (fixation d'azote, flux de pollen...) et on distingue ceux qui sont liés :

- à l'eau : autoépuration de l'eau, écoulement de l'eau... ;
- au sol : formation de la structure des sols, décomposition de la matière organique... ;
- à l'air : échanges gazeux... ;
- aux organismes vivants : reproduction et croissance des plantes, transfert de pollen, interactions biotiques (parasitisme, prédation, compétition...), ...

En écologie, il apparaît donc plus judicieux d'utiliser d'une part la notion de processus pour décrire le fonctionnement de l'écosystème et d'autre part la notion de service pour décrire les bénéfices agronomiques et écologiques produits par l'écosystème prairial (Wallace 2007). La définition du terme "service" fait l'objet de nombreux débats en écologie (Wallace 2007 ; Costanza 2008 ; Fisher *et al.* 2009). En effet, trois définitions sont utilisées pour définir ce terme (Fisher *et al.* 2009) :

- ensemble des processus et conditions à travers les écosystèmes naturels, permettant le maintien et la réalisation de la vie humaine (Daily 1997) ;
- bénéfiques pour l'homme dérivant directement ou indirectement des fonctions des écosystèmes (Nichols *et al.* 2008) ;
- bénéfiques que l'homme obtient des écosystèmes (Millenium Ecosystem Assesment 2005). Cette définition a été adoptée par plusieurs auteurs (Balvanera *et al.* 2006 ; Wallace 2007; Costanza 2008 ; Leroux *et al.* 2008). Certains d'entre eux apportent des nuances en considérant qu'un service n'est pas un bénéfice, au sens où le bénéfice a un impact explicite sur les changements du bien être humain (plus de nourriture, moins d'inondations...) (Fisher et Turner 2008). Un service est alors caractérisé par les propriétés des écosystèmes permettant de produire le bien être de l'homme. Par ailleurs certains auteurs distinguent les services intermédiaires et les services finaux, en considérant les services finaux comme les composants de la nature, directement appréciables, consommables ou utilisés pour la production du bien être de l'homme (Boyd et Banskaf 2007; Wallace 2007 ; Costanza 2008 ; Fisher *et al.* 2009).



Dans notre travail, nous adopterons cette troisième définition pour caractériser le terme service car c'est celle qui est la plus couramment utilisée en écologie. Nous considérerons donc les services comme les propriétés des écosystèmes permettant de produire le bien être de l'homme ou de la nature (Fisher et Turner 2008). Chaque service est ainsi associé à des processus eux mêmes dépendants d'éléments biotiques et abiotiques (Figure 3). Par souci de clarté, nous emploierons le terme "service" à la fois dans le domaine agronomique et écologique, même s'il n'y a pas d'ambiguïté en agronomie.

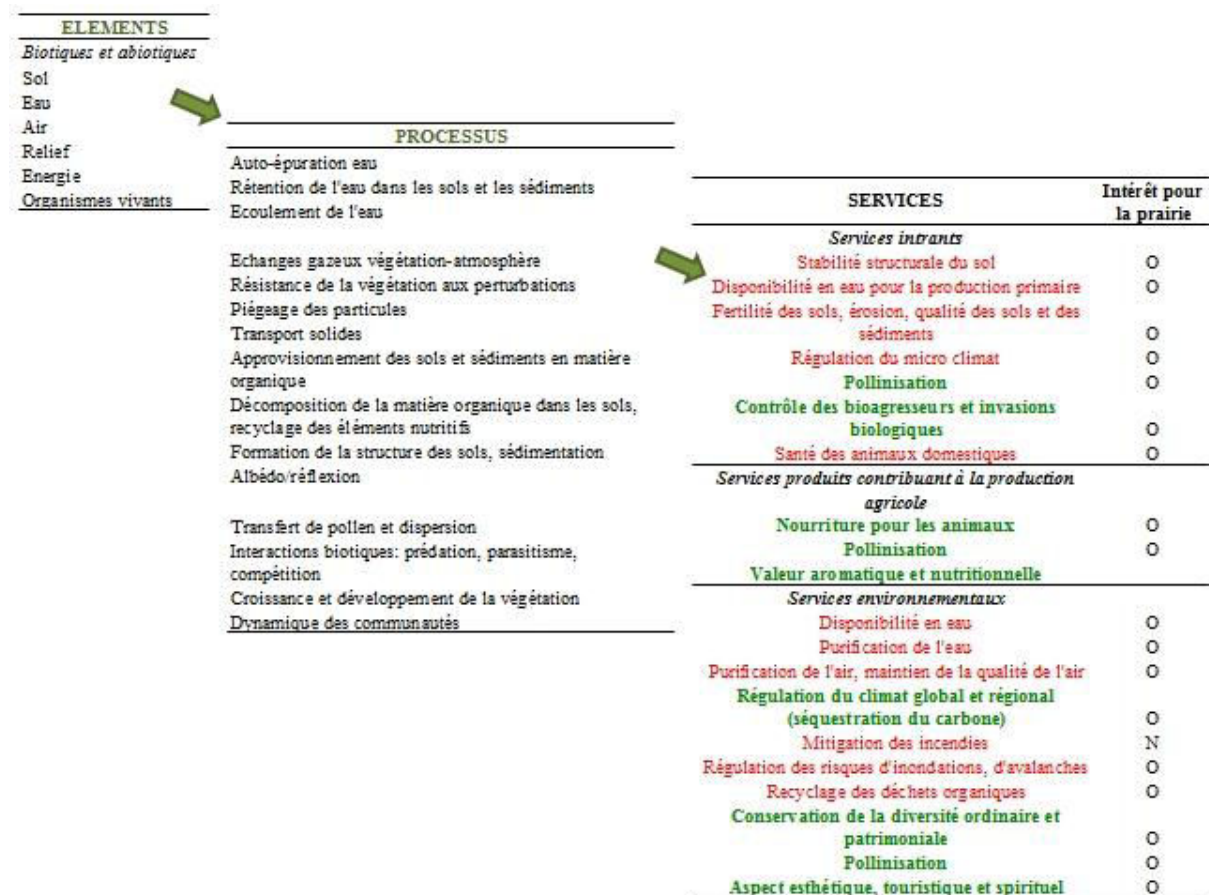
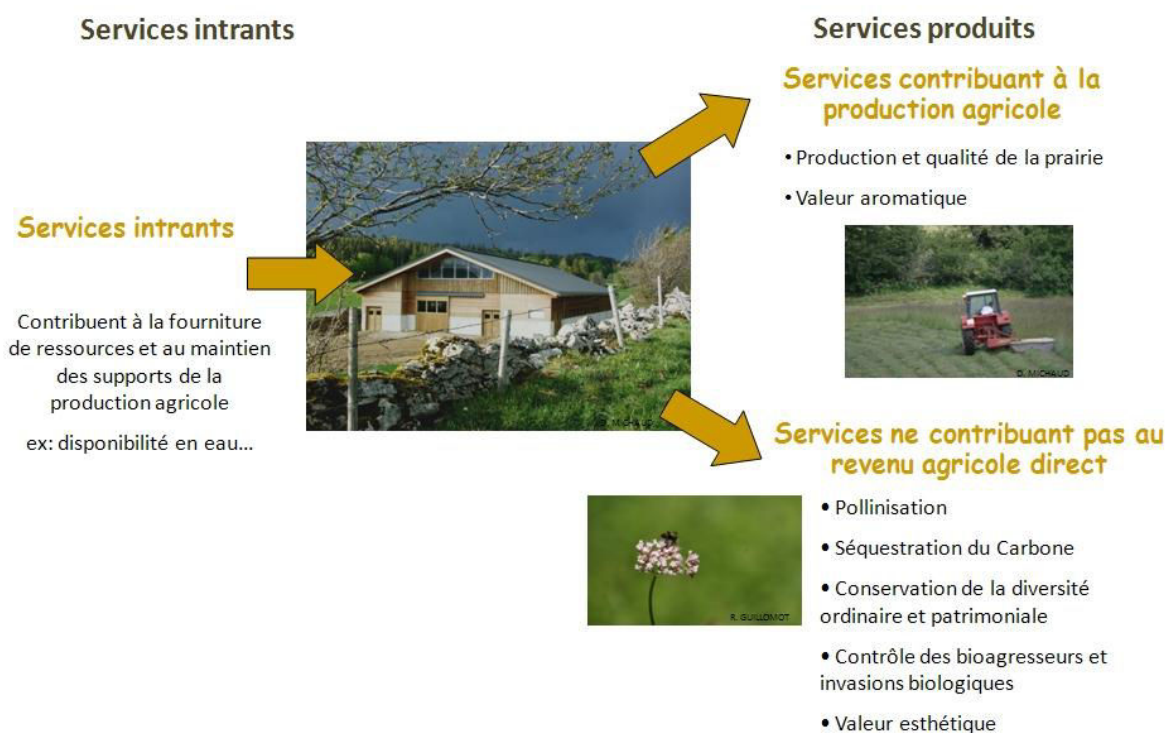


Figure 3. Des éléments biotiques et abiotiques aux services rendus par les écosystèmes prairiaux (en rouge les services liés à un couvert permanent et en vert les services dépendant des états de la végétation) (adapté de Wallace 2007).

En considérant cette définition pour les services et en intégrant les réflexions du Millenium Ecosystem Assesment (2005), nous avons adopté la démarche proposée dans le rapport "Agriculture et biodiversité" (Leroux *et al.* 2008). Nous avons ainsi identifié trois catégories de services rendus par les écosystèmes prairiaux gérés par l'agriculture, organisés autour de l'exploitation agricole (Figure 4) :

- **les services intrants**, contribuant à la fourniture de ressources et au maintien des supports de la production agricole (physico-chimiques, structure, fertilité, disponibilité en eau, ...)
- **les services produits contribuant à la production agricole**. Ils concernent les productions animales et végétales produites sur l'exploitation agricole ;
- **les services produits hors revenu agricole direct** : ce sont les services ayant un intérêt pour l'environnement, comme la séquestration du carbone, la qualité des eaux, l'aspect paysager....

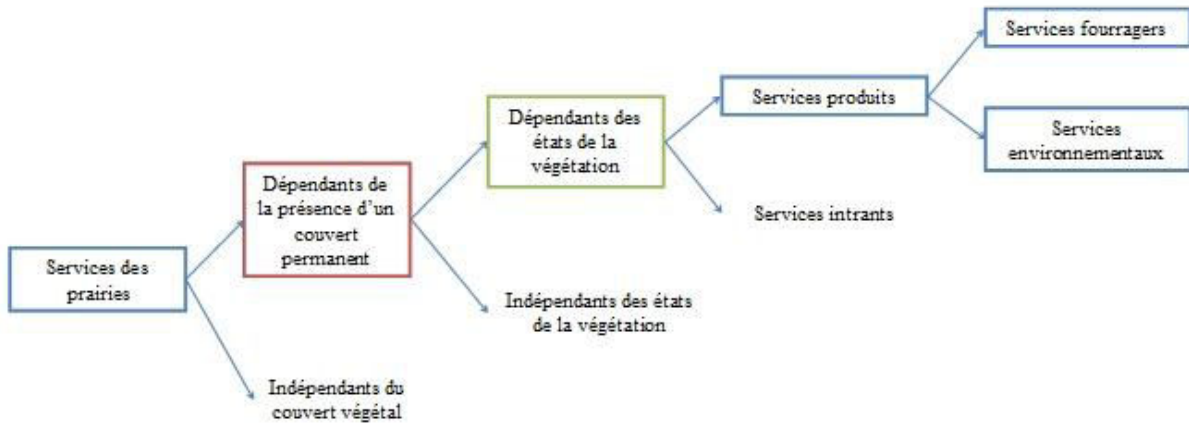


**Figure 4. Classification des services rendus par les écosystèmes prairiaux gérés par l'agriculture et organisés autour de l'exploitation agricole (adapté de Leroux et al. 2008).**

Les services classés dans la catégorie "services produits contribuant à la production agricole" interviennent dans le revenu agricole direct. Nous les appellerons **services fourragers**. Le terme "fourrager" désigne à la fois la constitution de stocks et la consommation d'herbe sur place (pâturage). Les services fourragers intègrent la notion de quantité et de qualité du fourrage. Parmi les services produits hors revenu agricole direct, il y a ceux qui ont un intérêt

d'ordre culturel (aspect esthétique lié au paysage par exemple) et ceux qui ont un intérêt vis-à-vis des impacts environnementaux : nous regrouperons l'ensemble de ces services sous l'appellation "**services environnementaux**".

Ces services fourragers et environnementaux identifiés dans le cadre du rapport "Agriculture et Biodiversité" (Leroux *et al.* 2008) sont recensés sur la figure 3. Certains services environnementaux sont uniquement liés à la présence d'un couvert permanent, quelle que soit la composition botanique (Figure 5). C'est en particulier le cas du rôle joué par les prairies dans la stabilité structurale du sol, qui est liée à la couverture permanente du sol mais pas à la nature des espèces présentes. Les services liés à la présence d'un couvert permanent sont surlignés en rouge (Figure 3). D'autres services environnementaux dépendent de la composition botanique et fonctionnelle des prairies et donc des états de la végétation (Figure 5). La diversité des états de la végétation est plus ou moins élevée sur les prairies permanentes : ces services peuvent donc être rendus sur des couverts permanents : ils sont surlignés en vert (Figure 3). Dans notre travail, nous étudierons uniquement les services **dépendant de la diversité des états de la végétation** (surlignés en vert sur la figure 3), en considérant les services produits uniquement, soit les services fourragers et environnementaux (Figures 4 et 5). Les services intrants présentent un intérêt pour le fonctionnement général de l'exploitation agricole mais ils ne sont pas considérés comme des services produits (Figure 4). Ils sont donc exclus de notre étude. Ainsi, nous n'étudierons pas la pollinisation en tant que service intrant. De même, le service de contrôle des bioagresseurs et des invasions biologiques sera exclu. En effet, les prairies permanentes sont sensibles aux invasions biologiques comme celles liées aux campagnols. Mais ces dégâts ne sont pas liés uniquement à la présence d'un couvert permanent : le type de paysage, accentué par le remplacement progressif des milieux cultivés par des prairies de fauches et de pâturage (Delattre et Giraudoux 2009) et l'utilisation de la prairie contribuent également à l'invasion des campagnols (Fichet-Calvet *et al.* 2000 ; Foltête *et al.* 2005).



**Figure 5. Démarche de sélection des services étudiés.**

Notre analyse bibliographique nous a permis d'identifier 20 services rendus par les prairies (Figure 3). Nous nous intéresserons uniquement aux services dépendant des états de la végétation, en les considérant selon leur positionnement dans le fonctionnement d'une exploitation agricole (Leroux *et al.* 2008) (Figure 4) : les services produits fourragers et environnementaux. Par ailleurs, la réalisation de certains services est indépendante du couvert végétal ou de la diversité des états de la végétation: en effet elle peut dépendre des conditions organisationnelles au niveau de l'exploitation agricole, comme les conditions d'accès à la parcelle, la distance au siège d'exploitation... Nous ne développerons pas ces aspects dans notre travail.

## 2. Les services fourragers des prairies permanentes

Nous avons vu que le premier rôle des prairies permanentes est de rendre des services fourragers. Ces services font l'objet d'études depuis de nombreuses années, et constituent encore un domaine de recherche très actif (Vuattoux 2009 ; Duru *et al.* 2010a ; Lavoirel *et al.* 2011). Les services fourragers des prairies permanentes ont été étudiés à l'échelle de l'exploitation agricole (Duru *et al.* 2010a) ou de la parcelle (Ph. Fleury 1994). Ils sont mis en évidence le plus souvent à partir d'enquêtes en exploitations agricoles ou d'expertise. Une parcelle peut remplir plusieurs services sur une année donnée ou il est possible de considérer un service principal sur celle-ci (Guerin et Bellon 1990). Ils sont définis et exprimés selon les attentes de l'éleveur vis à vis de la parcelle. La description d'un service fourrager tient compte de trois dimensions (Ph. Fleury 1994) :

- La temporalité au cours de la saison ;
- Le niveau d'exigence en termes de quantité et qualité du fourrage, c'est-à-dire la production de biomasse et sa qualité ;
- La catégorie d'animaux concernée. Le fourrage ou l'herbe pâturée peuvent être destinés à des animaux à forts besoins comme les vaches laitières ou à plus faibles besoins comme les animaux taris ou en gestation.

Les services fourragers reposent en premier lieu sur la qualité et la production du fourrage (Deinum et Dirven 1975 ; Tallowin et Jefferson 1999 ; Nielsen et Soegaard 2000 ; Bruinenberg *et al.* 2002). Ces services fourragers peuvent être relatifs à une quantité de production que ce soit au pâturage ou sous forme de fourrage conservé (Duru *et al.* 2010a). Par exemple, le service "*elles auront toujours assez à manger*" identifié par Ph. Fleury (1994) est caractérisé par une attente de l'éleveur vis à vis de la parcelle sur une quantité d'herbe nécessaire pour les animaux concernés. Parfois les attentes des éleveurs concernent des aspects quantitatifs et qualitatifs, comme le service "*l'herbe doit pouvoir attendre le troupeau*" (Ph Fleury 1994). Dans cet exemple, l'éleveur attend du couvert végétal une production régulière ainsi qu'une qualité sans risque de chute importante avec le temps. Enfin, certains services fourragers ont trait principalement à la qualité des prairies. Le service "*un bon petit foin de pays*" mis en avant par Ph. Fleury (1994) correspond à une attente principale liée à la qualité du stock de foin.

Les attentes liées à la qualité d'un fourrage peuvent concerner sa qualité en termes de valeur alimentaire pour la couverture des besoins des animaux mais aussi la qualité que le fourrage va conférer aux produits animaux. En effet, un lien entre la composition botanique des prairies et les caractéristiques sensorielles des fromages a été démontré, même si les mécanismes restent encore mal connus (Martin et Coulon 1995 ; Coulon *et al.* 1997 ; Coulon et Priolo 2002). Certains auteurs ont montré que les pâturages de haute altitude ont un rôle important dans les qualités sensorielles des fromages affinés du fait de leur grande diversité en espèces et d'une faible proportion de graminées dans ces pâturages, laissant ainsi la place aux légumineuses et plantes aromatiques plus riches en métabolites secondaires (Jeangros *et al.* 1999). En effet, les plantes, par leur composition, peuvent influencer les caractéristiques organoleptiques des fromages, les plus concernées étant celles qui dégagent une huile essentielle, à savoir les plantes aromatiques (Brunias 2009). Ces plantes aromatiques sont

riches en composés aromatiques dont les terpènes et sesquiterpènes qui sont des molécules odorantes et sapides donnant la flaveur du fromage (Brunias 2009). De nombreux composés aromatiques ont ainsi été identifiés pour plusieurs espèces (Gragnaire et Vanhaecke 1997 ; Mariaca *et al.* 1997; Mariaca *et al.* 1998; Mariaca *et al.* 2001) et des listes ont été élaborées (Gragnaire et Vanhaecke 1997 ; Mariaca *et al.* 1997). Ces composés peuvent être transmis des aliments dans le lait par voie digestive ou par voie pulmonaire, par l'intermédiaire des gaz éruptés ou par l'air inhalé. Ils peuvent ou non subir une altération biochimique préalable dans le rumen. Ils ont la capacité d'affecter le fonctionnement du rumen et de conduire ainsi à la production de composés aromatiques responsables de flaveurs ou défauts de goûts particuliers (Martin 1993). D'autres molécules comme les acides gras poly-insaturés (AGPIs) interviennent dans les caractéristiques organoleptiques des fromages et notamment sur leur texture (Brunias 2009). Ces effets de la composition botanique sur la qualité organoleptique des produits participent au lien entre le produit et le terroir, à travers la consommation des flores diversifiées sous forme d'herbe ou de fourrage séché par les animaux qui produisent du lait et de la viande. Le terroir est caractérisé par des conditions particulières du milieu physique (sols, roches, climat, eau), associées à une végétation caractéristique des prairies permanentes. S'appuyant sur les nombreuses études qui ont établi un lien entre la composition botanique des prairies et les caractéristiques organoleptiques des produits, les AOP mettent en avant l'effet terroir, et intègrent dans leur cahier des charges des exigences en termes de consommation des fourrages issus de la zone de production.

### 3. Les services environnementaux des prairies permanentes

Nous avons identifié quatre services environnementaux pour lesquelles les prairies permanentes jouent un rôle important (Figure 3) : la régulation du climat global et régional (séquestration du carbone), la conservation de la diversité ordinaire et patrimoniale, la pollinisation et l'aspect esthétique de la prairie.

#### 3.1. Séquestration du Carbone

La séquestration du carbone est considérée comme un service (Nelson *et al.* 2009), intégré dans la notion de régulation du climat global et régional (Figure 3). Ce service est lié au processus d'enlèvement du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) de l'atmosphère pour être déposé dans des pools de carbone de temps de vie varié (Jones et Donnelly 2004). Les principaux puits de

carbone terrestres sont les forêts et les prairies permanentes (Gac *et al.* 2010). Une prairie peut stocker 70 t de carbone/ha, ce qui est la même quantité qu'une forêt, les pelouses d'altitude étant celle qui stockent le plus de carbone, avec 93 t de carbone/ha (Gac *et al.* 2010). En effet, les prairies permanentes ont un contenu en carbone organique du sol plus élevé que les terres arables, parce qu'elles reçoivent un apport en résidus végétaux important, parce qu'il y a plus de carbone déposé au niveau du sol et parce que la décomposition des végétaux est plus lente du fait de l'absence d'aération et des conditions d'agrégation du sol (Ammann *et al.* 2007). La séquestration potentielle des sols en carbone organique est estimée à 0.01-0.3 Gt de carbone par an sur les 3.7 milliards d'ha de prairies permanentes dans le monde (Niklaus *et al.* 2001 ; Soussana et Lüscher 2007). Cependant, les activités humaines perturbent le cycle du carbone, en favorisant une élévation du taux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Cette addition de carbone dans l'atmosphère contribue à l'augmentation de la température de la surface de la terre (Soussana et Lüscher 2007) et donc au réchauffement climatique. Les prairies permanentes, du fait de leur capacité de stockage du carbone, pourraient donc avoir un rôle important dans la régulation du carbone atmosphérique.

### 3.2 Maintien de la diversité ordinaire et patrimoniale

La notion de conservation de la diversité ordinaire et patrimoniale est souvent assimilée dans le langage commun au maintien de la biodiversité en espèces. Le terme "biodiversité" est défini comme la variabilité des êtres vivants, déclinée selon trois niveaux d'organisation : la diversité génétique, la diversité des espèces et la diversité des écosystèmes (Moonen et Barberi 2008; Leroux *et al.* 2008). Aujourd'hui, ce concept représente un enjeu important, qui est intégré dans la politique agri-environnementale de l'Union Européenne (Moonen et Barberi 2008; Leroux *et al.* 2008). La biodiversité est un concept intégrateur qui peut être considérée comme un service si on s'intéresse à sa contribution dans la conservation de la diversité en espèces. Parmi la conservation de la diversité en espèces, il faut dissocier la diversité ordinaire, qui est la diversité des espèces en général et la diversité patrimoniale qui concerne les espèces rares ou protégées qui sont répertoriées au niveau de territoires (de la région au monde en passant par les pays et les continents). La diversité génétique est très importante au sein des prairies, mais demeure très peu étudiée.

La conservation de la diversité ordinaire et patrimoniale est exprimée par la conservation ou le maintien d'un habitat. En effet, l'habitat est un élément (Leroux *et al.* 2008), qui peut être un lieu de refuge, de reproduction, de nourriture ou une combinaison des différents aspects.

Par exemple, une prairie permanente pâturée avec un couvert végétal hétérogène caractérise un habitat riche en diversité floristique et faunistique (Rook et Tallowin 2003). Ainsi l'étude des différents habitats au sein d'une parcelle, et donc de leur diversité floristique et faunistique, permet de mesurer la diversité ordinaire et patrimoniale d'une prairie et son maintien. Les prairies permanentes présentant souvent une diversité en espèces, ont un intérêt pour ce service. **Par la suite, nous distinguerons ces deux notions, conservation de la diversité ordinaire et conservation des espèces patrimoniales.**

### 3.3. Pollinisation

La pollinisation est à la fois un service (Nelson *et al.* 2009) et un processus (Wallace 2007). Dans notre étude, nous considérons la pollinisation comme un service, associé au processus écologique de transfert et dispersion du pollen (Leroux *et al.* 2008). Le service de pollinisation peut être considéré :

1) en tant que service intrant, en considérant la pollinisation comme un outil indispensable à la réalisation d'une culture. Par exemple, la production de graines de tournesol en culture nécessite en partie la réalisation de la pollinisation en amont. Ce service ne concerne pas les prairies permanentes ;

2) en tant que service produit contribuant à la production agricole, comme la production de miel dans le cadre d'une activité d'apiculture ;

3) en tant que service produit permettant le maintien des populations d'insectes et la conservation de leur diversité spécifique et génétique (Figure 3). Les insectes pollinisateurs se nourrissent de pollen récolté auprès d'espèces floristiques entomogames<sup>12</sup>. La conservation d'espèces entomogames est donc importante dans le maintien d'insectes pollinisateurs. La pollinisation, considérée sous ce dernier aspect, est un service environnemental qui présente des enjeux importants. En effet, depuis quelques années, un déclin des insectes pollinisateurs a été constaté (Björklund *et al.* 1999) et notamment en raison de problèmes liés au parasitisme, aux pathogènes, aux prédateurs et à la diminution drastique des ressources (pollen et nectar) du fait de l'intensification de l'agriculture et de la simplification des paysages. Plusieurs pays ont constaté un déclin des abeilles sauvages, qui sont plus menacées en raison de leur spécificité plus marquée dans le choix floral et d'une période d'activité

---

<sup>12</sup> Espèces floristiques nécessitant pour leur reproduction une dissémination du pollen par les insectes



limitée. Les prairies permanentes, du fait de leur diversité floristique, ont un rôle important dans la pollinisation.

### 3.4. Aspect esthétique de la prairie

Le paysage est l'expression d'une relation dynamique entre un territoire concret et la perception que l'on en a (Parris 2002 ; Ambroise *et al.* 2002). Les prairies sont considérées comme des espaces verts et naturels (Pa. Fleury 1995), qui sont souvent associés à des zones fleuries et très diversifiées. Cela est d'ailleurs à l'origine du terme "prairies fleuries". L'image des prairies permanentes dans le paysage est donc positive, d'autant plus que celles-ci sont souvent accompagnées d'éléments associés (arbres isolées, haies, murets...), ce qui est moins le cas pour les cultures. La parcelle constitue ainsi un élément intègre du paysage (Deffontaines et Pringent 1987) qui peut être considérée comme l'origine de sa perception (Pa. Fleury 1995). De plus, les prairies contribuent à façonner la mosaïque du paysage, du fait de l'équilibre et de la diversité de composition qu'elles apportent. Cette perception évolue au cours du temps et notamment avec l'évolution des pratiques dans l'année. La parcelle de prairie constitue donc un niveau d'étude pertinent pour comprendre les relations entre paysage et pratiques agricoles (Ambroise *et al.* 2000). En effet, une parcelle donne des informations sur l'usage actuel de l'espace mais aussi sur son usage passé. Des indicateurs visuels de l'activité agricole (Deffontaines et Pringent 1987) permettent de mieux comprendre l'aspect visuel du paysage comme les traces de fauche, la couleur du couvert, le type de couvert ou la composition floristique. Des outils d'évaluation de l'aspect paysager des prairies permanentes ont été mis en place, notamment basés sur une approche parcellaire (Pa. Fleury 1995). L'outil construit par Pa. Fleury (1995) est basé sur la notation visuelle de l'aspect de la parcelle, en tenant compte des couleurs, de la morphologie de la parcelle (type de grain, ...) et de leur évolution dans le temps.

Les services fourragers et environnementaux rendus par les prairies permanentes sont nombreux. Les services fourragers sont organisés autour des attentes de production et qualité. Les services environnementaux prennent en compte des enjeux en termes de biodiversité, paysagers ou planétaires comme la séquestration du carbone. Ces services ayant été identifiés, il est nécessaire d'évaluer leur aptitude à être rendus.

## **II. Etude des liens entre les services fourragers et environnementaux des prairies permanentes, les critères d'aptitude, les états de la végétation et leurs descripteurs**

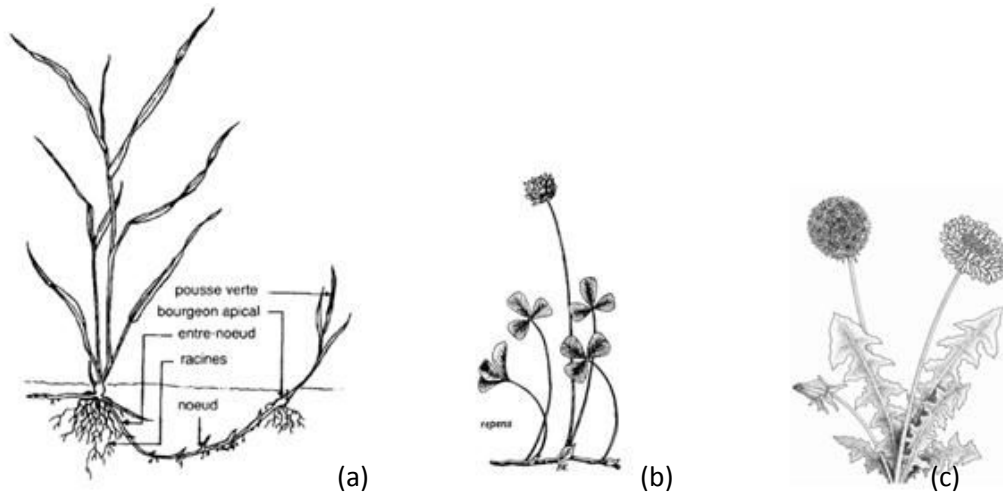
Le niveau de réalisation des services que nous avons identifiés dépend pour une large part de la composition botanique et fonctionnelle des prairies. La connaissance des états de la végétation des prairies est donc essentielle pour évaluer l'aptitude de celles-ci à rendre les services identifiés. Les états de la végétation des prairies permanentes dépendent eux-mêmes des conditions pédoclimatiques et des pratiques de gestion. Dans cette partie, après avoir rappelé le fonctionnement d'un couvert prairial par rapport à la production et qualité d'une prairie et présenté les différents états de la végétation que nous considérons, nous étudierons les liens entre les états de la végétation et les critères d'aptitude des services. Ensuite, nous nous intéresserons aux liens entre ces états de la végétation et les descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion.

### 1. Les états de la végétation pour prédire les services fourragers et environnementaux

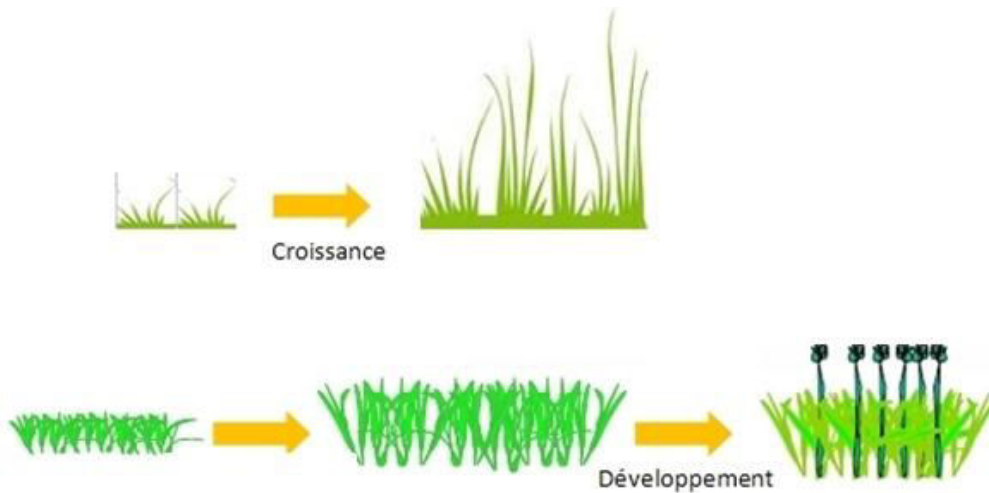
#### 1.1. Fonctionnement d'un couvert prairial et liens avec la production et qualité de la prairie

Les prairies permanentes sont composées en majorité de graminées et dans une moindre mesure de légumineuses et diverses (Figure 6). Durant leur cycle de vie ces espèces peuvent:

- 1) croître : la masse et la surface de la plante augmente. La plante est dite en croissance (Figure 7) ;
- 2) se développer : la plante passe par différents stades successifs (germination, mise en place d'un appareil reproducteur, ...), elle est dite en développement (Figure 7). Différents stades de développement des plantes sont répertoriés et caractérisent l'âge ou la phénologie d'une espèce. Les principaux stades de développement d'une plante sont les stades végétatif, montaison, épiaison, floraison et maturation (Jeangros et Amaudruz 2005).



**Figure 6. Morphologie, d'une graminée (a), d'une légumineuse (b) et d'une plante d'une autre famille (diverse) (c).**

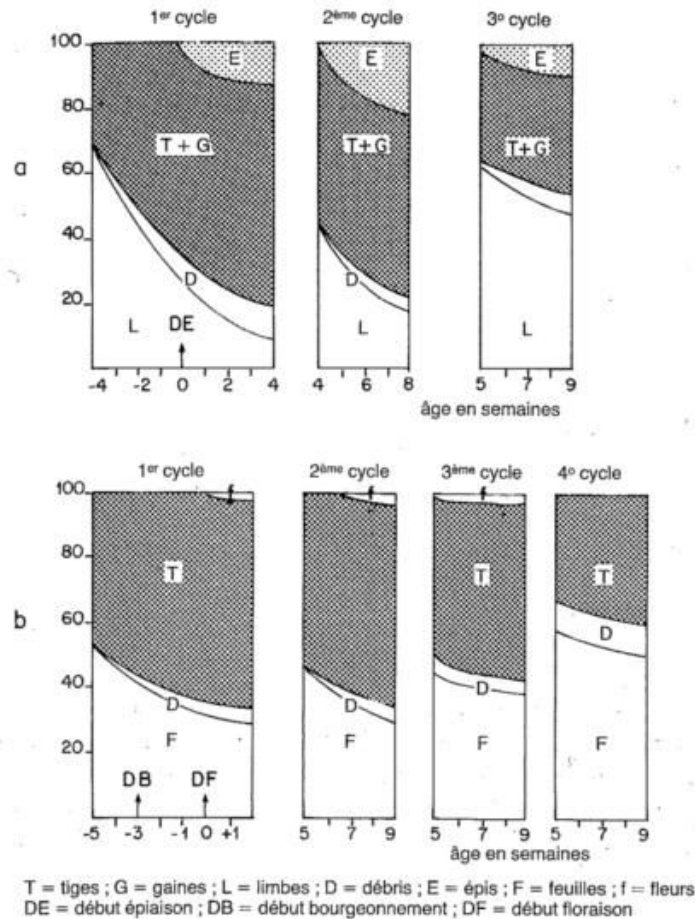


**Figure 7. Différenciation entre croissance et développement d'une plante.**

La composition morphologique des plantes évolue avec le stade de végétation (Figure 8). Au cours du premier cycle de végétation<sup>13</sup>, la production de limbes diminue au bénéfice de la production de tiges et de gaines puis d'épis : ainsi pour les graminées la proportion de limbes décroît de 80% de la biomasse à moins de 15% à la fin de la phase de développement reproducteur (Demarquilly et Andrieu 1988). Ce phénomène est similaire chez les légumineuses bien qu'elles soient plus riches en tiges dès le début. Au cours des repousses, la

<sup>13</sup> Un cycle de végétation correspond au développement de la végétation jusqu'à une coupe (fauche ou pâturage).

proportion de limbes reste importante : les repousses sont donc très feuillues (Figure 8) et les stades de développement ne dépassent généralement pas la montaison.



**Figure 8. Evolution de la proportion de gaines, feuilles et tiges pour une espèce de graminée (Dactyle) (a) et de légumineuse (Luzerne) (b) pour trois cycles de végétation pour le Dactyle et quatre cycles de végétation pour la Luzerne (Demarquilly et Andrieu 1988).**

Les constituants biochimiques **des plantes fourragères** sont divisés en deux groupes : les constituants intracellulaires dont la digestibilité est totale et les parois cellulaires (cellulose et hémicellulose) dont la digestibilité varie de 40 à 90% (Demarquilly et Andrieu 1988). En effet, les parois cellulaires sont riches en lignine, composé indigestible qui constitue une barrière à la digestion de ces parois par les microbes du rumen (Demarquilly et Andrieu 1988). La digestibilité d'un fourrage, c'est-à-dire la proportion de la matière organique qui disparaît dans le tube digestif (Jarrige 1988), résulte donc de sa teneur en parois cellulaires et de leur digestibilité. Les feuilles de légumineuses ou les limbes des graminées sont plus riches en constituants intra cellulaires (matières azotées, minéraux et vitamines) et plus pauvres en

parois cellulaires que les tiges. Au cours du développement des organes reproducteurs, la proportion de tiges augmente et il en résulte donc une diminution de la digestibilité, et de la valeur nutritive des plantes (Jeangros et Amaudruz 2005). Ainsi, au cours du premier cycle de végétation, la digestibilité d'une plante dépend presque exclusivement de son stade de développement. En début de croissance, celle-ci est élevée : de 80 à 85% selon les plantes et diminue lentement jusqu'à un stade compris entre la montaison et le début épiaison, puis diminue plus rapidement, de 0.4 à 0.5 point par jour. La digestibilité des repousses est toujours inférieure à celle du premier cycle mais elle diminue moins vite avec l'âge : de 0.1 à 0.2 point par jour pour les repousses uniquement feuillues et de 0.2 à 0.35 point par jour pour les repousses à tige (Demarquilly et Andrieu 1988). La teneur en matières azotées et minéraux évolue comme la proportion de limbes et diminue au cours du temps du fait de l'augmentation de la proportion de tiges (Demarquilly et Andrieu 1988).

Pour comprendre la production et la valeur nutritive d'une prairie permanente il faut prendre en compte, dans des conditions homogènes de milieu physique et de pratiques agricoles, l'ensemble des espèces présentes (Cruz *et al.* 2002 ; Pontes 2006), soit la **communauté végétale**, sachant qu'une prairie peut être formée de plusieurs communautés (Cruz *et al.* 2002). Les prairies, très riches en graminées et conduites de façon intensive, étudiée, par Demarquilly et Andrieu (1988), présentent une digestibilité au premier cycle de végétation de l'ordre de 82-83% en début de printemps qui diminue dès le stade montaison de 0.4 point par jour pour atteindre 55% au stade floraison. D'autres études montrent que ces valeurs de digestibilité varient fortement à la date de première coupe (stade début épiaison-épiaison) selon le niveau de diversité et d'intensification de la prairie et sont comprises entre 58 et 79%, (Jeangros et Schmid 1991 ; INRA 2007 ; Jouven *et al.* 2006 ; Rogrigues *et al.* 2007 ; Andueza *et al.* 2010). Ces différences peuvent s'expliquer d'une part par les différences de phénologie entre espèces et d'autre part par les différences de digestibilité entre espèces mesurées à un même stade. Par exemple, il existe des différences de digestibilité entre des espèces de graminées (Baumont *et al.* 2008) ou entre des espèces de légumineuses: le trèfle blanc produit beaucoup moins de tiges et sa digestibilité reste beaucoup plus élevée que la luzerne par exemple (Baumont *et al.* 2008). De plus, à stades de développement comparables, les légumineuses sont moins riches en parois végétales que les graminées mais la digestibilité de leurs parois est plus faible (Baumont *et al.* 2008). La digestibilité des dicotylédones est très variable selon les espèces : la digestibilité de la renoncule rampante ou du pissenlit peut être élevée (Schubiger *et al.* 2001 ; Bruinenberg *et al.* 2002), alors que celle des ombellifères

caractérisées par des grosses tiges fibreuses présentent des diminutions rapides de digestibilité avec l'avancée du stade (Daccord *et al.*, 2006). La valeur nutritive d'une prairie est donc influencée par sa composition botanique.

L'herbe pâturée est le plus souvent exploitée du démarrage de la végétation à un stade de montaison pour un premier cycle de végétation et à des âges compris entre 20 et 50 jours pour des repousses. Les différences de digestibilité liées aux espèces sont importantes en prairie permanente et notamment sur les repousses : la digestibilité varie entre 85 et 69% selon l'âge des repousses (Demarquilly et Andrieu 1988 ; INRA 2007). Dans le cas d'une fauche, la date de coupe est dépendante d'un compromis fait entre d'une part la valeur nutritive et l'ingestibilité, qui diminue avec l'âge de la plante, et d'autre part la quantité de matière sèche (Jeangros et Schmid 1991) qui augmente avec l'âge de la plante. La digestibilité d'un fourrage sec, caractérisé par une teneur en matière sèche de 80-85%, peut diminuer du fait de la perte de feuilles lors du séchage du fourrage au sol. Sa teneur en glucides solubles, matières azotées, minéraux et vitamines peut aussi diminuer si le fourrage a été lessivé par la pluie. La production d'une prairie, mesurée par sa quantité de matière sèche (MS) est comprise entre 2 et 5 t MS/ha, à la première coupe selon la diversité des prairies (Jeangros et Schmid 1991). Les productions annuelles varient selon les années en raison des conditions climatiques (Rozière 1809) et sont réparties entre 1 et 8.31 t MS/ha selon la diversité des prairies (Jeangros et Schmid 1991 ; Nerusil *et al.* 2008 ; Stybnarova *et al.* 2010).

L'ingestibilité du fourrage, c'est-à-dire la quantité que l'animal peut en ingérer (en kg de MS) si le fourrage est distribué à volonté, est également à prendre en compte dans la valeur d'un fourrage. Celle-ci dépend en premier lieu de l'effet d'encombrement qu'exerce le fourrage dans le rumen (Demarquilly et Jarrige 1981). L'encombrement dépend de la vitesse de digestion du fourrage dans le rumen et augmente avec la quantité de parois cellulaires et de tissus lignifiés qui ne peuvent quitter celui-ci qu'après avoir été réduit en particules par l'activité microbienne du rumen. L'ingestibilité dépend donc globalement des mêmes critères que la digestibilité. L'ingestibilité des plantes fourragères diminue donc au cours du cycle de végétation de la plante avec l'augmentation de la proportion de tiges, riches en tissus lignifiés et parois cellulaires (Jarrige 1988 ; Demarquilly et Andrieu 1988).

Ainsi, il est possible de prévoir la digestibilité et l'ingestibilité des différentes espèces fourragères avec précision, à partir de leur âge et à un degré moindre à partir de leur composition chimique (Demarquilly et Andrieu 1988). Les données de composition chimique, de digestibilité et d'ingestibilité des principales espèces fourragères ont été récapitulées dans

les tables de la valeur des aliments régulièrement mises à jour (Demarquilly et Weiss 1970 ; Demarquilly et Andrieu 1988 ; Baumont *et al.* 2008). Toutefois les références disponibles pour les prairies permanentes sont nettement moins nombreuses que pour les fourrages cultivés en espèces pures. Elles ne reposent que sur quelques études anciennes, menées à l'INRA du Pin dans les années 1960, à l'INRA d'Orcival dans les années 1970 et dans les Alpes du Nord au début des années 1990 (Ph. Fleury 1994). Ainsi, dans les tables récemment mises à jour (INRA 2007) les prairies permanentes ne sont décrites qu'à travers 28 fourrages verts de référence pour ces 3 régions et l'ensemble des cycles et des stades de végétation, alors que les graminées et les légumineuses fourragères le sont respectivement à travers 147 et 52 fourrages de référence. Il est clair que cela est insuffisant pour décrire la variabilité des prairies permanentes présentes en France. Comparativement, l'effort de catégorisation des prairies permanentes dans les tables de valeur alimentaire utilisées en Suisse est nettement plus important, avec 7 types de prairies de référence définis selon leur composition en graminées, légumineuses et diverses et ensuite déclinées pour les différents cycles et stades de végétation (Daccord *et al.* 2006). Pour pallier le déficit de références sur les prairies permanentes et sur les fourrages pluri-spécifiques une méthode de prévision de leur digestibilité à partir l'attaque enzymatique à la pepsine et à la cellulase a été proposée en France dès 1982 (Aufrère 1982). Cette méthode et les équations de prévision de la digestibilité *in vivo* ont depuis été mises à jour et complétées (Aufrère et Demarquilly 1989 ; Aufrère *et al.* 2007).

## 1.2. La composition botanique ou taxonomique

La composition taxonomique ou botanique d'une prairie décrit la végétation comme un ensemble d'espèces. Dans cette approche, on tient compte de l'espèce comme entité fonctionnelle propre (Maire 2009), le comportement des espèces expliquant potentiellement celui de l'ensemble de la prairie. La présence en espèces (composition floristique) et sa quantification par l'abondance et/ou la dominance en espèces sont les deux critères utilisés pour décrire la composition taxonomique ou botanique. La présence correspond à la nature des espèces rencontrées sur la parcelle, alors que la dominance est une estimation de la surface couverte par chaque espèce et l'abondance une estimation de sa proportion (en volume) dans la biomasse. La présence (ou l'absence) d'une espèce ou d'un ensemble d'espèces permet un diagnostic sur l'état du milieu et des pratiques.

Les prairies permanentes sont généralement riches en espèces floristiques mais cette richesse varie selon les types de prairies. Des études ont montré que les prairies permanentes européennes étaient composées de 15 à 60 espèces floristiques selon les conditions d'exploitation et de milieu (Jeangros et Schmid 1991 ; Plantureux *et al.* 1993 ; Diquelou *et al.* 2003 ; Stybnarova *et al.* 2010 ; Tornambe *et al.* 2010).

### 1.3. La composition fonctionnelle

La composition fonctionnelle est basée sur les caractéristiques fonctionnelles des végétaux, sans s'intéresser à leur classification taxonomique (Duru *et al.* 2007). L'approche fonctionnelle facilite l'interprétation du lien entre la composition des communautés et les facteurs écologiques, via l'identification des mécanismes responsables de cette structuration (Grime 1977). Ce type d'approche permet de simplifier la complexité du vivant et de comparer différents sites entre eux (Maire 2009). Pour caractériser l'approche fonctionnelle, une organisation en plusieurs échelles a été mise en place (Violle *et al.* 2007) :

- à l'échelle de l'individu, avec des traits liés à la fécondité, la croissance ou la survie ;
- à l'échelle de la population, avec des traits démographiques comme l'émigration, l'immigration, ... ;
- à l'échelle de la communauté, avec des caractéristiques liées à l'occurrence ou à la fréquence, comme les traits de réponse qui traduisent la réaction des espèces aux conditions de gestion ou d'environnement;
- à l'échelle de l'écosystème, avec des caractéristiques liées aux propriétés de l'écosystème (flux d'énergie, ...), comme les traits d'effets qui affectent la productivité, la qualité, les interactions avec le sol ou le cycle de l'eau de la végétation prairiale (Lavorel et Garnier 2002 ; Maire 2009).

Pour certains auteurs, l'utilisation du terme "trait" à différentes échelles peut porter à confusion : celui-ci est ainsi défini comme un attribut morphologique (hauteur), physiologique (capacité d'acquisition de C ou N), biochimique (teneur en nutriments des tissus) ou phénologique (période de croissance, de reproduction) mesurable à l'échelle de l'individu (de la cellule à l'organisme) et ne faisant pas référence à l'environnement ou à un autre niveau d'organisation (Violle *et al.* 2007 ; Maire 2009). L'utilisation de ce terme repose donc sur le premier niveau décrit précédemment, à savoir l'individu. A l'échelle de la population, il est suggéré d'utiliser le terme "paramètre démographique" et à l'échelle de la



communauté ou de l'écosystème, le terme "propriété" (Violle *et al.* 2007). **Nous utiliserons cette terminologie pour décrire la composition fonctionnelle des prairies permanentes orientée selon les services fourragers et environnementaux de celles-ci.**

### *Les traits de vie*

L'approche fonctionnelle s'appuie sur l'analyse des traits des espèces et particulièrement des graminées qui dominent dans la plupart des prairies permanentes. Les espèces peuvent être regroupées selon deux stratégies différentes<sup>14</sup> (Duru *et al.* 2007) :

- Les espèces qui ont une croissance rapide avec un renouvellement rapide des tissus végétaux (feuilles). Ces espèces sont adaptées à des milieux plutôt riches où la ressource est importante : ce sont des espèces à **stratégie de capture de la ressource** ;
- Les espèces qui ont une croissance plus lente avec des durées de vie des feuilles de ce fait plus longues. Ces espèces sont adaptées à des milieux pauvres où la ressource est plus limitante : elles ont donc une **stratégie de conservation de la ressource**.

Parmi les traits de vie des plantes permettant de décrire les services fourragers et environnementaux, on trouve la teneur en matière sèche (TMS), la date de floraison et la hauteur maximale de la plante (Duru *et al.* 2007, 2008, 2010b ; Cruz *et al.* 2010 ; Lavorel *et al.* 2011) :

- La TMS rend compte du niveau de fertilité de la prairie (Cruz *et al.* 2010) et elle contribue à expliquer la valeur agricole des prairies (Duru *et al.* 2010b). La TMS est corrélée à d'autres traits de vie : elle est corrélée négativement à la SSF<sup>15</sup>, qui est un bon descripteur du taux de croissance relatif des espèces (Cruz *et al.* 2010) et positivement à la DVF<sup>16</sup>, qui rend compte du recyclage des feuilles et exprime la date à laquelle le pic de biomasse est atteint et ainsi l'aptitude de l'espèce à être récoltée plus ou moins fréquemment (Cruz *et al.* 2002). Une plante à stratégie de capture de la

---

<sup>14</sup> Stratégie : ensemble de caractères génétiques analogues ou similaires qui se recouvrent largement à travers la population ou entre espèces et qui conduit à montrer des similitudes écologiques (Grime *et al.* 1979).

<sup>15</sup> SSF : Surface Spécifique Foliaire

<sup>16</sup> DVF : Durée de Vie des Feuilles

ressource produit en permanence des tissus : la DVF est donc courte mais la SSF est importante. De plus, pour ce type de stratégie, la TMS des limbes est faible. Pour des espèces à stratégie de conservation de la ressource, ces trois traits de vie se comportent à l'inverse. Des travaux ont montré que la TMS est plus stable dans le temps que la SSF (Roche *et al.* 2004) et plus stable que la SSF et la DVF dans le cas d'une disponibilité en azote (Al Haj Khaled *et al.* 2004). De plus, la TMS est corrélée avec la teneur en parois des végétaux et avec la digestibilité (Pontes *et al.* 2007) : elle constitue donc un trait intéressant pour l'évaluation de la valeur nutritive (Al Haj Kahled *et al.* 2006 ; Duru *et al.* 2009). Enfin, c'est un trait facile à mesurer (Al Haj Kahled *et al.* 2006). Par rapport à notre objectif, l'étude de la TMS est suffisante ;

- La date de floraison correspond à la date à laquelle une espèce atteint le stade de floraison. Ce trait permet de définir la précocité ou tardiveté des espèces (Cruz *et al.* 2010) et de piloter les pratiques de gestion en jouant sur la souplesse d'utilisation des parcelles (ex : les parcelles tardives sont plus souples d'utilisation que les parcelles précoces) (Cruz *et al.* 2010). Ce trait de vie est donc pertinent dans la prévision des services fourragers;
- La hauteur maximale regroupe les espèces selon la hauteur du végétal (espèces de grande taille, ...). Ce trait de vie discrimine les espèces par leur capacité à accumuler de la biomasse sur pied (Cruz *et al.* 2010).

Une classification des espèces a été construite vis à vis de leurs stratégies de conservation ou d'acquisition de la ressource. Cette classification est basée sur l'étude de plusieurs traits de vie : la TMS, la DVF, la SSF, la date de floraison, la résistance à la cassure et la hauteur maximale (Cruz *et al.* 2010). Les espèces à stratégie de capture de la ressource croissent sur des milieux riches en nutriments et présentent une défoliation fréquente (ex *Lolium perenne*, *Dactylis glomerata*). Elles sont caractérisées par une SSF élevée et une TMS faible, favorisant une repousse rapide après défoliation. A l'inverse, les espèces à stratégie de conservation de la ressource sont adaptées à des milieux peu fertiles et à une défoliation peu fréquente (ex : *Festuca rubra*). Ces espèces ont une SSF faible et une TMS élevée. Cette classification des espèces repose uniquement sur les graminées qui sont très présentes dans les prairies permanentes (Cruz *et al.* 2002 ; Louault *et al.* 2005 ; Cruz *et al.* 2010). Cependant, les légumineuses et diverses peuvent parfois atteindre plus de la moitié de la biomasse. Des

études entre les graminées et dicotylédones ont montré une convergence entre des traits de vie des graminées et certaines dicotylédones comme les rosette, excepté pour la TMS (Ansquer *et al.* 2009 ; Duru *et al.* 2010a). La digestibilité des dicotylédones est tout de même très variable selon les espèces. La digestibilité de certaines espèces diverses, comme la renoncule rampante ou le pissenlit, peut être élevée et équivalente respectivement à celle du Ray Grass ou à une graminée au stade végétatif (Schubiger *et al.* 2001 ; Bruinenberg *et al.* 2002). A contrario, certaines dicotylédones de la famille des ombellifères caractérisées par des grosses tiges fibreuses et d'autres espèces spécifiques de montagne en zones humides comme la renouée bistorte présentent des diminutions rapides de digestibilité avec l'avancée du stade (Daccord *et al.* 2006). Cette classification est également associée à un gradient de production et de qualité (Pontes *et al.* 2007 ; Duru *et al.* 2010a). Ainsi dans cette classification des graminées en plusieurs types fonctionnels (TF) proposée par Cruz *et al.* (2010), on distingue notamment 1) les TFA et TFB caractérisés par une phénologie précoce, une valeur nutritive élevée au début du premier cycle de végétation qui chute rapidement, et une production élevée, et 2) les TFC et TFD caractérisés par une phénologie plus tardive, des valeurs de digestibilité plus faibles qui diminuent moins vite au cours du temps, et une plus faible accumulation de biomasse (Duru *et al.* 2007). Les TF b ajoutés par la suite caractérisent les espèces de sols fertiles à phénologie plus tardive que les TFA et TFB (ex : *Agrostis capillaris*) (Cruz *et al.* 2010) (Tableau 1). Actuellement, la typologie est composée de six TF.

**Tableau 1. Caractérisation des types fonctionnels par les traits de vie (TMS : teneur en matière sèche des feuilles ; SSF : surface spécifique foliaire ; DVF : durée de vie des feuilles ; FLO : date de floraison (phénologie) ; Hmax : hauteur maximum), les espèces présentes et leurs caractéristiques (adapté de Cruz et al. 2010).**

Types fonctionnels	TMS (mg.g <sup>-1</sup> )	SSF (m <sup>2</sup> .kg)	DVF (°C.jours)	FLO (°C.jours)	Hmax (cm)	Espèces présentes	Caractéristiques
<b>A</b>	241.4 (36.8)	23.1 (4.2)	807 (4.2)	874 (174)	67.6 (19.6)	<i>Alopecurus pratensis</i> L., <i>Anthoxanthum odoratum</i> L., <i>Holcus lanatus</i> L., <i>Lolium perenne</i> L., <i>Phleum</i> <i>alpinum</i> L., <i>Poa bulba</i> L.	Milieus fertiles
<b>B</b>	270.2 (11.4)	20.0 (3.1)	1030 (193)	1227 (156)	123.2 (32.2)	<i>Arrhenatherum elatius</i> L., <i>Bromus erectus</i> Huds., <i>Dactylis Glomerata</i> L., <i>Festuca arundinacae</i> Schreb., <i>Festuca pratensis</i> Huds., <i>Poa pratensis</i> L.	Milieus fertiles
<b>b</b>	256.1 (20.8)	25.6 (7.0)	833 (139)	1652 (240)	93.1 (15.9)	<i>Agrostis capillaris</i> L., <i>Agropyron littorale</i> Dumort, <i>Elytrigia repens</i> L., <i>Holcus mollis</i> L., <i>Hordeum secalinum</i> Schreb., <i>Phleum pratense</i> L., <i>Poa trivialis</i> L., <i>Trisetum flavescens</i> P. Beauv	Milieus relativement fertiles
<b>C</b>	290.9 (25.8)	13.3 (4.4)	1118 (271)	1316 (158)	67.0 (12.2)	<i>Briza media</i> L., <i>Cynosurus</i> <i>cristatus</i> L., <i>Dantonina</i> <i>decumbens</i> DC, <i>Deschampsia flexuosa</i> Griseb., <i>Festuca</i> <i>duriuscula</i> L., <i>Festuca</i> <i>rubra</i> L., <i>Festuca ovinia</i> L., <i>Koeleria vallesiana</i> Gaudin., <i>Melica ciliata</i> L.	Milieus peu fertiles
<b>D</b>	375.7 (42.0)	15.2 (6.9)	1132 (177)	1671 (354)	86.6 (24.7)	<i>Helictotrichon sulcatum</i> Pilger., <i>Brachypodium</i> <i>phoenicoides</i> Roem. et S., <i>Brachypodium pinnatum</i> P. Beauv., <i>Brachypodium</i> <i>sylvaticum</i> Roem et S., <i>Poa</i> <i>chaxii</i> Vill., <i>Nardus stricta</i> L., <i>Stipa pennata</i> L.	Milieus peu fertiles
<b>d</b>	311.9 (28.6)	15.2 (8.2)	1684 (103)	1834 (386)	142.1 (35.4)	<i>Deschampsia cespitosa</i> P.B., <i>Molinia coerulea</i> Moench.	Milieus peu fertiles

### Les propriétés des espèces

A l'échelle de la communauté ou de l'écosystème, des propriétés des espèces contribuent à prédire les services fourragers et environnementaux. La production et qualité de la prairie varie avec la proportion de graminées, légumineuses et diverses (Bruinenberg *et al.* 2002 ; Baumont *et al.* 2008). En effet les graminées sont des composantes importantes de ces surfaces, elles contribuent donc fortement à la production et valeur nutritive des prairies. Les légumineuses, source d'azote, ont généralement un effet positif sur la qualité de la prairie (Baumont *et al.* 2008). Enfin les autres plantes, appelées diverses, sont regroupées car leur

proportion dans les prairies est souvent peu élevée. Duru *et al.* (2010b) ont montré un comportement similaire des diverses et graminées selon le type de milieu. En effet, lorsqu'on a des graminées de milieu riche, on a aussi des diverses de milieu riche et inversement. Parmi les diverses, il y a celles riches en feuilles qui ont effet positif sur la qualité de la prairie et celles riches en tiges qui ont un effet négatif sur la qualité de la prairie (Daccord *et al.* 2006). La proportion de graminées, légumineuses et diverses a donc un effet sur la production et qualité de la prairie.

De plus, les espèces peuvent être regroupées selon leurs caractéristiques liées au milieu et particulièrement selon leur niveau d'oligotrophie. Une espèce est dite oligotrophe quand elle se développe sur un milieu pauvre en éléments nutritifs. L'oligotrophie permet donc de classer les parcelles selon leurs caractéristiques par rapport au type de sol et de nutriments et contribue à la prévision des services environnementaux. Des indices d'Ellenberg ont été construits notamment pour approcher la fertilité du sol. La relation étroite entre l'indice de fertilité d'Ellenberg et la fertilité du sol a été montrée par Duru *et al.* (2010b).

L'entomogamie est une caractéristique des espèces liée à leur reproduction et particulièrement au mode de dispersion du pollen. Elle peut être considérée à l'échelle de la communauté. L'entomogamie représente l'ensemble des espèces dont la dissémination du pollen est effectuée par les insectes : on parle de reproduction entomogame. Pour que la reproduction entomogame ait lieu, il est nécessaire que les espèces fleurissent. L'entomogamie permet donc d'apprécier les services environnementaux des prairies permanentes, liés à la conservation des espèces.

Enfin, la phénologie d'une prairie caractérise son développement au cours d'un cycle de végétation. Elle est appréhendée à l'échelle de la communauté. La phénologie d'une prairie peut être approchée par des mesures de stade au niveau de celle-ci (Jeangros *et al.* 2001). La mesure d'un stade moyen d'une prairie tient compte de la présence et abondance des espèces précoces et tardives. Nous avons vu qu'une prairie était composée d'espèces à phénologie différente et que la phénologie était un facteur important de la valeur nutritive d'une prairie. La mesure du stade moyen d'une prairie permet donc de renseigner sur la qualité de celle-ci.

## 2. Quels sont les liens entre les états de la végétation et les critères d'aptitude des services fourragers et environnementaux ?

Les états de la végétation décrits précédemment permettent d'estimer des critères d'aptitude des services fourragers et environnementaux. Dans cette partie, nous identifierons les liens entre les états de la végétation (composition botanique et/ou fonctionnelle) et les critères d'aptitudes des services. Pour cela, nous organiserons la présentation selon les services.

### 2.1. Les états de la végétation pour prédire les critères d'aptitude des services fourragers

Les services fourragers font appel essentiellement à des attentes concernant la quantité et la qualité du fourrage. Les critères d'aptitudes des services fourragers seront donc orientés autour de ces deux attentes principales.

#### *Composition botanique*

La production d'une prairie est un critère d'aptitude, qui peut être exprimé de différentes façons. Il est possible de mesurer une **production pour un cycle de végétation** donné (Jeangros et Schmid 1991 ; Baumont *et al.* 2008) ou une **production annuelle** (Jeangros et Schmid 1991), qui inclut l'ensemble des cycles de végétation. La mesure de la production d'herbe à un instant donné est effectuée par des coupes d'herbe (Isselstein *et al.* 2007). Pour exprimer une dynamique temporelle, il faut étudier la **croissance de l'herbe**. Les courbes de croissance obtenues ont un intérêt pour la fauche ou pour la gestion du pâturage (stock d'herbe disponible, jours d'avances) (Mosimann 2001 ; Defrance *et al.* 2004). La mesure de la densité de l'herbe (en kg de MS/ha/cm) ou du **volume d'herbe disponible** (en m<sup>3</sup>) permet d'appréhender la production d'herbe au pâturage. La densité de l'herbe exprime le rapport entre le rendement et la hauteur d'herbe récoltée (Michaud 2004). Le volume d'herbe disponible est calculé par équivalent vache<sup>17</sup> et permet de connaître la masse d'herbage disponible pour la vache en tenant compte des hauteurs de végétation (Duru 2000). La productivité d'une prairie, mesurée par la production de MS (Jeangros et Schmid 1991), est influencée par sa composition botanique (Spehn *et al.* 2005).

L'estimation de la qualité d'une prairie est un second critère important de l'évaluation des services fourragers. La **valeur alimentaire** des fourrages issus des prairies permanentes

---

<sup>17</sup> Le volume d'herbe disponible par équivalent vache (par vache) est calculé à partir des mesures de hauteur d'herbe (H en base 5, soit H=0 pour une hauteur de 5cm) sur l'ensemble des parcelles affectées au pâturage

dépend pour partie de leur composition botanique (Bruinenberg *et al.* 2002 ; Huyghe 2008). La prévision de la **valeur nutritive**<sup>18</sup> des fourrages est nécessaire à la constitution des rations afin d'y incorporer si besoin les aliments complémentaires adéquats pour que la ration couvre les besoins de l'animal (Demarquilly et Jarrige 1981). La quantité d'énergie que tire un ruminant d'un fourrage, qui constitue son alimentation principale, dépend de deux caractéristiques : 1) de l'**ingestibilité** du fourrage et 2) de sa **digestibilité**, qui détermine la valeur énergétique. Rappelons que la digestibilité dépend avant tout de la quantité de parois cellulaires et de leur digestibilité, que son ingestibilité dépend également de la quantité de parois cellulaires et de la vitesse à laquelle elles se dégradent dans le rumen. Il faut également tenir compte de la **valeur azotée**, qui dépend de la quantité de matières azotées présentes dans le fourrage, de leur dégradabilité dans le rumen et de leur digestibilité dans l'intestin mais aussi de la **valeur énergétique** à travers la quantité de matière fermentescible disponible pour la synthèse des protéines microbiennes dans le rumen (Baumont *et al.* 2008). La quantité de minéraux et vitamines dépend de la proportion de feuilles (Demarquilly et Andrieu 1988).

L'appréciation de la qualité d'un fourrage peut se faire par son appétence. Au pâturage, ce sont les animaux eux mêmes qui prélèvent l'aliment. Ils peuvent donc choisir les espèces selon leur **palatabilité**<sup>19</sup>. Ce critère est difficilement appréciable : Mariaca *et al.* (1997) ont mesuré la palatabilité de quelques espèces mais de façon qualitative. Il est possible de mesurer la palatabilité d'une espèce par des observations d'animaux se nourrissant au pâturage ou par des observations de la parcelle avant et après pâturage (Dumont *et al.* 2007) mais ces mesures sont très lourdes.

La composition botanique des prairies influence aussi la valeur aromatique et sensorielle des produits animaux. Elle permet d'évaluer le **potentiel aromatique d'une prairie**, à travers les espèces aromatiques. Plusieurs études ont été effectuées sur l'évaluation du potentiel aromatique et des listes d'espèces aromatiques ont été créées (Gragnaire et Vanhaecke 1997 ; Mariaca *et al.* 1997 ; Brunias 2009). De plus, la réalisation de ce service dépendra de l'aptitude des plantes aromatiques à être consommées (Mariaca *et al.* 1997) et donc de leur **palatabilité**.

---

<sup>18</sup> La valeur nutritive d'un aliment correspond à sa valeur énergétique, azotée, minérale... alors que la valeur alimentaire intègre en plus des aspects relatifs à l'ingestibilité (Demarquilly et Andrieu 1988).

<sup>19</sup> Palatabilité : caractéristiques de l'aliment qui provoquent une réponse des sens de l'animal et donc un appétit ou une appétence plus ou moins développée pour cet aliment (Greenhalgh et Reid 1971)

### *Composition fonctionnelle*

La composition fonctionnelle contribue à évaluer les critères d'aptitude décrits ci-dessus. Nous avons vu que la proportion de graminées, légumineuses et diverses contribue à évaluer la production et qualité d'une prairie et donc les critères détaillés associés (Baumont *et al.* 2008). De plus, la phénologie et particulièrement le stade de développement des plantes, notamment au premier cycle de végétation (Jeangros et Amaudruz 2005) permet d'estimer la qualité d'une prairie. La TMS permet aussi d'appréhender la production et qualité d'une prairie (Duru *et al.* 2008).

Pour des services liés à la constitution de stocks, il faut tenir compte du temps de séchage du fourrage sur la parcelle (Zhong *et al.* 1997), notamment dans des zones de montagne où les orages sont très fréquents. La nature des espèces présentes et particulièrement leur proportion dans la biomasse est importante dans la qualification du critère lié à **l'aptitude au séchage du fourrage sur la parcelle**. Stilmant *et al.* (2004) ont montré des différences de comportement entre les graminées et légumineuses lors du séchage. Isselstein et Ridder (1993) ont montré que les tiges séchaient moins vite que les feuilles et que les jeunes espèces séchaient plus vite que les espèces en reproduction. Il faut donc tenir compte de la phénologie des espèces. La morphologie des espèces intervient également dans le temps de séchage : les espèces maigres sèchent plus vite que les autres espèces (Isselstein et Ridder 1993).

Les différences de valeur nutritive observées entre graminées peuvent être interprétées par les stratégies d'espèces vis-à-vis des ressources (acquisition ou conservation), en réponse aux conditions de milieu et d'exploitation, à l'origine de la classification fonctionnelle proposée par Cruz *et al.* (2010). Ainsi les espèces orientées vers la capture des ressources développent moins de parois végétales et plus d'éléments cytoplasmiques comme les protéines. A même biomasse, leur teneur en parois végétales sera plus faible (Ansquer *et al.* 2004) et la digestibilité de ces parois plus élevée (Al Haj Khaled *et al.* 2006) que celle des espèces à stratégie de conservation des ressources. De plus la valeur alimentaire des espèces à stratégie de capture de la ressource est plus élevée que celle des espèces à stratégie de conservation de la ressource avant la floraison. Après ce stade, l'évolution du rapport feuille/tiges peut diminuer les différences (Pontes *et al.* 2007). Des travaux effectués à l'échelle de la communauté confirment ces liens (Louault *et al.* 2005).



Le potentiel aromatique d'une prairie dépend aussi de la composition fonctionnelle. En effet, la composition en composés aromatiques est indispensable à l'évaluation du critère de proportion de la biomasse en composés aromatiques. Il est cependant nécessaire de tenir compte de l'évolution de la composition en composés aromatiques d'une espèce avec sa phénologie et particulièrement de la date de floraison. En effet, à partir du stade floraison d'une espèce, d'autres composés aromatiques sont synthétisés au niveau de la plante (Mariaca *et al.* 1997).

## 2.2. Les états de la végétation pour prédire les critères d'aptitude des services environnementaux

### 2.2.1. Séquestration du carbone

Des liens entre la diversité botanique et le **stockage de CO<sub>2</sub>** dans les sols ont été démontrés, notamment par Soussana et Lüscher (2007) qui concluent que l'accumulation de biomasse en réponse aux concentrations de CO<sub>2</sub> élevées était meilleure avec des parcelles riches en espèces qu'avec des parcelles plus pauvres en espèces.

### 2.2.2. Maintien de la diversité ordinaire

La biodiversité ordinaire peut se définir à la fois par opposition à une biodiversité extraordinaire ou patrimoniale (composée d'espèces ou d'écosystèmes rares ou en danger), mais aussi comme une biodiversité composée d'éléments (gènes, espèces, écosystèmes) courants mais dont la diversité est essentielle pour rendre des services écosystémiques. La composition botanique permet de qualifier les prairies selon leur **diversité en espèces** ou leur **abondance relative** (Leroux *et al.* 2008). Ces deux critères servent généralement à évaluer la biodiversité ordinaire du point de vue des espèces. Les prairies permanentes sont pour la plupart riches en espèces et constituent donc des réservoirs de biodiversité ordinaire (et dans certains cas extraordinaire). Elles permettent aussi de préserver la diversité génétique (Peter-Schmid *et al.* 2008). Des indicateurs de diversité comme l'indice de Shannon peuvent être utilisés pour évaluer la diversité ordinaire.

### 2.2.3. Maintien de la diversité patrimoniale

Certaines prairies permanentes peuvent être composées d'espèces patrimoniales (Delpech 2005). La composition botanique permet également d'informer sur le **nombre d'espèces à statut de protection** au sein d'une prairie, ce qui constitue un critère d'aptitude du service de conservation de la diversité patrimoniale. En effet, une espèce patrimoniale présente un intérêt du fait de sa rareté et/ou des risques de son extinction. Ces espèces sont répertoriées par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) et par l'Union Européenne et sont classées en tant qu'espèces menacées.

Le **nombre d'espèces oligotrophes** est une autre manière d'aborder la valeur d'une prairie sur le plan de la conservation de sa valeur écologique. Les habitats reconnus d'intérêt sur le plan communautaire (habitats NATURA2000) sont en effet généralement des situations oligotrophes, et la présence d'espèces rares (ou patrimoniales) est très souvent incompatible avec un niveau d'intensification fort.

### 2.2.4. Pollinisation

La composition fonctionnelle permet de regrouper les espèces selon l'abondance en espèces entomogames. Le pourcentage d'espèces entomogames contribue à évaluer le service de pollinisation, qui favorise la structure des populations d'insectes et notamment d'apoïdés ou de lépidoptères (Pott *et al.* 2009). Quand ce pourcentage est élevé, la quantité de nectar disponible est importante (Ebeling *et al.* 2008 ; Hopwood 2008). La **quantité de nectar disponible** constitue un critère permettant de caractériser le service de la pollinisation. En effet, plus cette quantité est importante, plus les populations d'insectes pollinisateurs sont importantes. De plus pour mesurer la quantité de nectar disponible, il ne suffit pas d'avoir une proportion en espèces entomogames élevées, il faut que celles-ci soient en fleur : la date de floraison est donc un trait de vie pertinent dans l'évaluation de ce critère. La proportion d'espèces entomogames d'une prairie exprime plutôt un potentiel, la gestion de la parcelle (dates de fauche ou de pâture) permettant ou non d'exprimer ce potentiel.

### 2.2.5. Aspect esthétique de la prairie

La composition botanique permet d'évaluer un nombre d'espèces en floraison ainsi qu'un nombre de couleurs différentes. A partir de ces deux états de la végétation, deux critères sont

estimés : la variété des floraisons et la variété des couleurs. Pour exprimer la notion d'abondance de floraison, il faut introduire un troisième critère d'aptitude, à savoir l'intensité de floraison (Pa. Fleury 1995). Ces trois critères reposent sur la visibilité des couleurs au niveau de la parcelle due aux floraisons et à leur intensité. Ils peuvent être regroupés sous un critère "**variété et intensité des couleurs**". Pour caractériser l'aspect esthétique d'une parcelle, il ne faut pas uniquement tenir compte des couleurs. La composition botanique permet également de décrire le type de grain de la parcelle, c'est-à-dire l'aspect de parcelle en termes d'homogénéité. Le type de grain contribue à expliquer le critère de "**variété du couvert**". Des caractéristiques liées à la composition fonctionnelle comme la hauteur de végétation doivent être intégrées pour compléter ce critère (Pa. Fleury 1995).

Ainsi, les compositions botaniques et fonctionnelles contribuent à prédire les critères d'aptitude des services fourragers et environnementaux. Notons que, pour les services environnementaux, les critères d'aptitude sont très proches des états de la végétation (ex : diversité en espèces, ...).

### EN RESUME

Service	Critère d'aptitude	Etats de végétation
Services fourragers	Production (pour un cycle de végétation, annuelle), croissance de l'herbe, volume d'herbe disponible), aptitude au séchage, portance du sol, qualité (valeur nutritive)	Composition botanique (présence et dominance en espèces) et fonctionnelle (TMS, types fonctionnels, date de floraison, proportion de graminées, légumineuses et diverses, phénologie d'une prairie, traits de vie)
Séquestration du carbone	Stockage du carbone	Composition botanique (présence en espèces), composition fonctionnelle (proportion de graminées, légumineuses et diverses)
Maintien de la diversité ordinaire	Diversité en espèces, abondance relative	Composition botanique (présence et dominance en espèces)
Maintien de la diversité patrimoniale	Nombre d'espèces à statut de protection	Composition botanique (présence en espèces), composition fonctionnelle (nombre d'espèces oligotrophes)
Pollinisation et contribution au maintien d'insectes pollinisateurs	Quantité de nectar disponible	Composition fonctionnelle (date de floraison, pourcentage d'espèces entomogames)
Aspect esthétique de la prairie	Variété et intensité des couleurs, variété du couvert	Composition botanique (dominance en espèces, présence en espèces), composition fonctionnelle (date de floraison, hauteur maximale)

### 3. Quels sont les liens entre les descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion et les états de la végétation ?

La composition botanique et fonctionnelle des prairies dépend à la fois des conditions pédoclimatiques et des pratiques de gestion effectuées sur les parcelles. Les descripteurs pédoclimatiques et des pratiques vont donc permettre de prévoir la composition botanique et fonctionnelle. Dans cette partie, nous nous attacherons à identifier les descripteurs principaux.

#### 3.1. Composition botanique

La composition botanique est influencée par des descripteurs pédoclimatiques (Hopkins 1986 ; Plantureux *et al.* 1993 ; Klimek *et al.* 2007 ; Kopec *et al.* 2010). Les conditions de sol tel que le **pH**, **l'humidité et la fertilité** ont un effet sur la composition floristique (Zang et Dong 2009) ou sur la dominance en espèces (Lenz et Facelli 2006). Les descripteurs de climat jouent aussi sur la composition botanique : la **température** ou la **pluviométrie**, qui influence l'état hydrique du sol, ont un effet sur la composition floristique (Kemp et Dowling 1991 ; Birell et Thomson 2006) et le **rayonnement** et la température sur la dominance en espèces (Birell et Thomson 2006 ; Merou et Papanastasis 2009)

Les pratiques de gestion des prairies ont un effet sur la composition botanique. L'intensité de pâturage, mesurée par un **chargement global ou instantané** peut influencer la composition de la végétation (Pykala 2004 ; Klimek *et al.* 2007 ; May *et al.* 2009 ; Zhang et Dong 2009). En effet, une intensité de pâturage élevée modifie la composition de la végétation (Schtickzelle *et al.* 2007) notamment en diminuant les espèces de légumineuses et en favorisant les espèces annuelles (Loeser *et al.* 2007). De plus, une augmentation conséquente du nombre de coupe entraîne une diminution du nombre d'espèces (Kramberger et Gselman 2000 ; Kramberger et Kaligaric 2008). La **date de fauche**, qui est une pratique déterminante (Leroux *et al.* 2008) ainsi que le **nombre d'utilisations (coupes ou passages d'animaux)** permettent aussi d'approcher le niveau d'intensité d'utilisation de la prairie. L'intensité d'utilisation d'une prairie est définie par le nombre d'utilisations d'une parcelle (fauche ou pâturage), sa précocité d'utilisation, le chargement animal et le niveau de fertilisation. De plus l'effet de la fertilisation sur la composition botanique est important. La fertilisation influence la composition botanique (Broyer et Prudhomme 1995 ; Elisseou *et al.* 1995 ; Jones et Haggart 1997 ; Galka *et al.* 2005 ; Cop *et al.* 2009 ; Brum *et al.* 2009 ; Szeman 2009) en diminuant généralement la richesse floristique et en privilégiant la dominance de quelques espèces

compétitrices (Plantureux et Thorion 2005). Seuls les milieux extrêmement pauvres peuvent voir leur richesse floristique augmenter avec le niveau de fertilité. Celle-ci est souvent exprimée en **quantité ou nombre d'apports**, en considérant la **fertilisation azotée, phosphatée et potassique**, sous **forme minérale ou organique**.

### 3.2. Composition fonctionnelle

La composition fonctionnelle est influencée par des descripteurs de climat comme le **rayonnement** ou la **température** (Birell et Thomson 2006 ; Merou et Papanastasis 2009 ; Martini *et al.* 2010) et de sol comme **l'humidité, la fertilité ou l'acidité** (Lenz et Facelli 2006 ; Seghieri *et al.* 2009). Plus généralement, les traits de vie sont influencés par les conditions climatiques et édaphiques (Diaz *et al.* 1998; Fonseca *et al.* 2000; Pakeman *et al.* 2009; Duru *et al.* 2007, Cruz *et al.* 2010), avec un effet important de la **fertilité du sol** sur la TMS (Ansquer *et al.* 2009 ; Lavorel et Garnier 2002; Duru *et al.* 2007). L'effet de la fertilité du sol est aussi important sur la proportion d'espèces oligotrophes et d'espèces entomogames (Segheri *et al.* 2009).

Les pratiques de gestion des prairies ont une influence sur la composition fonctionnelle. En effet, l'intensification des pratiques, évaluée par le **chargement animal, le nombre d'utilisation, la date de première utilisation ou la fertilisation (azotée, potassique ou phosphatée)**, ont un effet négatif sur les espèces entomogames (Ebeling *et al.* 2008 ; Yoshihara *et al.* 2008 ; Pott *et al.* 2009 ; Batary *et al.* 2010). Beaucoup d'espèces entomogames sont sensibles à la pression de pâturage (Franzen et Nilson 2008 ; Pott *et al.* 2009 ; Batary *et al.* 2010) ou à la fertilisation. De même ces effets sur la proportion de graminées, légumineuses et diverses (Broyer et Prudhomme 1995 ; Pervanchon 2004 ; Lenz et Facelli 2006), sur la date de floraison (Franzen et Nilson 2008 ; Sjodin *et al.* 2008) et sur la phénologie des espèces (Ansquer 2006, Lavorel et Garnier 2002; Duru *et al.* 2007) sont importants. Par exemple, une exploitation tardive ou peu intense de la prairie favorisera un stade moyen élevé alors qu'une exploitation plus précoce ou plus intense de la prairie laissera celle-ci à un stade de développement peu avancé (végétatif à montaison). De même, la TMS est sensible aux pratiques de gestion : elle diminue avec la pression de **pâturage** (Cingolani *et al.* 2005), la **fréquence de fauche** (Ansquer *et al.* 2004) et une **fertilisation** élevée (Fonseca *et al.* 2000 ; Al Haj Khaled *et al.* 2005; McIntyre 2008 ; Ordonez *et al.* 2010). Les TF étant dépendants des traits de vie, les descripteurs influençant les TF sont les mêmes que ceux influençant les traits de vie. De plus, une relation étroite entre les pratiques de gestion et la

fertilité du milieu a été mise en évidence (Balent et Duru 1984 ; Jeangros *et al.* 1994 ; Cruz *et al.* 2002). Les TF, dépendant des traits de vie, caractérisent une prairie pour une combinaison cohérente entre pratiques et fertilité du milieu (Cruz *et al.* 2002).

A court terme, le climat et les pratiques de gestion peuvent faire varier la production et la qualité, sans que la composition floristique ne soit fortement modifiée. La date de 1<sup>ère</sup> utilisation de la parcelle est un descripteur des pratiques qui influence directement la production d'herbe. De plus une fauche précoce ou tardive, le nombre d'utilisation ou la fertilisation ont une influence sur la biomasse (Jeangros et Bertola 2002 ; Erizhev et Tamov 2003 ; Gutauskas *et al.* 2005 ; Kohouten *et al.* 2005 ; Cop *et al.* 2009). Enfin des conditions climatiques extrêmes (température, précipitations) perturberont directement la production et qualité du fourrage (Smit *et al.* 2008). Les conditions climatiques (pluviométrie, ...) ont également une influence sur la portance du sol. Ce critère est déterminant dans la réalisation du pâturage puisqu'il faut que les animaux puissent aller sur la parcelle.

Ces descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion peuvent également avoir une influence directe sur les critères d'aptitude des services environnementaux. Le service de pollinisation est dépendant de l'intensité d'utilisation des prairies. En effet, une fauche précoce ou un pâturage intensif ne permettra pas aux espèces de monter en fleur et il n'y aura pas de pollinisation. L'aspect esthétique d'une prairie est également directement influencé par la date de 1<sup>ère</sup> exploitation, le chargement ou la fertilisation (azotée et phosphatée), qui contribuent à la modification de l'aspect visuel de la parcelle dans le temps (Pervanchon 2004 ; Klimek *et al.* 2007 ; Szeman 2009 ; Cop *et al.* 2009). Par ailleurs, la gestion de la surface herbagère peut influencer la séquestration du carbone. En effet, une réduction de la fertilisation pour les prairies intensives ou une légère intensification des prairies pauvres permettrait aussi de favoriser le stockage du carbone (Jones et Donnelly 2004). A long terme, si le climat change ou si les pratiques changent de façon durable, les états de végétation vont changer aussi.

La température est un descripteur de climat qui a une action importante sur la croissance et le développement des plantes car elle influe directement sur les réactions biochimiques telles que la respiration (Beroukoutou 1986). Dans le déroulement d'un phénomène biologique, il faut des différences de durées pour atteindre un état d'avancement. Par exemple, un stade végétatif est atteint d'autant plus vite que les phénomènes qui l'ont préparé étaient rapides. La somme de température est considérée comme une durée (Beroukoutou 1986) et peut être mise

en lien avec le développement d'une plante. Il est ainsi possible de d'expliciter la date de floraison d'une espèce en somme de température (en °C jours) et non en jour. Cette méthode permet de s'affranchir de la localisation géographique, qui traduit des délais en jours pour atteindre un stade phénologique par exemple. La somme de température (ST) est calculée par la somme des moyennes des températures minimales et maximales d'une journée (bornées entre 0 et 18°C). De nombreuses discussions ont lieu sur le terrain au sujet de la date de début de sommation des températures (Jeangros et Amaudruz 2005 ; Theau et Zerourou 2008). La date la plus utilisée en France et notamment par l'équipe de recherche de Toulouse est le 1<sup>er</sup> février. Dans notre travail, nous avons considéré la somme de température comme une variable de temps, permettant d'appréhender la production et qualité des prairies, en commençant la sommation le 1<sup>er</sup> février.

### EN RESUME

ETATS DE LA VEGETATION	DESCRIPTEURS	
	pédoclimatiques	pratiques de gestion
<i>Composition botanique</i>		
Composition floristique		Chargement global et instantané, nombre d'utilisations, date de 1 <sup>er</sup> exploitation, quantité de fertilisation azotée (minérale et organique), potassique et phosphatée
Abondance en espèces		
<i>Composition fonctionnelle</i>		
Proportion de graminées, légumineuses et autres plantes		Chargement global et instantané, nombre d'utilisations, date de 1 <sup>er</sup> exploitation, quantité de fertilisation azotée (minérale et organique), potassique et phosphatée
Nombre d'espèces oligotrophes		
Pourcentage d'espèces entomogames	sol et climat	Quantité de fertilisation azotée (minérale et organique), potassique et phosphatée
Stade moyen de développement		
Date de floraison		Chargement global et instantané, nombre d'utilisations, date de 1 <sup>er</sup> exploitation, quantité de fertilisation azotée (minérale et organique), potassique et phosphatée
Teneur en matière sèche		
Hauteur maximale		
Types fonctionnels		

Nous avons donc recensé les services fourragers et environnementaux des prairies permanentes. Ces services peuvent être prédits par des critères d'aptitude, eux même estimés par des états de la végétation, prédits par des descripteurs pédoclimatiques ou des pratiques de gestion (Figure 9, Tableau 2). Les liens entre les descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion avec les états de la végétation ont été mis en évidence (Figure 9, Tableau 2). Nous avons également vu que les descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion peuvent avoir un effet à court terme sur les critères d'aptitude (Figure 9, Tableau 2). L'aptitude d'une prairie à rendre des services fourragers et environnementaux peut donc être évaluée à travers l'étude des liens entre les descripteurs et les états de la végétation, entre les états de la végétation et les critères d'aptitude et enfin entre les critères d'aptitude et les services.



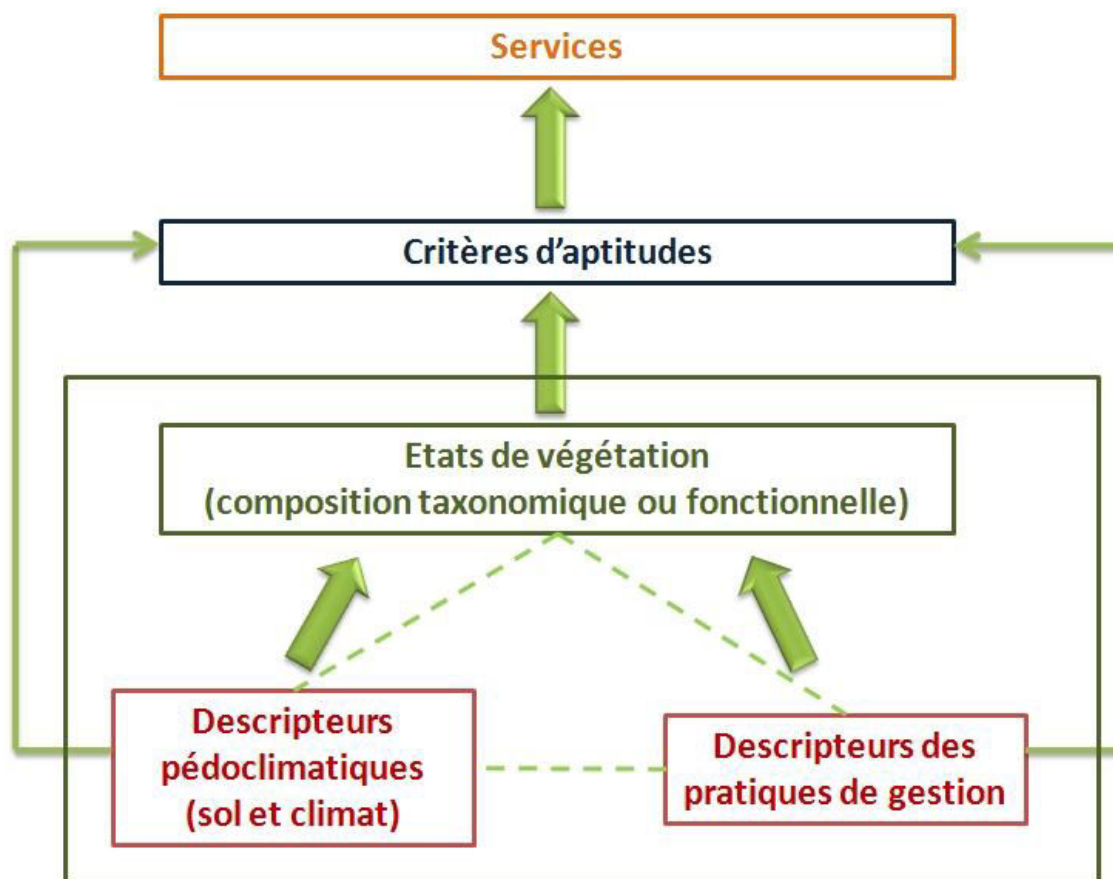


Figure 9. Démarche du travail de thèse en quatre étapes (descripteurs, états de végétation, critères d'aptitude et services) et mise en évidence des liens entre ces quatre étapes.

**Tableau 2a. Services fourragers, critères, états de la végétation et descripteurs retenus à partir de l'étude bibliographique.**

SERVICES FOURRAGERS										
valeur aromatique et sensorielle	Stock de bonne qualité au printemps et pâturage de bonne qualité pour les animaux exigeants	Stock exclusif de bonne qualité au printemps et en été	Stock sans attente de qualité au printemps et pâturage des repousses en été automne des animaux à faibles besoins	Stock exclusif de printemps sans attente de qualité	Pâturage de qualité toute l'année (sauf l'hiver) des animaux exigeants, avec forte contribution à la ration	Nourrir les animaux à besoins exigeants à l'herbe de la fin de printemps à l'automne avec un apport extérieur possible	Finition à l'herbe au printemps avec utilisation possible en été et automne	Faire pâturer les animaux l'hiver et poursuivre l'utilisation au printemps	Pâturage d'ajustement sans attente de qualité et sans catégorie d'animaux préférentielle	Nourrir des animaux à faibles besoins à l'herbe du printemps à l'automne sans apport extérieurs et sans attente de qualité
CRITERES D'APTITUDE DE LA VEGETATION										
Proportion de la biomasse en composés aromatiques	Qualité de l'herbe (valeur nutritive, digestibilité)									
	Production d'herbe									
	Séchage au sol									
	Palatabilité		Palatabilité					Palatabilité		
	Portance du sol									
ETATS DE LA VEGETATION										
	Présence/absence des espèces									
	Dominance en espèces									
	Types fonctionnels									
	TMS									
Date de floraison	Stade de développement									
	Proportion en graminées, légumineuses et diverses									
DESCRIPTEURS										
PEDOCLIMATIQUE										
	Rayonnement annuel									
	Altitude									
	Température									
	Précipitations									
	Humidité sol									
	Acidité sol									
	Fertilité sol									
PRATIQUES DE GESTION										
	Fertilisation N									
	Fertilisation totale K									
	Fertilisation totale P									
	Chargement global									
	Chargement instantané									
	Date de 1 <sup>er</sup> exploitation									
	Nombre d'utilisations									
	Pression de pâturage (type d'utilisation, durée de pâturage)									
	Durée de pâturage									

Tableau 2b. Services environnementaux, critères, états de la végétation et descripteurs retenus à partir de l'étude bibliographique.

SERVICES ENVIRONNEMENTAUX				
Séquestration du carbone	Pollinisation	Aspect esthétique de la prairie	Contribution au maintien de la diversité ordinaire	Contribution au maintien de la diversité patrimoniale
CRITERES D'APTITUDE DE LA VEGETATION				
Stockage de carbone	Quantité de nectar disponible	Variété et intensité globale de floraison	Diversité des espèces floristiques	Nombre d'espèces à statut de protection
		Variété du couvert	Abondance relative	
ETATS DE LA VEGETATION				
Présence/absence des espèces		Présence/absence des espèces		
Dominance en espèces		Dominance en espèces		
	Date de floraison	Hauteur de végétation		
	Pourcentage d'espèces entomogames			Nombre d'espèces oligotrophes
DESCRIPTEURS				
PEDOCLIMATIQUE				
Rayonnement annuel				
Altitude				
Température				
Précipitations				
Humidité sol				
Acidité sol				
Fertilité sol				
PRATIQUES DE GESTION				
Fertilisation N				
Fertilisation totale K				
Fertilisation totale P				
Chargement global				
Chargement instantané				
Date de 1° exploitation				
Nombre d'utilisations				
Pression de pâturage (type d'utilisation, durée de pâturage)				
Durée de pâturage				

## **B. Sélection des services, critères d'aptitude, états de la végétation et descripteurs étudiés**

### **I. Services fourragers et environnementaux étudiés**

La première étape du travail a été de sélectionner les services fourragers et environnementaux étudiés. L'identification des services fourragers est basée sur un travail de bibliographie, d'enquêtes et d'analyses statistiques. L'identification des services environnementaux est effectuée à partir des travaux de bibliographie explicités précédemment.

#### 1. Services fourragers

##### 1.1. Matériels et méthodes

Dans le cadre de l'action 1 du programme CASDAR Prairies Permanentes, 78 exploitations agricoles de différents systèmes d'élevage (bovin lait et viande, ovin lait et viande) ont été enquêtées. Seules les exploitations agricoles dont au moins 50% de la SFP est constituée de prairies permanentes ont fait l'objet d'une étude. Cette condition, satisfaite dans les systèmes herbagers d'altitude, a été posée au début du projet CASDAR pour les exploitations agricoles de plaine, de façon à étudier des systèmes de production dans lesquels les prairies permanentes représentent une composante forte du système fourrager et ont un réel rôle d'alimentation. Après avoir recueilli des informations sur les caractéristiques générales de l'exploitation agricole (localisation, production...), chaque parcelle de prairie permanente a été recensée et caractérisée. Des informations quantitatives et qualitatives ont été recueillies à dire d'éleveurs sur les caractéristiques générales de la parcelle (type de sol, exposition, pente...), les pratiques de gestion effectuées généralement (fauche, fertilisation...) et les attentes de l'éleveur vis à vis de chaque parcelle, détaillées pour les différentes saisons de production (Annexe 1). Au total, 1500 parcelles ont été recensées.

A partir de cette base de données, un travail statistique d'analyse des services a été effectué (Pissot 2009). Une analyse en composantes multiples (ACM) suivie d'une classification hiérarchique ont permis de conserver 25 services des prairies, répartis selon des attentes concernant le fourrage conservé ou le pâturage (Pissot 2009). A partir de ces 25 services identifiés, un travail d'expertise a consisté à regrouper des services très proches et à retravailler certains d'entre eux afin de réduire leur nombre à 10. Pour cela, les caractéristiques de chaque service mises en évidence dans les résultats des ACM ont été étudiées. L'interprétation des données a conduit à regrouper certains services et à en préciser

d'autres. Les libellés ont ensuite été harmonisés, en tenant compte de la temporalité, du niveau d'exigence en termes de quantité et qualité du fourrage et des catégories d'animaux concernées. Ce travail a été effectué par des experts fourragers de l'Institut de l'Elevage (Jean Pierre Farrié, Fabienne Launay et moi même) et des CA (un ou deux représentants par grande région). Les services identifiés correspondent donc à un service principal rendu par la prairie au cours de la saison herbagère.

## 1.2. Services identifiés par les éleveurs sur les zones considérées

Au total 10 services fourragers ont été retenus (Tableau 3, Annexe 2). Ils représentent les attentes de l'éleveur en termes de stockage ou de consommation d'herbe sur place et incluent une ou plusieurs saisons d'utilisation. Ils sont associés à des catégories d'animaux, avec des besoins variés.

Quatre services sont liés à la constitution de stocks fourragers : les attentes en termes de qualité sont variables (Tableau 3). De plus, parmi ces quatre services, certains incluent un pâturage des repousses pour des animaux à faible ou fort besoins. Les six autres services fourragers sont caractérisés par des attentes liées à la consommation d'herbe sur place (pâturage). La saison de pâturage peut être très large (toute l'année) ou sur une période restreinte (printemps). Les catégories d'animaux concernées peuvent être peu exigeantes comme des vaches gestantes ou très exigeantes comme des jeunes bovins en finition ou des vaches laitières. La prairie peut constituer le seul aliment de la ration mais parfois une complémentation est nécessaire. Ainsi les services rendus par les prairies permanentes peuvent répondre à différentes attentes et sont utilisés dans tous types de systèmes d'exploitation.

**Tableau 3. Services fourragers recensés à partir des enquêtes réalisées en 2008 dans le cadre de l'action 1 du programme CASDAR.**

Services fourragers
Stock de bonne qualité au printemps et pâturage de bonne qualité pour les animaux exigeants
Stock exclusif de bonne qualité au printemps et en été
Stock sans attente de qualité au printemps et pâturage des repousses en été automne des animaux à faibles besoins
Stock exclusif de printemps sans attente de qualité
Pâturage de qualité toute l'année (sauf l'hiver) des animaux exigeants, avec forte contribution à la ration
Nourrir les animaux à besoins exigeants à l'herbe de la fin de printemps à l'automne avec un apport extérieur possible
Finition à l'herbe au printemps avec utilisation possible en été et automne
Faire pâturer les animaux l'hiver et poursuivre l'utilisation au printemps
Pâturage d'ajustement sans attente de qualité et sans catégorie d'animaux préférentielle
Nourrir des animaux à faibles besoins à l'herbe du printemps à l'automne sans apport extérieurs et sans attente de qualité
extérieur possible
Finition à l'herbe au printemps avec utilisation possible en été et automne
Faire pâturer les animaux l'hiver et poursuivre l'utilisation au printemps
Pâturage d'ajustement sans attente de qualité et sans catégorie d'animaux préférentielle
Nourrir des animaux à faibles besoins à l'herbe du printemps à l'automne sans apport extérieurs et sans attente de qualité

Le service de contribution des prairies permanentes à la valeur aromatique des produits transformés est un service fourrager lié à la composition botanique du fourrage. L'évaluation de ce service peut se baser sur la construction de listes d'espèces (Annexe 3). Cependant, celles-ci ne sont pas suffisantes pour évaluer ce service. En effet, il faut tenir compte de la proportion de ces espèces dans la biomasse et de leur aptitude à être consommées. De plus le devenir des composés d'intérêts pour la qualité des produits présents dans les plantes aromatiques varie fortement selon le mode d'exploitation et de conservation du fourrage (pâturage, ensilage, foin). A l'heure actuelle, il n'existe pas d'outils validés mesurant aussi précisément la contribution des prairies permanentes à la valeur aromatique des produits transformés. **Nous ne traiterons donc pas ce service, et nous nous limiterons donc aux dix services fourragers décrits ci-dessus.**

## 2. Services environnementaux

Nous ne retiendrons que les services environnementaux pour lesquels un outil validé et simple d'utilisation d'aide à l'évaluation de ce service a été mis en place.

### *Séquestration du carbone*

Des essais de quantification de stockage de carbone selon les types de couverts ont été effectués (Gac *et al.* 2010 ; Graux 2011) mais il n'existe pas encore de modèle de prédiction ou d'outil simple d'évaluation de la séquestration potentielle du carbone intégrant la diversité botanique des couverts. **Nous ne travaillerons donc pas sur ce service.**

### *Maintien de la diversité ordinaire et patrimoniale*

L'évaluation de ce service repose sur la prédiction du nombre d'espèces total (richesse floristique), oligotrophes et patrimoniales pour la diversité patrimoniale ou de la richesse spécifique et abondance relative pour la diversité ordinaire. Un outil (eFLORAsys) contribue à l'évaluation de ces services, en permettant, à partir des relevés botaniques, de calculer un nombre d'espèces oligotrophes ou une richesse spécifique sur cette prairie. **Nous étudierons donc ces services dans notre travail.**

### *Pollinisation*

Le service de pollinisation peut être considéré selon trois aspects : en tant que service intrant, en tant que service produit contribuant à la production agricole et en tant que service produit permettant le maintien des populations d'insectes et la conservation de leur diversité spécifique et génétique. Comme indiqué précédemment, nous n'étudions pas les services intrants car ils concernent peu les prairies permanentes. En revanche les deux derniers aspects concernent la présence et survie des populations d'insectes pollinisateurs. En effet s'ils disparaissent, la production agricole (apiculture) n'est pas envisageable de même que la conservation de leur diversité. Ainsi nous nous focaliserons sur le maintien des espèces pollinisatrices. Le logiciel eFLORAsys permet, à partir des relevés botaniques effectués sur une parcelle, de calculer un pourcentage d'espèces entomogames sur cette prairie. Nous utiliserons cette information pour évaluer le service de pollinisation et contribution au maintien d'insectes pollinisateurs. **Nous étudierons donc ce service.**

### *Aspect esthétique de la prairie dans le paysage*

Pa. Fleury (1995) a construit un outil d'évaluation de l'aspect esthétique d'une parcelle dans le paysage au niveau des Alpes du Nord. Cet outil est basé sur une approche de la végétation, en tenant compte de la structure (type de grain, hauteur de la végétation) et de la composition de la végétation (diversité et abondance des floraisons). **Nous testerons cet outil dans un cadre national pour évaluer l'aspect esthétique d'une prairie.**

**Parmi les services produits environnementaux, seuls quatre services seront étudiés : le maintien de la diversité ordinaire, le maintien de la diversité patrimoniale, la pollinisation et l'aspect esthétique de la parcelle.**

## **II. Critères d'aptitude des services fourragers et environnementaux étudiés**

### 1. Critères d'aptitude des services fourragers

Les critères d'aptitude des services fourragers ont été décrits précédemment en considérant la production et la qualité de la prairie. Nous avons fait le choix de travailler sur le potentiel de production de la parcelle, d'autant plus qu'il est possible de mesurer ces critères facilement. En revanche, il est difficile de travailler sur la production et la qualité de l'herbe pâturée. En effet, cela nécessiterait un suivi précis de l'utilisation de chaque parcelle pour faire des prélèvements d'herbe avant et après chaque passage d'animaux ou la mise en œuvre d'un protocole avec une fréquence de coupe élevée au printemps, nécessitant une logistique trop exigeant compte tenu du nombre de parcelles. Pour étudier la dynamique temporelle de la production au printemps, nous nous baserons sur les critères d'évolution entre le début et la fin du printemps.

Le critère d'aptitude lié à la réalisation du pâturage (portance du sol) sera étudié dans notre travail.

En ce qui concerne la valeur alimentaire de l'herbe, nous avons limité l'étude aux critères qui déterminent la valeur nutritive (digestibilité de la matière organique (dMO) et teneur en matières azotées totales (MAT)) et pour partie également l'ingestibilité. Les autres critères qui influencent l'ingestion d'herbe et les préférences alimentaires au pâturage, comme la préhensibilité, qui dépend de la structure du couvert végétal et la palatabilité, qui dépend des propriétés sensorielles des plantes ne seront pas étudiés. Nous n'étudierons pas non plus les critères liés à la teneur en vitamines ou minéraux. Pour étudier la qualité d'une prairie, nous



travaillerons donc principalement sur les critères de dMO estimée à partir de la digestibilité enzymatique au laboratoire et sur la MAT car ce sont les plus importants pour estimer les différentes composantes de la valeur alimentaire (UF, PDI et UE) (Baumont *et al.* 2008).

Enfin, nous avons identifié que l'aptitude au séchage sur la parcelle dépendait de la proportion de graminées et légumineuses mais aussi de la phénologie des espèces. Nous retiendrons également ce critère.

## 2. Critères d'aptitude des services environnementaux

L'ensemble des critères d'aptitude mis en avant dans les services environnementaux retenus sera étudié. Ainsi par exemple, nous étudierons la quantité de nectar disponible pour évaluer le service de pollinisation (Tableau 2b).

### **III. Etats de la végétation et des descripteurs étudiés**

Les états de la végétation regroupent les compositions botanique et fonctionnelle. Ces états de la végétation ont été décrits précédemment. Ils concernent :

- la composition botanique : présence et abondance en espèces ;
- la composition fonctionnelle : propriétés des espèces (proportion de graminées, légumineuses et diverses, nombre d'espèces oligotrophes, proportion d'espèces entomogames, phénologie de la parcelle) et traits de vie (TMS, date de floraison, hauteur de la végétation et les TF).

Dans notre travail, nous retiendrons l'ensemble de ces états de la végétation. En effet, la composition botanique contribue à l'évaluation des services fourragers et environnementaux. De plus, la composition fonctionnelle est orientée sur les services fourragers et environnementaux.

En ce qui concerne les descripteurs, nous avons choisi de considérer l'ensemble des descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion identifiés précédemment. De plus dans le cadre des enquêtes réalisées dans l'action 1 du programme CASDAR, nous avons identifié d'autres descripteurs potentiels que nous intégrerons également, afin de travailler sur une liste de descripteurs la plus complète possible. L'objectif ici est de sélectionner les descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion pertinents.



# **Objectif et stratégie du travail de thèse**



## I. Objectif et hypothèses du travail de thèse

Mon travail de thèse a pour objectif de développer une méthode permettant de prédire, à partir de la végétation, des conditions de milieu et des pratiques de gestion, l'aptitude des prairies permanentes à rendre des services fourragers et environnementaux.

Dans notre travail, nous nous intéressons à **l'aptitude des prairies permanentes** à rendre des services, c'est-à-dire à leur capacité à remplir ce service même si celui-ci n'est pas exprimé. Il est important de noter qu'un service peut être plus ou moins rendu au cours du temps considéré, ici l'année.

L'analyse bibliographique nous a permis d'identifier les services fourragers et environnementaux qu'il est possible de mettre en lien avec les états de la végétation et les descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion. Pour les services fourragers, leur identification a fait l'objet d'un travail d'enquêtes en élevage, réalisé dans le cadre du programme CASDAR (cf. partie 3, chapitre 1). L'analyse de la bibliographie nous a également permis d'identifier les critères pertinents pour évaluer l'aptitude des prairies à rendre les services que nous avons choisis d'étudier.

Dans un premier temps, nous sélectionnerons les services étudiés. Puis nous préciserons les descripteurs, états de la végétation et critères retenus avant de les étudier. Pour développer une méthode de prévision des services étudiés, nous avons identifié trois étapes nécessaires (Figure 10) :

- 1) analyser dans quelles mesures les descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion permettent de prédire les états de la végétation ;
- 2) analyser dans quelles mesures les états de la végétation permettent de prédire les critères d'aptitude ;
- 3) analyser les liens entre les critères d'aptitude et les services fourragers et environnementaux.

Ce travail reposait sur plusieurs hypothèses :

- 1) il existe des descripteurs facilement mesurables sur le terrain permettant de prédire les états de la végétation considérés ;

- 2) il existe des états de la végétation permettant de prédire avec une qualité suffisante les critères d'aptitude ;
- 3) les descripteurs, états de la végétation ou critères d'aptitude peuvent être différents selon le service considéré ;
- 4) les différents liens mis en évidence peuvent être quantifiés pour construire des modèles de prédiction des services.

Cette démarche de travail en plusieurs étapes a déjà été utilisée par d'autres auteurs, notamment dans l'évaluation des services fourragers dans les Alpes du Nord, en prenant en compte des états de la végétation relatifs à la composition fonctionnelle (morphologie et structure de la végétation) et quelques critères d'aptitude (Ph. Fleury 1994). Dans notre étude, qui a pour ambition de couvrir une aire géographique beaucoup plus large avec des conditions pédoclimatiques et de pratiques plus variées, nous travaillerons sur une liste exhaustive de descripteurs, états de la végétation et critères d'aptitude. Nous intégrerons également certains services environnementaux.

## **II. Dispositifs expérimentaux utilisés**

Pour étudier les services fourragers et environnementaux ainsi que leurs aptitudes à être rendus, deux dispositifs expérimentaux ont été mis en œuvre (Figure 10) :

- 1) Un réseau de 190 parcelles de prairie permanente, choisies principalement dans les exploitations agricoles dans lesquelles les enquêtes sur les services fourragers des prairies permanentes ont été réalisées, et complétées par quelques parcelles de sites expérimentaux. Des mesures de composition botanique, de production et de valeur nutritive ont été effectuées durant deux années (2009 et 2010). Nous appellerons ce dispositif "*réseau national*" ;
- 2) Un dispositif expérimental mis en œuvre sur le site de Marcenat (Unité Expérimentale INRA des Monts d'Auvergne) où trois parcelles de prairies présentant un gradient de diversité botanique au sein d'un même milieu ont fait l'objet d'un suivi hebdomadaire de la production et de la valeur nutritive pendant 3 cycles consécutifs de végétation durant les années 2007 et 2008. Nous appellerons ce dispositif "*Prairies Marcenat*".

Nous présenterons la partie résultat selon les 3 étapes identifiées : 1) liens entre descripteurs et états de la végétation, 2) liens entre états de la végétation et critères d'aptitude et 3) liens entre critères d'aptitude et services.

### III. Démarche adoptée

#### 1. Etude des liens entre les descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion et les états de la végétation

Dans cette partie, nous faisons l'hypothèse que les états de la végétation sont influencés par différents descripteurs mesurables et qu'il est possible de quantifier ces liens. Nous testerons les liens existants entre ces descripteurs et états de végétation sur le large gradient de conditions pédoclimatiques et des pratiques observées dans le "*réseau national*" et évaluerons l'importance des descripteurs sur les différents états de végétation. Pour réaliser cette étude, nous travaillerons sur les données du "*réseau national*" et sur les enquêtes réalisées dans le cadre de l'action 1 du programme CASDAR. Nous nous baserons : 1) pour les descripteurs climatiques sur des données de Météo France, pour les descripteurs de sol sur des indices calculés à partir des données de végétation, pour les descripteurs des pratiques de gestion sur des données d'enquêtes (dires d'éleveurs) et 2) pour les états de la végétation sur un relevé botanique complet effectué sur chaque parcelle au printemps 2009. Dans cette partie, l'ensemble des données concernant la végétation (composition botanique et fonctionnelle) provient donc d'un relevé botanique complet effectué en début de suivi sur les prairies permanentes. De plus, les descripteurs étudiés sont des descripteurs concernant la parcelle dans son ensemble. **Le présent travail a donc été réalisé à l'échelle de la parcelle.** L'étude des liens entre les descripteurs et les états de la végétation a fait l'objet de la publication 1 acceptée par la revue *Journal of Agricultural Science* (Figure 10).

#### 2. Etude des liens entre les états de la végétation et les critères d'aptitude

Dans cette partie, nous faisons l'hypothèse que les critères d'aptitude sont principalement influencés par différents états de la végétation et qu'il est possible de quantifier ces liens. Cette étude a été effectuée en deux étapes. Dans un premier temps, nous travaillerons sur le dispositif « *Prairies Marcenat* ». Ce dispositif expérimental contrôlé nous a permis de tester dans quelles mesures la caractérisation fonctionnelle d'une parcelle couplée avec les sommes

de température ou les jours de repousse permet de prévoir la dynamique temporelle de la production de biomasse et de sa valeur nutritive sur un même milieu. Cette étude a fait l'objet de la publication 2 soumise à la revue *Grass and Forage Science* (Figure 10).

Ensuite, nous travaillerons sur les données du "réseau national" et particulièrement sur les critères d'aptitude des services fourragers (données de production et de valeur nutritive mesurées à 4 périodes de la saison de végétation), afin de tester si la composition fonctionnelle permet d'expliquer la variabilité des critères d'aptitude fourragers sur une large gamme de prairies permanentes. Pour cela, **nous travaillerons sur les données récoltées dans des mises en défens sur les 190 parcelles du réseau national**. Les états de la végétation étudiés au sein des mises en défens permettent de caractériser la composition fonctionnelle: il s'agit de l'estimation de la proportion de graminées, légumineuses et diverses, de l'estimation des TF des graminées (selon la typologie proposée par l'INRA Toulouse) et de l'estimation de leur stade de végétation.

Les deux études réalisées concernent uniquement la composition fonctionnelle et les critères d'aptitude des services fourragers. En écologie, les critères d'aptitude des services environnementaux sont très proches des états de la végétation. Une simple interprétation ou un calcul à partir des états de la végétation permet d'obtenir les critères d'aptitude des services environnementaux. Des outils de calcul des critères d'aptitude à partir des états de la végétation ont été construits. Nous les utiliserons pour prédire les critères d'aptitude à partir des états de la végétation.

### 3. Une méthode pour lier les critères d'aptitude aux services fourragers et environnementaux des prairies permanentes

Dans cette partie, nous établirons les liens entre les critères d'aptitude identifiés et les services fourragers et environnementaux considérés (Figure 10). Pour cela, nous utiliserons une approche multicritères, à l'aide du logiciel DEXi<sup>®</sup>, pour prédire les liens entre les critères d'aptitude et les services. Nous mettrons en avant ces liens pour trois services environnementaux et quatre services fourragers, afin de comprendre la démarche de travail et de montrer dans quelle mesure une prairie peut concilier les services fourragers et environnementaux. L'étude du quatrième service environnemental, à savoir l'aspect esthétique d'une prairie permanente, sera basé sur un outil mis en place par Pa. Fleury (1995), permettant d'évaluer directement ce service.



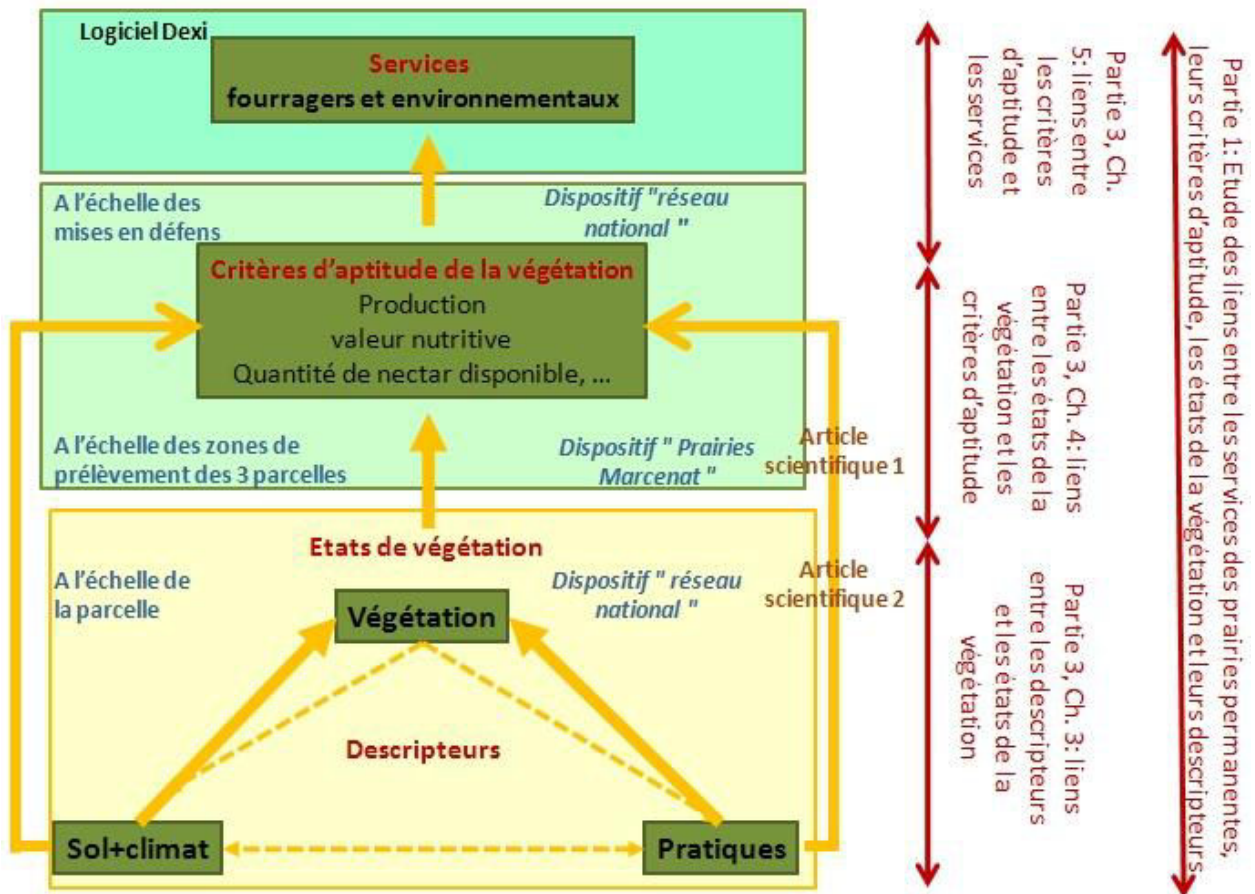


Figure 10. Démarche du travail de thèse illustrée par les dispositifs mis en place et les articles scientifiques rédigés.



# **Partie 2**

# **Résultats**



# Chapitre 1

## Dispositifs expérimentaux mis en œuvres

- *Un réseau national de parcelles en prairie permanente "réseau national"*
- *Un dispositif expérimental "Prairies Marcenat "*



## 1. Un dispositif principal basé sur un réseau national de parcelles en prairies permanentes ("*réseau national*")

### 1.1. Construction du réseau national

Dans le cadre de l'action 1 du programme CASDAR Prairies Permanentes, 1500 parcelles ont été identifiées. Ces parcelles se situent au sein des exploitations agricoles enquêtées sur les différentes zones de France concernées (Figure 11). Afin d'acquérir des données sur les états de la végétation (composition botanique et fonctionnelle), et les critères d'aptitude liés aux services fourragers (production et valeur nutritive), un échantillon de 180 parcelles a été choisi parmi ces 1500 parcelles. A partir des données recueillies dans les enquêtes, une première division en trois catégories de mode d'utilisation a été faite : **fauche exclusive (FE)**, **pâturage exclusif (PE)** ou **usage mixte (M)** (Figure 12). Pour chacune des ces trois catégories, une deuxième subdivision a été effectuée en fonction de l'intensité d'utilisation des prairies (Figure 12) :

- Les parcelles de fauche exclusive ont été subdivisées en quatre catégories selon le nombre de coupes effectuées<sup>20</sup>. Chaque parcelle a été annotée selon la catégorie à laquelle elle appartenait (ex : FE2 = parcelle de fauche exclusive avec deux coupes/an) ;
- L'intensité d'utilisation pour les parcelles de pâturage exclusif a été mesurée par le chargement animal estimé sur l'ensemble des surfaces en prairies permanentes. Seul le chargement animal sur les surfaces en prairies permanentes était disponible dans les enquêtes. Quatre catégories ont été créées à l'échelle nationale<sup>21</sup> et chaque parcelle a été annotée selon sa catégorie d'appartenance (ex : PE1 : parcelle de pâturage exclusif avec un chargement global de moins de 1 Unité Gros Bovins (UGB)/ha) ;
- Pour les parcelles en usage mixte, leur itinéraire technique a été retracé en prenant en compte le pâturage et la fauche (ex : fauche, fauche et pâturage= FFP). Seules les catégories les plus représentatives ont été conservées, soit sept au total<sup>22</sup>.

<sup>20</sup> 1 : une coupe ; 2 : deux ou trois coupes ; 3 : quatre coupes ; 4 : cinq coupes et plus

<sup>21</sup> 1 : inférieur à 1 Unité Gros Bétail (UGB)/ha ; 2 : entre 1 et 1.29 UGB/ha ; 3 : entre 1.3 et 2 UGB/ha ; 4 : plus de 2 UGB/ha

<sup>22</sup> FP, PFP, FFP, FPP, PFFP, FFFP, PFPP

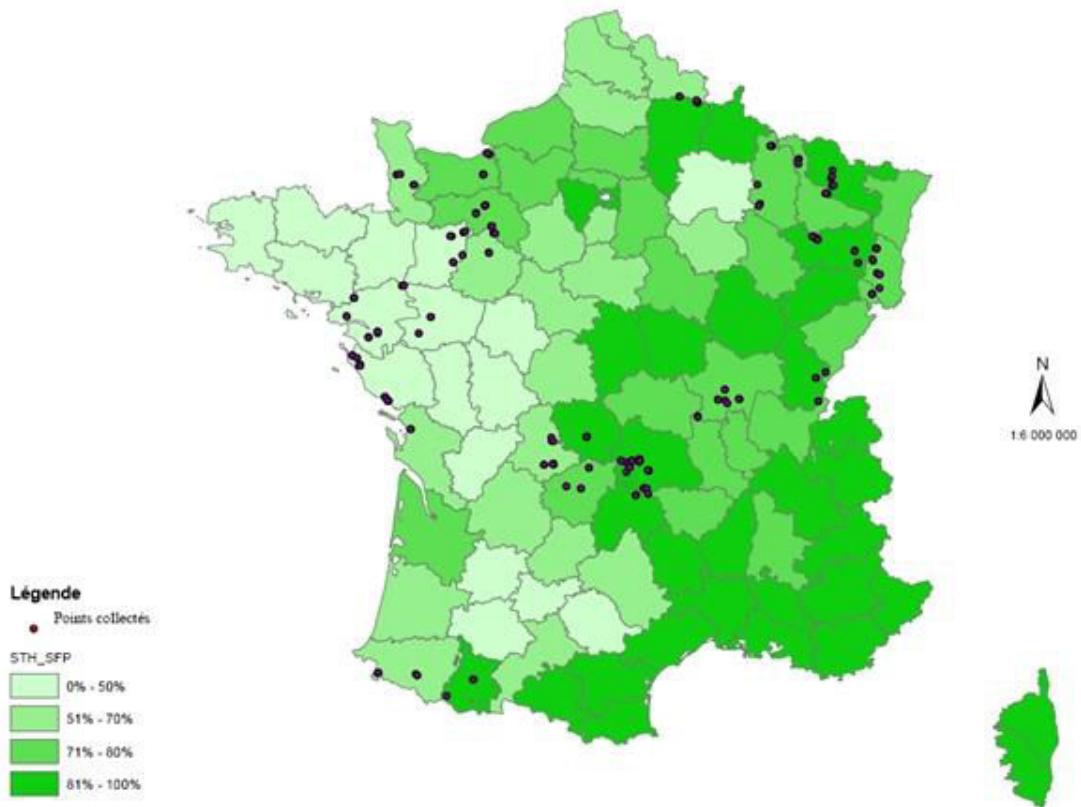


Figure 11. Localisation des parcelles étudiées dans le cadre du réseau national, sur un fond de carte représentant la surface toujours en herbe / surface fourragère principale (SFP) (limite des départements issus de l'IGN. INPL-ENSAIA-INRA. B. Noirtin).

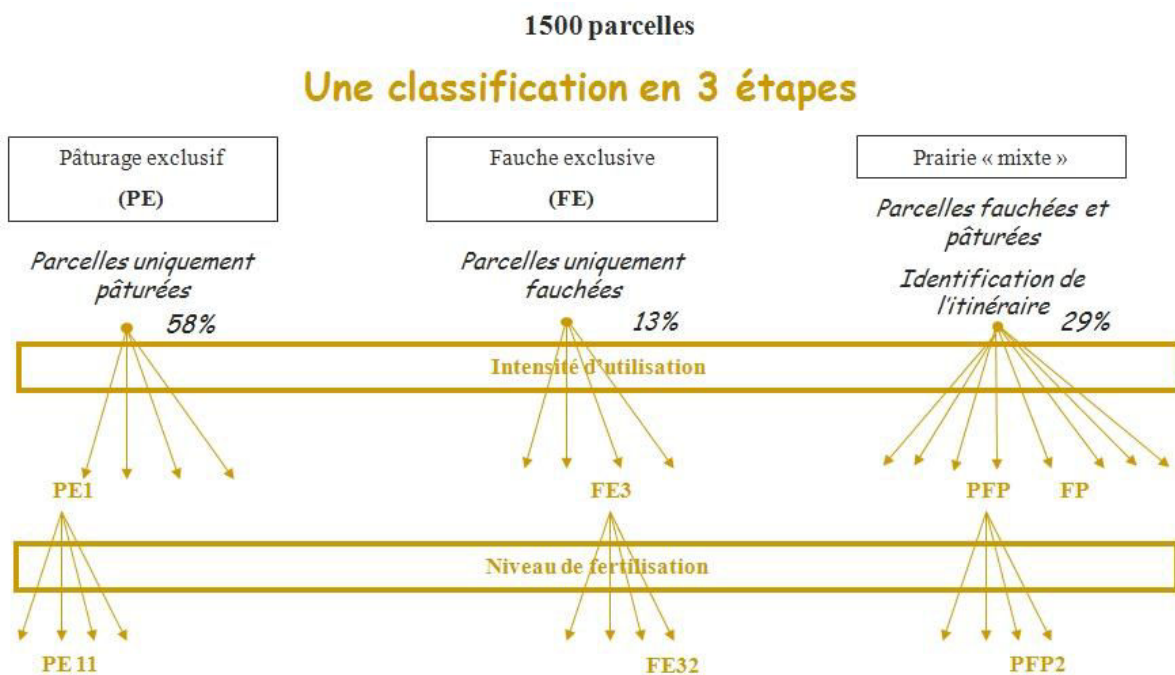


Figure 12. Echantillonnage des parcelles selon les pratiques de gestion effectuées, à partir d'un pool de 1500 parcelles recensées dans les enquêtes.



Enfin, une dernière subdivision a été effectuée pour chaque catégorie, en fonction de la fertilisation azotée apportée (Figure 12). La fertilisation azotée englobe la fertilisation minérale et organique. Quatre catégories ont été construites selon le niveau de fertilisation<sup>23</sup>. Par exemple, une parcelle de fauche exclusive avec deux coupes par an (FE2) et avec une fertilisation azotée de 70 unités d'azote (UN)/ha/an, est classée dans la catégorie 3 pour la fertilisation, soit FE23.

Nous avons donc obtenu un ensemble de combinaisons (FE23, PE12, FFP2...), qui pour certaines contenaient plusieurs parcelles et pour d'autres étaient vides.

Cette classification des parcelles selon les pratiques de gestion a ensuite été croisée avec d'autres contraintes logistiques et financières :

- nombre de parcelles par exploitation (3 au maximum) ;
- temps de travail attribué par technicien (2 parcelles par demi-journée) ;
- ensemble des systèmes d'exploitation enquêtés représentés (bovin viande, bovin lait, ovin viande, ovin lait) ;
- cinq parcelles au minimum dans chaque catégorie, avec une représentation de toutes les zones enquêtées.

En combinant ces contraintes avec le résultat de l'échantillonnage sur les pratiques de gestion, nous avons retenu 180 parcelles. Les catégories conservées étaient composées de parcelles de différentes zones en France. Cet échantillon a ensuite été validé par les techniciens et éleveurs (vérification d'appartenance à la catégorie, objectif de l'éleveur par rapport à la gestion de la parcelle). Dix parcelles de fermes expérimentales (INRA, Institut de l'Élevage ou lycée agricole) ont été ajoutées au dispositif, ce qui a permis de travailler sur **un réseau de 190 parcelles**. Sur ces 190 parcelles, 43% étaient uniquement pâturées, 11% uniquement fauchées et 46% utilisées en usage mixte. Les caractéristiques générales des parcelles du réseau sont résumées dans le tableau 4.

---

<sup>23</sup> **1** : pas de fertilisation ; **2** : moins de 50 unité d'azote (UN)/ha/an ; **3** : entre 50 et 120 U/ha/an ; **4** : plus de 120 U/ha/an

**Tableau 4. Caractéristiques des parcelles du réseau (pratiques de gestion et caractéristiques du milieu).**

Pratiques de gestion	Valeur minimum	Valeur maximum
	type de réponse si qualitatif	
Quantité d'azote minéral apportée (UN/ha)	0	200
Nombre de passages pour apport de fertilisation minérale	0	4
Quantité d'azote organique apportée	jamais ou rarement/occasionnelle/annuelle	
Fertilisation de fond	oui/non	
Chaulage	oui/non	
Nombre de coupes (fauche)	0	3
Date de 1° coupe	20-avr	30-juin
Déprimage	oui/non	
Pâturage de printemps (début)	oui/non	
Date de pâturage de printemps (début)	01-janv	30-juin
Pâturage de printemps (fin)	oui/non	
Date de pâturage de printemps (fin)	15-fev	10-mai
Pâturage d'automne	oui/non	
Date de pâturage d'automne	01-août	31-dec
Pâturage d'hiver	oui/non	
Parcelle labourable	non labourable	labourable
Entretien mécanique	oui/non	
Désherbage	oui/non	
Caractéristiques du milieu		
Topographie	pas profond	profond
Exposition	pas d'exposition spécifique	NO/NE or SE/SO
Type de sol	pas de contrainte	léger/lourd
Profondeur de sol	peu profond	profond
Portance du sol	pas de problème de portance de sol	problèmes important de portance du sol

## 1.2. Protocole de mesures sur le terrain

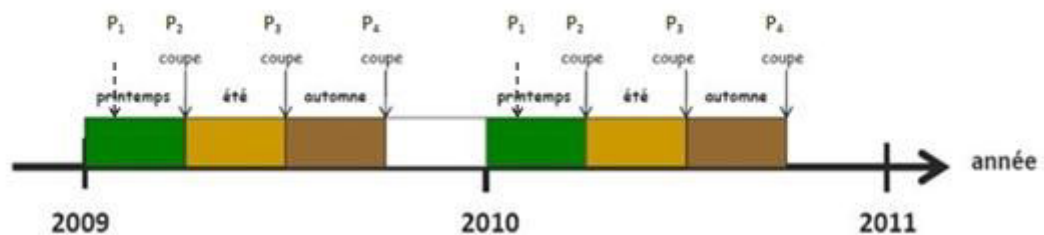
### 1.2.1. Durée et périodes des mesures

Le réseau national a fait l'objet d'un suivi durant 2 années (2009-2010), avec quatre prélèvements par an (Figure 13) :

- 2 prélèvements au printemps, un en début de printemps (P<sub>1</sub>) (à une somme de température de 500-600°C jours depuis le 1<sup>er</sup> février avec une hauteur minimale de l'herbe de 8 cm) et un en fin de printemps (P<sub>2</sub>) (à une somme de température de 1100-1200° C jours). Le deuxième prélèvement de printemps a permis d'évaluer la production de biomasse maximale au premier cycle de végétation. Suite au P<sub>2</sub>,

l'ensemble de la mise en défens a été coupé (hauteur de 5cm) afin de simuler une fauche ;

- 1 prélèvement d'été ( $P_3$ ), effectué 40 à 45 jours après le deuxième prélèvement de printemps avec une hauteur minimale de l'herbe de 5 cm. La mise en défens a à nouveau été coupée après le prélèvement pour simuler une deuxième coupe ;
- 1 prélèvement d'automne ( $P_4$ ), effectué 40-45 jours après le prélèvement d'été, avec une hauteur minimale de l'herbe de 5 cm. A la fin de l'année, l'ensemble de la mise en défens a été coupée (hauteur de 5cm).



**Figure 13.** Schéma récapitulatif des périodes de mesures effectuées sur le réseau de parcelle : quatre prélèvements (2 au printemps, un en été et un en automne) et deux années de mesures.

### 1.2.2. Détermination de la composition botanique et fonctionnelle de la prairie

Au cours du printemps de la première année de suivi (2009), des relevés botaniques complets ont été effectués sur chaque parcelle par des experts botanistes. Les relevés ont été réalisés au milieu du printemps (entre les prélèvements  $P_1$  et  $P_2$ ) afin de pouvoir déterminer la majorité des espèces présentes, et d'estimer leur abondance à une période de forte production de la prairie. Pour cela, une zone homogène en termes de végétation, milieu et pratiques de gestion a été repérée sur la parcelle. Les relevés floristiques ont été faits sur cette station, en plaçant huit quadrats de 0.25 m<sup>2</sup> : cinq quadrats ont été répartis de manière aléatoire sur le faciès dominant et les trois autres quadrats ont été placés au niveau des zones de mesures (du prélèvement  $P_1$ ), c'est à dire des zones de mises en défens (Figure 14). L'ensemble des espèces présentes dans les quadrats a été identifié. Le reste de la station a ensuite été exploré afin de noter les espèces absentes des quadrats. En plus de l'identification des espèces au sein des quadrats, la dominance de chaque espèce a été estimée, en évaluant leur volume dans la biomasse. L'évaluation visuelle a été réalisée en ne considérant que des pourcentages multiples de 5 %, sachant que la somme des dominances au sein d'un quadrat est de 100%. Pour illustrer les relevés, des photographies de la végétation des différents quadrats et de la parcelle ont été prises. L'ensemble des relevés botaniques a été saisi dans le système e-

FLORA-sys (<http://eflorasys.inpl-nancy.fr>, Plantureux et Amiaud, 2010, Encadré 1). Ce logiciel calcule des indices et caractéristiques écologiques pour chaque parcelle, à partir de relevés botaniques. Ces indices ou caractéristiques écologiques comme le nombre d'espèces oligotrophes ou le nombre d'espèces patrimoniales peuvent contribuer à l'évaluation de services environnementaux.

Ces mesures permettent donc de quantifier les présences et dominances en espèces ainsi que des traits de vie moyen et des propriétés des espèces à l'échelle de la parcelle.

#### **Encadré 1 : Logiciel e-FLORA-sys (Plantureux et Amiaud, 2010)**

eFLORAsys (<http://eflorasys.inpl-nancy.fr>) est un site web développé par le LAE pour mettre à disposition de la communauté scientifique et technique des informations utiles pour la connaissance, le diagnostic et la gestion des prairies permanentes. Il est en ligne depuis 2010 et disponible en version française et anglaise. eFLORAsys est gratuit, afin de permettre au plus grand nombre de l'utiliser. Le site est le fruit des programmes de recherche antérieurs du laboratoire et de l'expertise de ses chercheurs. eFLORAsys gère des bases de données sur les caractéristiques écologiques et agronomiques des espèces prairiales (près de 3000 espèces renseignées) et sur des prairies permanentes (composition botanique, sol, climat, pratiques agricoles). C'est actuellement la seule base de données agro-écologique disponible sur internet en France. Près de 3000 relevés de prairies du grand-est sont présents dans la base de données. L'ensemble des relevés botaniques du projet CASDAR ont été enregistrés dans cette base de données. Le système permet notamment :

- de connaître les caractéristiques écologiques et agronomiques d'espèces prairiales ;
- de saisir, de consulter et d'éditer des relevés floristiques et de gérer des ensembles de relevés ;
- de calculer des indices pour une interprétation agronomique et écologique de ces relevés.

Pour chaque parcelle étudiée et ayant fait l'objet de relevés botaniques, l'ensemble des caractéristiques citées ci-dessus sont accessibles.

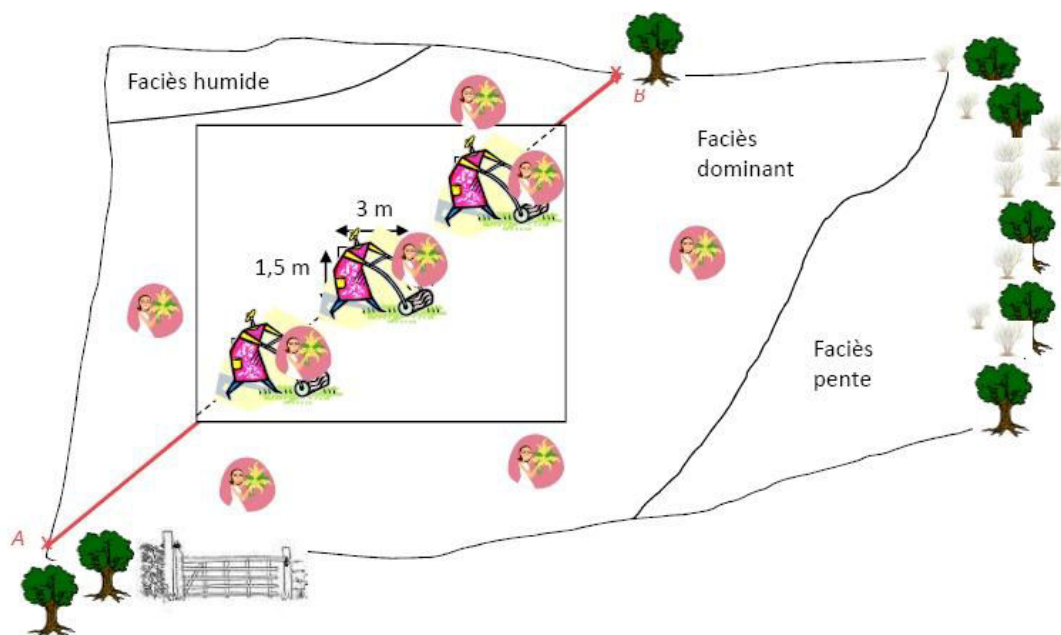


Figure 14. Localisation sur le faciès dominant de la parcelle des relevés botaniques complets ( ) et des zones de prélèvements et mises en défens ( ).

### 1.2.3. Mesures effectuées sur la prairie

Les mesures effectuées sur les 190 parcelles ont été réalisées par des techniciens de terrain (CA, EDE, PNR...) ou de fermes expérimentales (INRA, Institut de l'Élevage ou lycée agricole). L'ensemble des 32 personnes réalisant le protocole ont été formées durant deux jours afin que tous aient la même méthode de travail. De plus, un film de démonstration a été réalisé pour les aider à effectuer les prélèvements. Les prélèvements ont été faits dans trois zones identifiées avec les botanistes sur le faciès homogène (Figure 14). Elles ont été mises en défens (barrière, fil) pour que les animaux ne pénètrent pas à l'intérieur et pour homogénéiser les mesures (Figure 15). Nous nous sommes donc affranchis des pratiques de l'éleveur concernant la gestion du troupeau et de la fauche durant deux ans.



**Figure 15. Illustrations des mises en défens dans le Haut Rhin (photos en haut, Aude Auriou) et dans l'Orne (photo en bas, Michel Harivel).**

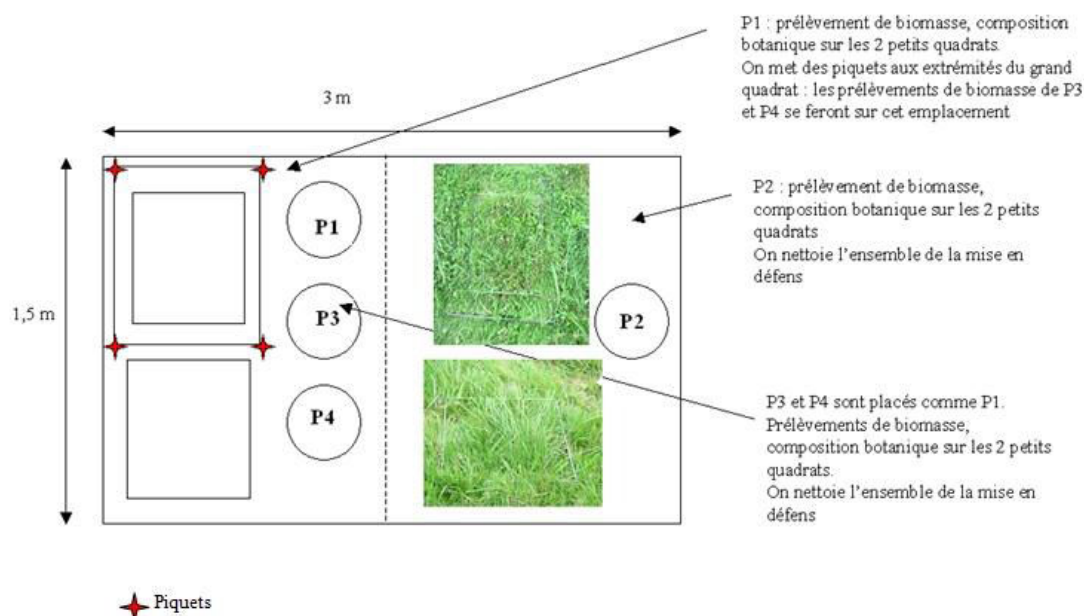
A chaque prélèvement et dans chaque mise en défens, deux types de mesures ont été réalisées :

- Des mesures simplifiées de composition de la végétation (Theau *et al.* 2010). Dans un quadrat de 0.25 m<sup>2</sup>, la proportion de graminées, légumineuses et diverses en volume<sup>24</sup> a été évaluée, avec une notation sur 6. Deux mesures par mise en défens ont été faites dont une dans la zone de prélèvement de l'herbe. Au total, six mesures par parcelle ont été effectuées. Au cours de la première année de suivi, les techniciens ont également identifié les graminées, légumineuses et diverses dominantes ainsi que leur stade de développement. Ils ont été formés à la reconnaissance des principales espèces prairiales.
- Des mesures de hauteur d'herbe et des prélèvements d'herbe. Sur chaque mise en défens, la hauteur d'herbe avant coupe et après coupe a été mesurée dans un quadrat de 0.49 m<sup>2</sup>. Les mesures de hauteur d'herbe ont été faites à l'aide d'un herbomètre à plateau. La coupe de l'herbe (hauteur de coupe à 5 cm) était réalisée à l'aide d'une minitondeuse. Les mesures pour le P<sub>1</sub>, P<sub>3</sub> et P<sub>4</sub> ont été effectuées au même endroit alors que le P<sub>2</sub> a été fait juste à côté (Figure 16). La totalité de l'herbe coupée sur le

<sup>24</sup> Prise en compte de la surface et profondeur

quadrat a été récoltée et pesée en frais. Ensuite, à partir des trois sacs d'herbe récoltés sur les trois mises en défens, deux sous-échantillons ont été constitués :

- un premier pour faire des mesures de composition botanique au laboratoire (*Ech bota*) ;
- un second pour mesurer le pourcentage de MS de l'herbe et pour effectuer des analyses de la valeur nutritive de l'herbe (*Ech Vnut*).



**Figure 16. Récapitulatif des prélèvements effectués au niveau d'une mise en défens : mesure de composition botanique, de hauteurs d'herbe et coupe de l'herbe.**

Les deux échantillons ont été récoltés et placés en glacière puis au congélateur le jour même. L'ensemble des échantillons a été acheminé régulièrement vers des centres INRA ou Institut de l'Élevage où ils ont été traités (stockage, séchage et broyage selon les sites) avant d'être à nouveau acheminés vers le centre de Theix pour les analyses de valeur nutritive et mesure de composition botanique (Figure 17).

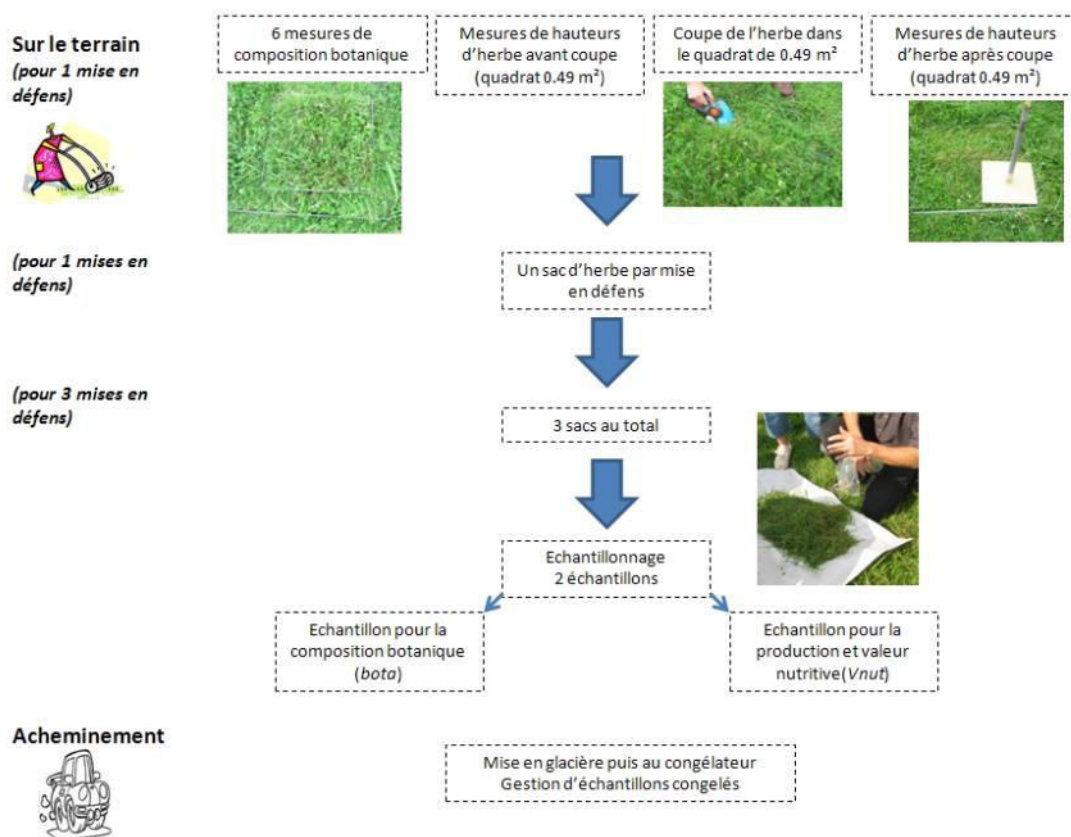


Figure 17. Récapitulatif des mesures effectuées sur le terrain pour le réseau national.

Pour la seconde année de suivi, une notation de l'aspect esthétique de la parcelle a été effectuée selon la méthode proposée par Pa. Fleury (1995). Nous avons utilisé la grille de notation en 13 classes mise en œuvre au niveau des Alpes du Nord, afin de tester sa généralisation à un réseau national. Cette notation tient compte des dominances de couleur sur la parcelle et de la structure de la végétation (Figure 18 Annexe 4). A chaque prélèvement, une notation a été effectuée, en considérant la parcelle dans son ensemble, à partir de la grille en 13 classes. Nous avons donc obtenu pour une année donnée, l'évolution de l'aspect esthétique de la parcelle, qui tient compte des pratiques de gestion.

De plus, pour chaque parcelle suivie, un calendrier des pratiques agricoles effectuées durant l'année a été récolté pour les années 2009-2010. Nous avons donc récupéré des informations



concernant la fertilisation (minérale et organique), les pratiques de pâturage (nombre d'animaux, durée du pâturage...) les pratiques de fauche (nombre de coupes, rendement à chaque coupe) et d'autres interventions (hersage, ...) pour ces deux années.

numéro de la classe	représentation graphique	n	descripteurs visuels					repères phénologiques	
			couleur dominante	abondance moyenne des floraisons (estimation en %)	nombre moyen d'espèces en fleur	grain	Hauteur moyenne de la végétation (en cm)	cycle et stade	durée moyenne de la pousse (en nombre de jours)
1		52	vert clair à foncé	0	0	régulier	17	hiver et repousses	13
2		22	vert foncé	0.1	1	grossier	27	repousses	25
3		6	vert clair	1	6	régulier	41	montaison à DE.	42
4		16	vert foncé	1	5	moyen à grossier	37	repousses	36
5		9	vert	2.9	5	régulier	43	DE à Flo repousses	38
6		9	vert foncé	2.1	6	grossier	40	DE à Flo repousses	53
7		7	vert clair à foncé	13.4	12	régulier	53	DFlo. à Fruc.	69
8		4	jaune-beige	8.6	11	régulier	96	Flo. à Fruc.	82
9		10	jaune	11.1	6	régulier à moyen	49	DM à Fin E	54
10		4	jaune ou blanc	5.2	4	grossier	84	Fin E. à Début Flo.	62
11		25	jaune-beige à marron	0	0		11	hiver ou repousses	2
12		7	jaune-beige à marron	3	6	régulier	83	après Dissé.	110
13		9	jaune-beige à marron	2.2	8	grossier	59	DFruc à fin Dissé	98

Stades du dactyle :

DM=début montaison, DE=début épiaison, E=épiaison, DFlo=début floraison, Flo= floraison, DFruc=début fructification, Fruc=fructification, Dissé=dissémination.

**Figure 18. Notation en 13 classes de l'aspect esthétique de la parcelle, en tenant compte des descripteurs visuels (couleur, grain...) et repères phénologiques (durée de la pousse, ...).**

#### 1.2.4. Mesures et analyses au laboratoire

Les échantillons issus des prélèvements réalisés sur les mises en défens arrivaient congelés au niveau des centres de gestions. Les deux échantillons par parcelles ont été recensés : 1 échantillon pour les mesures de composition botanique et fonctionnelle au laboratoire (*ech bota*) et 1 échantillon pour les analyses de production et valeur nutritive (*ech Vnut*).

*a. Mesures de la composition botanique et fonctionnelle de la prairie*

Ces mesures ont été effectuées sur l'échantillon *bota*. Pour les quatre prélèvements, une estimation visuelle de la proportion de graminées, légumineuses et diverses a été à nouveau effectuée sur l'échantillon coupé (note sur 6) selon la même méthode que celle effectuée sur le terrain, afin de faire une mesure sur l'herbe prélevée sur laquelle la valeur nutritive est aussi estimée.

Pour les prélèvements de printemps ( $P_1$  et  $P_2$ ), des mesures complémentaires de stade de végétation et d'identification des espèces de graminées pour les classer selon les types fonctionnels ont été effectuées. Pour cela, 40 talles de graminées ont été prélevées au hasard dans l'échantillon. Ces 40 plants ont été répartis selon leurs stades de développement (Tableau 5), organisés en 13 classes (adapté de Moore *et al.* 1991). Pour chaque stade de développement, l'ensemble des plants ont été identifiés (espèce) et classés selon leur appartenance en TF (Figure 19) (Cruz *et al.* 2010). De plus, le stade moyen des plantes a été calculé selon la formule ci-dessous :

$$\text{MPS (Medium Plant Stage)} = \frac{\sum_{i=1}^{13} (C_i N_i)/N}{13}$$

avec  $C_i$ , la note correspondant au stade de développement  $i$  défini dans le tableau 1;  $N_i$  le nombre de plants au stade  $i$ ;  $N$  le nombre total de plants.

Le stade moyen était calculé avec ou sans les talles en végétatif. En effet il est important de prendre en compte les talles végétatives dans des prélèvements effectués en début de printemps car le stade de la prairie est peu avancé. En revanche, lorsque le stade de la prairie est plus avancé, le stade moyen peut être calculé sans les talles végétatives pour mesurer le stade de la parcelle en reproduction.

Les mesures de composition botanique et fonctionnelle effectuées au laboratoire permettent de quantifier la proportion de graminées, légumineuses et diverses, les types fonctionnels et le stade moyen de développement de la prairie.

**Tableau 5. Détermination des stades de végétation (adapté de Moore et al. 1991).**

Stade	Note	Description
Végétatif	1.5	Aucun nœud visible
Début montaison	2	1 nœud visible ou palpable
Montaison	2.5	Plusieurs nœuds
Fin montaison	3	Feuille « drapeau » complètement développée
Début épiaison	3.1	Epi partialement sorti
Epiaison	3.3	Epi totalement sorti, pédoncule non développé
Fin épiaison	3.5	Epi totalement sorti et pédoncule développé
Floraison	3.8	Étamines visibles
Grain visible	4	Le grain est visible
Grain laiteux	4.1	Aspect du grain blanc laiteux
Grain pâteux	4.4	Aspect du grain pâteux
Grain mature	4.7	Grain dur et prêt à tomber
Grain tombé	4.9	Le grain est tombé

## Composition botanique - CasDAR PP - AQ 345 - 2009

Période
Date prélevement
Date de tri
Technicien
Parcelle
Identification

G	
L	
D	

secteur :

	Total	Végétatif	Début Montaison	Montaison	Fin Montaison	Début Epiaison	Epiaison	Fin Epiaison	Floraison	Grain Formé	Grain Laitéux	Grain Pâteux	Grain Mûr	Grain Tombé	Sénescent
A	Fléole alpine														
	Flouve odorante														
	Houlique laineuse														
	Pâturin bulbosa														
	Ray-grass anglais														
	Vulpin des prés														
	Vulpin genouillé														
B	Avoine chapelet														
	Brome dressé														
	Dactyle aggloméré														
	Fétuque des prés														
	Fétuque élevée														
	Fromental														
	Fromental bulboux														
	Pâturin des prés														
b	Agrostide des chiens														
	Agrostis														
	Agrostis fin / commun														
	Agrostis stolonifère														
	Avoine jaunâtre														
	Chiendent rampant / commun														
	Fléole des prés														
	orge faux seigle														
	Houlique molle														
	Pâturin commun														
C	Brise intermédiaire														
	Canche flexuosa														
	Crételle														
	Danthonie														
	Fétuque duriuscula														
	Fétuque ovine														
	Fétuque rouge														
	Koelerie														
	Mélique														
D	Avoine sillonnée														
	Brachypode														
	Canche cespiteuse														
	Molinie														
	Nard raide														
	Poa de Chaux														
	Stipa pennata														
E	Avoine pubescente														
	Brome mou														
	Brome stérile														
	Gaudinie fragile														
	Orge des rats														
	Pâturin annuel														
	Ray-grass italien														
	Glycérie flottante														
	Vulpie														

Figure 19. Grille de classification des espèces de graminées en types fonctionnels (A, B, b, C, D, E) selon leur stade de développement (Cruz et al. 2010).

---

*b. Analyses de la production et de la valeur nutritive de la prairie**i. Teneur en matière sèche et production de la prairie*

Ces mesures ont été réalisées sur les échantillons *Vnut*. Chaque échantillon a été pesé en vert puis mis à l'étude à 60°C pendant 72h. Une fois séché il a été à nouveau pesé pour déterminer son pourcentage de MS et pouvoir aussi estimer la production de la parcelle<sup>25</sup>. La hauteur de coupe de l'herbe était de 5 cm. Afin d'homogénéiser les données de hauteur de coupe, la production d'herbe a été corrigée à une hauteur 5 cm pour les prélèvements P<sub>1</sub>, P<sub>3</sub> et P<sub>4</sub>. Pour cela, elle a été corrigée par la différence entre la hauteur de 5 cm et la hauteur d'herbe avant coupe, ainsi que la hauteur d'herbe coupée. Les hauteurs d'herbe ont été mesurées avec un herbomètre à plateau. La production P<sub>2</sub> n'a pas subi de correction car les mesures de hauteurs d'herbe n'étaient pas fiables du fait de la hauteur importante du couvert à ce prélèvement. La production annuelle a été mesurée par la somme des mesures de P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub> et P<sub>4</sub>, P<sub>1</sub> étant inclus dans P<sub>2</sub>.

*ii. Valeur nutritive de la prairie*

L'échantillon *Vnut* sec a ensuite été broyé à l'aide d'un broyeur à marteau avec une grille de 1mm. Plusieurs sites séchaient et broyaient les échantillons et ont tous procédé selon la même méthode et avec le même matériel. Les échantillons broyés ont été passés en SPIR<sup>26</sup> sur le centre de Theix afin de déterminer la concentration en protéines et la digestibilité de la matière organique. Au total 1221 échantillons ont été saisis. Les spectres infra rouges ont été collectés avec un appareil scannant les spectres entre 400–2500 nm (FOSS-NIRSystems 6500, Silver Spring, MD, USA). Tous les spectres et les données de référence ont été gérés à l'aide du logiciel WINISI, version 1.6 (Infrasoft International, Port Matilda, PA, USA). Des analyses chimiques ont permis de mesurer les valeurs des échantillons ne pouvant pas être prévus par la SPIR et de valider les équations de calibration pour la population d'échantillons du projet : 207 échantillons ont été sélectionnés de la population totale de spectres (Shenk et Westerhaus 1991). Les analyses de concentration en protéines ont été effectuées selon la méthode azote de Dumas (Buckee 1994), celles de la teneur en parois cellulaires (NDF et ADF) selon la méthode de Van Soest *et al.* (1991) et celles de digestibilité par la méthode enzymatique pepsine-cellulase (Aufrère et Demarquilly 1989). Les paramètres de calibration des modèles obtenus pour la digestibilité pepsine-cellulase, la teneur en azote (N) et les

---

<sup>25</sup> Production herbe (en t de MS/ha) = (moyenne poids vert récolté\*10<sup>-6</sup>\*% MS)/0.49)\*100.

<sup>26</sup> SPIR : Spectrométrie de Proche Infra Rouge

teneurs en parois végétales sont résumés dans le tableau 6. Les valeurs de digestibilité pepsine-cellulase ont ensuite été converties en digestibilité de la matière organique chez le mouton par l'équation de prévision d'Aufrère *et al.* (2007).

**Tableau 6. Caractéristiques statistiques des équations de calibration en spectrométrie dans le proche infra-rouge utilisées pour estimer la digestibilité à la pepsine-cellulase (dcell), la concentration en protéines (% N) et la teneur en parois cellulaire (%NDF et %ADF).**

Constituant	N	SEC	RSQ	SECV	1-VR
dcell (%)	496	2.12	0.98	2.35	0.97
% N	478	0.07	0.99	0.08	0.99
%NDF	493	1.19	0.98	1.36	0.97
%ADF	478	0.87	0.98	1.00	0.97

N : nombre d'échantillons dans l'équation ; SEC : erreur standard ; RSQ : valeur du R<sup>2</sup> de la calibration ; SECV : erreur standard de la validation croisée ; 1-VR : valeur du R<sup>2</sup> de la validation croisée.

## 2. Un dispositif expérimental "*Prairies Marcenat*"

### 2.1. Plan expérimental

Le suivi de ces trois parcelles a été effectué durant deux années (2007-08) selon un dispositif mis en place dans l'équipe RAPA par D. Andueza. J'ai participé au suivi de terrain l'année 2008 et à la réalisation des mesures de laboratoire. Les trois parcelles ont été choisies sur le même environnement, avec une diversité de composition botanique. Nous avons étudié : 1) une prairie semée il y a 5 ans en Ray Grass anglais et caractérisée par une phénologie précoce sur un milieu fertile (précoce fertile PF), 2) une prairie semée il y a 12 ans en Dactyle aggloméré, considérée comme une prairie permanente et caractérisée par une phénologie moyenne sur un milieu fertile (moyenne fertile MF) et 3) une prairie permanente jamais fertilisée et caractérisée par une phénologie tardive et un milieu pauvre (tardive pauvre TP).

Trois cycles de végétation ont été étudiés. Pour réaliser le deuxième et le troisième cycle de végétation, une surface de 200m<sup>2</sup> a été fauchée aux environs de la mi-juin et une partie (100m<sup>2</sup>) de cette surface fauchée a été à nouveau coupée la première semaine d'août. Après chaque coupe, les zones fauchées des parcelles PF et MF ont reçu une fertilisation équivalente à 40 U d'azote/ha. Trois répétitions par parcelle ont eu lieu et les zones de prélèvements ont été déplacées entre les deux années de suivies.

### 2.1.1. Mesures sur le terrain

L'échantillonnage, pour le premier cycle de végétation, a commencé la première semaine de mai durant 12 semaines. Pour le deuxième cycle de végétation, les prélèvements d'herbe ont débuté à la mi-juillet durant 11 semaines de suivi et pour le troisième cycle de végétation ils ont commencé la première semaine de septembre pour 7 semaines de suivi. Chaque semaine, neuf échantillons ont été prélevés (trois répétitions par parcelle et trois parcelles à prélever). L'échantillonnage consistait à couper une ligne de 5 mètres de long à la minitondeuse avec une largeur de 0.10 mètres et une hauteur de coupe de 0.05 mètres. Les échantillons ont ensuite été pesés et divisés en deux sous échantillons : un premier prélevé chaque semaine pour évaluer la production et la valeur nutritive de la parcelle et un second analysé toutes les deux semaines pour mesurer la phénologie des espèces.

### 2.1.2. Mesures et analyses en laboratoire

#### *a. Mesures de la composition botanique et fonctionnelle de la prairie*

La composition botanique complète des trois prairies a été déterminée au printemps 2007, à l'aide de trois échantillons récoltés pour chaque parcelle. Pour chaque échantillon, les espèces présentes ont été identifiées et pesées (en frais et en sec). Elles ont été ensuite classées par grande famille (graminées, légumineuses et diverses) et en TF pour les graminées.

#### *b. Mesures de la phénologie de la prairie*

L'échantillon prélevé pour la mesure de phénologie a été conservé au congélateur à -20°C. Sur cet échantillon préalablement décongelé, le stade de développement des graminées a été déterminé selon la même méthode que celle développée dans le dispositif précédent (*Cf. paragraphe 1.2.4 a*).

#### *c. Analyses de la production et de la valeur nutritive de la prairie*

Les mesures de production et valeur nutritive sont similaires à celles présentées dans l'expérimentation précédente (*Cf. paragraphe 1.2.4 b*). Les paramètres de calibration des modèles obtenus pour la digestibilité pepsine-cellulase la teneur en azote et les teneurs en parois végétales sont résumés dans le tableau 7.

**Tableau 7. Caractéristiques statistiques des équations de calibration en spectrométrie dans le proche infra-rouge utilisées pour estimer la digestibilité à la pepsine-cellulase (dcell), la concentration en protéines (% N) et la teneur en parois cellulaire (%NDF et %ADF).**

Constituent	N	SEC	RSQ	SECV	1-VR
dcell (%)	102	3.09	0.89	3.38	0.86
% N	97	0.07	0.99	0.09	0.98
%NDF	94	1.02	0.98	1.31	0.96
%ADF	96	0.71	0.97	1.05	0.94

N : nombre d'échantillons dans l'équation ; SEC : erreur standard ; RSQ : valeur du  $R^2$  de la validation ; SECV : erreur standard de la validation croisée ; 1-VR : valeur du  $R^2$  de la validation croisée.



# Chapitre 2

## **Etude des liens entre les descripteurs et les états de la végétation**

*Quels sont les descripteurs et états de végétation  
étudiés ?*

*Quels descripteurs gouvernent les états de la  
végétation retenus ?*



Dans cette partie, nous étudions les liens entre d'une part les descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion et d'autre part les états de la végétation (Figure 20). Nous étudierons les relations entre les descripteurs et les états de la végétation retenus. Les états de la végétation sont ceux mesurés à l'échelle de la parcelle, à savoir la présence et dominance en espèces pour la composition botanique et la proportion de graminées, légumineuses et diverses, le nombre d'espèces oligotrophes, le pourcentage d'espèces entomogames, la TMS et la date de floraison pour la composition fonctionnelle. L'étude de ces liens a été effectuée sur le dispositif "réseau national" de 190 parcelles, avec des données à l'échelle de la parcelle. Cette étude a fait l'objet d'un article paru dans la revue "Journal of Agriculture Science", que nous intégrerons dans ce chapitre. A la fin du chapitre, l'étude des liens entre les descripteurs et la proportion de graminées, légumineuses et diverses, non étudié dans cet article scientifique a été ajoutée.

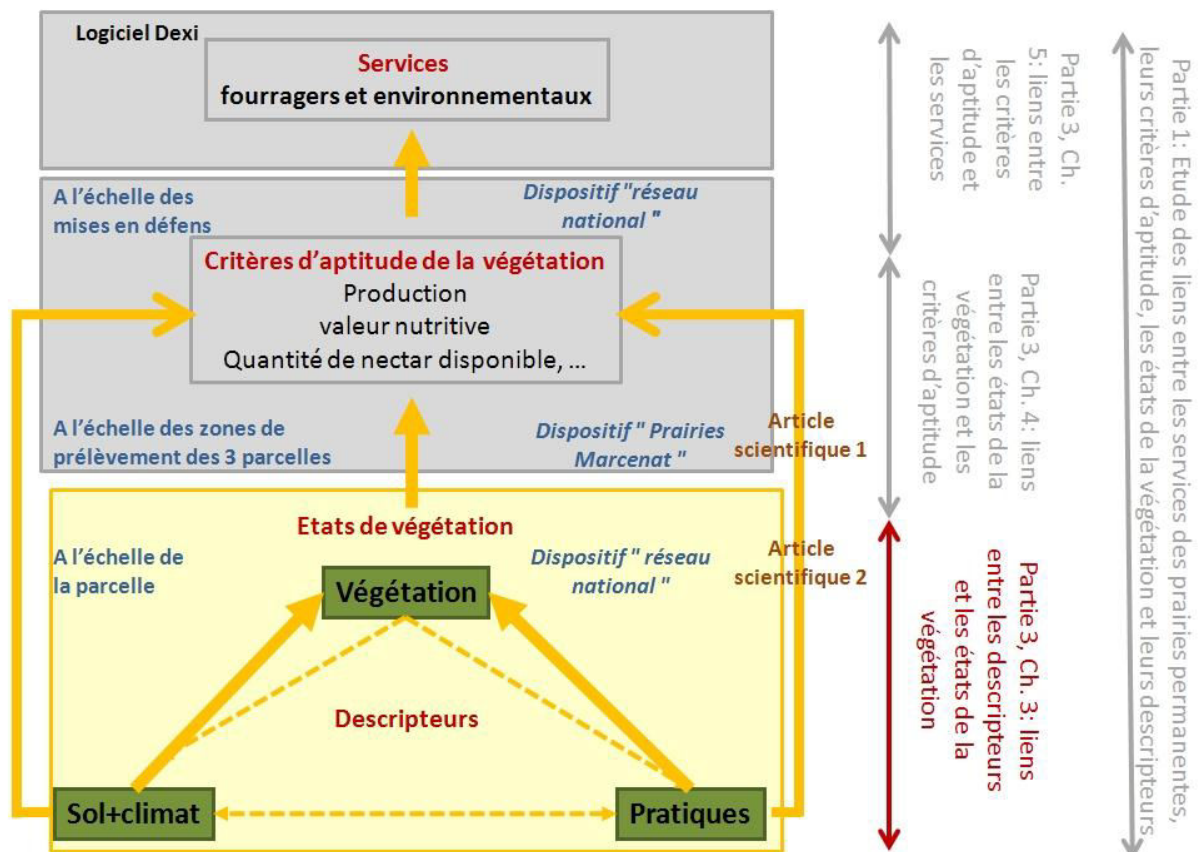


Figure 20. Démarche du travail de thèse illustrée par les dispositifs mis en place et les articles scientifiques rédigés.

## 1. Identification des descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion permettant de prédire la composition botanique et fonctionnelle des prairies permanentes : introduction à l'article

De nombreux chercheurs ont montré que la composition botanique (dominance et présence en espèces) est influencée par des descripteurs pédoclimatiques (Hopkins 1986 ; Plantureux *et al.* 1993 ; Kilmek *et al.* 2007 ; Kopec *et al.* 2010) ainsi que les pratiques de gestion (Pykala 2004 ; Galka *et al.* 2005 ; Brum *et al.* 2009 ; Zang et Dong 2009). L'influence de ces descripteurs sur la composition fonctionnelle a également été démontrée (Broyer et Prudhomme 1995 ; Lenz et Facelli 2006 ; Cingolani *et al.* 2005 ; Pakeman *et al.* 2009 ; Ordonez *et al.* 2010). L'effet des interactions entre les descripteurs sur la végétation a été mis en évidence (Dibb *et al.* 1990 ; Pakeman *et al.* 2009). Peu d'études ont pris en compte simultanément l'effet des descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion ainsi que plusieurs variables de la composition botanique et fonctionnelle (Fonsesca *et al.* 2000 ; Diaz *et al.* 2007 ; Klimek *et al.* 2007 ; Pavlu *et al.* 2007 ; Kahmen et Poschold 2008). Notre objectif est d'étudier les liens entre un grand nombre de descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion avec plusieurs variables de la composition botanique et fonctionnelle, sur une large gamme de conditions. Pour cela, nous avons posé des hypothèses sur les états de la végétation étudiés :

- la présence et dominance en espèces sont influencées par des descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion. La présence en espèces est plus sensible aux descripteurs de sol et de climat (Plantureux *et al.* 1993 ; Kopec *et al.* 2010) ;
- la TMS est dirigée essentiellement par la fertilité du sol et les pratiques de gestion (Ansquer *et al.* 2009) ;
- le nombre d'espèces oligotrophes est déterminé par la fertilité du sol et la fertilisation apportée (Kapfer 1988) ;
- le pourcentage d'espèces entomogames est influencé par les pratiques de gestion (Potts *et al.* 2009 ; Batary *et al.* 2010) et la fertilité du sol ;
- la date de floraison est dirigée par les descripteurs pédoclimatiques (Martini *et al.* 2010 ; Seghieri *et al.* 2009) ;
- la proportion de graminées est influencée par les descripteurs climatiques (Estalrich *et al.* 1992) et les pratiques de gestion (Odstrcilova *et al.* 2007 ; Kobes *et al.* 2010) ;

- la proportion de légumineuses est déterminée par les conditions édaphiques (Estalrich *et al.* 1992), climatiques (Soussana et Lüscher 2007) et les pratiques de gestion (Butkuvieniė et Butkute 2008 ; Mariyappan *et al.* 2009 ; Merou et Papanastasis 2009) ;
- la proportion de diverses est influencée par les précipitations (Liu et Zangh 2010) et les pratiques de gestion (Dumont *et al.* 2009 ; Lanta *et al.* 2009).

L'étude des liens entre les descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion et la composition botanique (présence et dominance en espèces), la TMS, la date de floraison, le nombre d'espèces oligotrophes et le pourcentage d'espèces entomogames a fait l'objet de l'article scientifique présenté ci dessous. L'étude des liens entre l'ensemble des descripteurs et la proportion de graminées, légumineuses et diverses a été traité ensuite. Les résultats sont présentés à la suite de l'article. La méthode de traitement est la même que celle mis en œuvre dans l'article scientifique.

Nous avons effectué cette étude à l'aide du dispositif "*réseau national*". Nous avons utilisé les résultats des relevés botaniques complets effectués lors de la première année de suivi (2009) pour caractériser les états de végétation. Les descripteurs retenus provenaient de l'action 1 du programme CASDAR (dires d'éleveurs), des calendriers des pratiques recensées en 2009, des données météorologiques et des relevés botaniques complets effectués en 2009. L'ensemble des données a été mesuré à l'échelle de la parcelle. A partir de la palette de descripteurs disponibles, nous avons retenus ceux qui étaient non redondants et pertinents. Pour cela, nous avons effectué une analyse en composantes principales à l'aide du logiciel SPAD, version 7.0. Nous avons également étudié les redondances éventuelles entre les états de la végétation, en effectuant des régressions entre les variables quantitatives, des analyses de variance entre variables quantitatives et qualitatives et des tests du Khi deux entre les variables qualitatives.

Nous avons ensuite confronté les descripteurs retenus avec les états de végétation identifiés. Deux méthodes ont été utilisées :

- Pour la composition botanique (variables qualitatives), nous avons utilisé le logiciel Canoco qui permet de tester la corrélation entre les variables et les descripteurs. ;
- Pour la composition fonctionnelle (variables quantitatives), nous avons effectué une procédure de régression en stepwise à l'aide du logiciel SAS, version 9.2.

**NB :** Dans cet article, les descripteurs sont appelés facteurs pour faciliter la compréhension en anglais.

## **Identification of the environmental factors which drive the botanical and functional composition of permanent grasslands**

A. Michaud (1, 2, 6), S. Plantureux (2), B. Amiaud (2), P. Carrère (3), P. Cruz (4), M. Duru (4), B. Dury (5), A. Farruggia (6), J.L. Fiorelli (7), E. Kerneis (8), R. Baumont (6)

(1) Institut de l'Élevage, Le Mourier 87900 Saint-Priest-Ligoure, France

*Email address: [aumichaud@clermont.inra.fr](mailto:aumichaud@clermont.inra.fr)*

(2) Nancy Université-INRA, UMR 1121 LAE, 2 avenue de la Forêt de Haye, 54501 Vandoeuvre-les-Nancy, France

*Email address: [sylvain.plantureux@ensaia.inpl-nancy.fr](mailto:sylvain.plantureux@ensaia.inpl-nancy.fr), [Bernard.Amiaud@ensaia.inpl-nancy.fr](mailto:Bernard.Amiaud@ensaia.inpl-nancy.fr)*

(3) INRA UR874 Ecosystème Prairial, 234 avenue du Brezet, F-63100 Clermont-Ferrand, France

*Pascal.Carrère@clermont.inra.fr*

(4) INRA-ENSAT UMR1248 AGIR, chemin de Borde-Rouge, PB 52627, Castanet-Tolosan, France

*Email address: [Michel.Duru@toulouse.inra.fr](mailto:Michel.Duru@toulouse.inra.fr), [Pablo.Cruz@toulouse.inra.fr](mailto:Pablo.Cruz@toulouse.inra.fr)*

(5) Chambre Agriculture Saône-et-Loire, BP 522, 71010 Macon, France

*Email address: [bdury@sl.chambagri.fr](mailto:bdury@sl.chambagri.fr)*

(6) INRA UR1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France

*Email address: [anne.farruggia@clermont.inra.fr](mailto:anne.farruggia@clermont.inra.fr), [rene.baumont@clermont.inra.fr](mailto:rene.baumont@clermont.inra.fr)*

(7) INRA ASTER-Mirecourt, 662 avenue Louis-Buffet, 88500 Mirecourt, France

*Email address: [fiorelli@mirecourt.inra.fr](mailto:fiorelli@mirecourt.inra.fr)*

(8) INRA Domaine du Bois-Maché, 545 rue Bois-Maché, 17450 Saint-Laurent-de-la-Prée, France

*Email address: [Eric.Kerneis@stlaurent.lusignan.inra.fr](mailto:Eric.Kerneis@stlaurent.lusignan.inra.fr)*

## ABSTRACT

Managed grasslands provide environmental and agronomic services that can be predicted from the botanical and functional composition of the vegetation. These are influenced by management, edaphic and climatic factors. We set out to estimate and analyze the relative importance of management, soil and climate factors on botanical and functional characteristics of grassland vegetation. To this end a country-wide set of 178 grasslands was selected, characterized by a large pedoclimatic and management gradient, to collect information on botanical composition, pedoclimatic factors and management of grasslands. Six vegetation characteristics were considered: two botanical (floristic composition and species dominance) and four functional (percentage of entomophily species, number of oligotrophic species, leaf dry matter content and date of flowering). First, the links between the characteristics of the vegetation were analyzed to check for any redundancy among them. All of them were kept. Second, we demonstrated that botanical and functional characteristics were not driven by the same factors: functional composition was characterized by management, edaphic and climatic factors, whereas botanical composition was mainly influenced by climatic and edaphic factors and plus other factors. Interactions between factors also have to be taken into consideration to predict botanical and functional composition of grasslands. Functional and botanical characteristics of vegetation help to predict ecosystem services delivered by grasslands and may be used in combination.

**Keywords:** grassland, functional composition, botanical composition, pedoclimatic factors, management factors, vegetation diversity.

## Introduction

Natural ecosystems, including managed grasslands, provide services and goods that are essential for humans (Matson *et al.* 1997). Until recently, grassland ecosystems were mainly regarded as food suppliers for domestic herbivores (Hopkins & Wilkins 2006). Today, their contribution to other services is well established; (i) for environmental protection, e.g. limitation of water and atmospheric pollution, greenhouse gas balance, prevention of soil erosion, and potential sequestration of carbon (Parris 2002; Hopkins & Holz 2006; Allard *et al.* 2007) and (ii) for ecological management, e.g. contribution to biodiversity preservation or trophic cascades. Predicting the extent to which grassland ecosystems deliver these services is a threefold economic, technical and scientific stake (Eitzinger *et al.* 2010). Among the

predictors that have been used, grassland vegetation characteristics appear to be the most relevant, as demonstrated by several authors for various services.

The links between vegetation characteristics and ecosystem services were clearly shown in a recent review (De Bello *et al.* 2010). It was suggested that plant trait clusters can be used to monitor and balance the delivery of multiple services in ecosystem management. Relationships between forage production (quantity and quality) and plant life traits including leaf dry matter content (LDMC), specific leaf area (SLA), leaf life span (LLS) and plant phenology were clearly shown (Duru *et al.* 2008; Andueza *et al.* 2010). Links between functional characteristics of vegetation and ecosystem services were also suggested. The relation between carbon sequestration and the relative proportion of legumes and grasses (Soussana *et al.* 2007), or between pollination services and the proportion of entomophily species (Batary *et al.* 2010) were also informed. The botanical (genetic or specific) composition of grasslands like species dominance or floristic composition also determines services such as the conservation of patrimonial (Delpech 2005) or ordinary diversities (Peter-Schmid *et al.* 2008). Ecosystem services can also be determined by both functional and botanical composition of grasslands. For instance, Fleury (1995) and Lindemann-Matthies *et al.* (2010) found that the provision of high quality landscapes was due not only to the nature of species but also to functional features (height and structure of vegetation, dominating colors, date and duration of flowering and distribution of traits within the plant community). These examples illustrate that the prediction of a broad range of ecosystem services requires taking into account both the botanical and functional dimensions of the vegetation characteristics. Finally, vegetation characteristics cannot predict all ecosystem services, as some accrue simply from soil cover by sward (e.g. limitation of erosion or effluent leaching (Reid *et al.* 2005; Burel *et al.* 2009).

The delivery of multiple services from grassland ecosystems raises the question of the influence of environmental factors on vegetation characteristics. Phytosociologists have looked closely at this question in the past, focusing on the species composition of grasslands. It is now clearly established that edaphic and climatic factors have an influence on vegetation characteristics, determining the presence and abundance of species and distribution of their life traits (Diaz *et al.* 1998; Duru *et al.* 2007; Pakeman *et al.* 2009; Cruz *et al.* 2010). Grassland management affects also the presence and dominance of plant species (Kohouten *et al.* 2005; Klimas & Balezentiene 2008; Brum *et al.* 2009), as well as plant functioning – i.e. plant traits (Lavorel & Garnier 2002). In this context, interactions between management, edaphic and climatic factors have to be considered (Dibb *et al.* 1990; Pakeman *et al.* 2009):



between (i) soil and management, (ii) management and climate, (iii) climate and soil and (iv) management practices themselves.

The aim of the present study is to examine links between botanical and functional characteristics of vegetation, environmental factors and ecosystems services. Only a few studies have thus simultaneously taken into account (i) the co-occurring effects of management, edaphic and climatic factors (Rudmann-Maure *et al.*, 2008), (ii) more than one or two characteristics of the vegetation (Fonseca *et al.*, 2000; Diaz *et al.*, 2007; Klimek *et al.*, 2007; Pavlu *et al.*, 2007; Kahmen and Poschold, 2008), or (iii) a wide range of pedoclimatic conditions.

As vegetation characteristics were identified to be able to predict grassland services, we have selected two descriptors of botanical composition (presence of species, species dominance), and four traits of functional composition (LDMC, date of flowering, percentage of entomophily species, number of oligotrophic species), which predict most of services. We hypothesize that along a large pedoclimatic gradient, most vegetation characteristics were determined mainly by climatic conditions, and interactions between factors largely occurred (Pakeman *et al.* 2009). In a second step, we consider the factors driving each of the six vegetation characteristics. We postulated that:

- The presence and dominance of species were influenced by pedoclimatic and management factors. The presence being more sensitive to soil (pH, humidity, fertility) and climate, whereas dominance being more sensitive to management factors, (Plantureux *et al.* 1993; Kopek *et al.* 2010)
- Leaf dry matter content (LDMC) was driven mainly by soil fertility and grassland management (Ansquer *et al.* 2009);
- The number of oligotrophic species was, determined by soil fertility and fertilizer application (Kapfer 1988);
- The percentage of entomophily species (which depends on the ability of species to flower) was mainly linked to management factors influencing the plant life cycle, such as grazing intensity, mineral fertilization (Potts *et al.* 2009; Batary *et al.* 2010), and soil fertility;
- The mean date of flowering of grassland, depending on botanical composition, was driven by both climatic (temperature, precipitation, photoperiod and humidity) (Martini *et al.* 2010) and edaphic factors (Seghieri *et al.* 2009).

These hypotheses were tested on an original network of permanent grasslands distributed along a climatic and edaphic gradient in France. The novelty of this work is to allow predictions of some multi-services provided by permanent grassland merging descriptive (i.e.

botanic) or functional (i.e. plant traits) descriptors in response to abiotic or management factors.

## **Materials and methods**

### 2.1. Sampling design

A set of 178 permanent grasslands were selected from among 1500 grasslands listed by a survey conducted in 2008 on 78 farms (Figure 20), selected for their management and geographic location. The network included most pedoclimatic areas from Atlantic to Alpine conditions and covered most of the existing grassland types in France, resulting in a range of altitude from sea level to 2000 meters. This pedoclimatic gradient was crossed with a management gradient, defined by a diversity of farm systems (dairy or meat cattle and sheep) and management practices (type and number of uses (grazing, cutting), type of animals and livestock density, type and amount of fertilization). All the grasslands of the survey are native pastures for more than 10 years. They were subdivided into three categories: only grazed (0.44), only cut (0.13) and mixed grazed and cut (0.43). Those proportions are very close to the French national average proportions: in 1998, 0.56 of grasslands were only grazed, 0.08 only cut and 0.36 grazed and cut (Agreste 2000). Average date of first cut was mid June, with 0.74 of grassland used for hay, 0.18 for wrapped bale silage and 0.09 for other uses (direct cut silage, litter...). Among cut grasslands, 0.33 were cut twice (0.91 of hay production) and 0.03 third (all of hay production). Average date of first grazing was mid May.

### 2.2. Data collection

For each of the grasslands selected, data were collected on botanical composition, management, soil and climate. For each grassland, botanical composition was determined in spring 2009 in a homogeneous plant community (vegetation structure and floristic composition) of around 1 hectare. The list of species was drawn up in eight randomly located sampling areas (0.25 m<sup>2</sup>) and completed by an overview of the global plant community in order to note the presence of other species in the sampled area. In each 0.25 m<sup>2</sup> sampling area, species dominance was determined by visual estimation of the relative volume of each species in the biomass (Benizri & Amiaud 2005). The relative contribution of each species to the biomass was estimated by the average dominance in the eight 0.25 m<sup>2</sup> sampling area.

Management and edaphic characteristics of permanent grasslands were mainly obtained by interviewing farmers with a standardized questionnaire in 2008. To characterize management practices 15 factors were recorded:

- Mineral and organic nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) fertilization (quantity and number of applications). For organic fertilization, amounts of manure or slurry were converted into N, P and K units by assigning conversion coefficients (Ziegler & Heduit 1991);
- Intensity of utilization including livestock grazing intensity, mean instantaneous livestock density, time and duration of grazing, type of use and date of use (Table 8). Livestock grazing intensity (days LU/ha/year) was calculated as the sum of products of duration of grazing and number of livestock units (LU) per unit area. Mean instantaneous livestock density was the average of livestock density for each grazing period, weighted by duration of visit on the grassland (LU/ha). Date of first use was characterized by the first grassland exploitation in the year, either mowing or grazing.

The edaphic characteristics were described by 11 factors, informed from farmer surveys (type of soil, depth of soil, load-bearing capacity of soil, specific exposure and topography), from estimated indicators such as nitrogen nutrient index (NNI) (NNI was calculated using the proportion of nitrogen and dry matter yield ( $NNI = N \times 10 / 4.8 (DM)^{-0.32}$ , with N in g/kg DM) (Lemaire & Salette 1984) or from the Ellenberg indicators. Ellenberg indicators values for soil humidity, acidity and fertility (Table 8) using the mean value of present species (excluding species unaffected by the factor) were retained. Ellenberg values are a good indicator of soil parameters. Schaffers & Sykora (2000) found a close relation between Ellenberg moisture values and soil moisture contents. However, these authors demonstrated a weaker relation with the nitrogen indicator, although the opposite was found by Duru *et al.* (2010).

All the grasslands plots were located with Lambert II coordinates by Google Map® to assign them the closest meteorological station. A further check was done to ensure similarity between the studied grassland and the meteorological station (altitude, orientation). A climatic data base was built on an average of 15 years data (1992–2006, source Meteo France). The grasslands were thus characterized by spatial location and information on altitude (m), annual radiation, temperature, rain and transpiration (eight factors) (Table 8). Average data were used: average temperature (T) during summer and winter, average evapotranspiration (ET)

during summer (S) and winter (W), annual precipitations and annual radiation. The effect of summer and winter was significant in climatic data analysis for temperature and evapotranspiration. For T and ET, the winter season comprised ten-day periods 1 to 9 and 29 to 36 and summer season ten-day periods 10 to 28, corresponding to 1 April to 7 October. The sum of temperature was calculated, for each ten-day period in spring, as the cumulative sum of positive ( $>0^{\circ}\text{C}$ ) daily temperature, from 1th February to the present day considered (Theau & Zerourou 2008).

### 2.3. Data analysis

The botanical lists were impounded on e-FLORA-sys software (<http://eflorasys.inpl-nancy.fr>, Plantureux *et al.* 2010). From the botanical composition of each grassland the e-flora-sys software calculated: Ellenberg ecological indicators, percentage of entomophily species, number of oligotrophic species and mean plant life traits (LDMC or date of flowering). At the vegetation community level, the aggregated leaf trait correspond to the averaged plant trait weighted by species dominance (Louault *et al.* 2005). Species values of traits used were those previously measured by the INRA Orphée team in Toulouse in standardized conditions (Cruz *et al.* unpublished).

#### 2.3.1. Selection of environmental factors

The list of 15 management, 11 edaphic and 8 climatic factors is presented in Table 8. The most relevant factors from this list were selected from the results of a principal component analysis (PCA, SPAD software package, 7.0 run time). Management, edaphic and climatic groups of factors were tested separately. After the exclusion of dependent variables among the 34 factors, only 25 were selected: 9 management factors, 9 edaphic factors and 7 climatic factors (Table 9).

#### 2.3.2. Redundancy of vegetation characteristics

Vegetation of grassland was characterized by six vegetation characteristics: two related to botanical composition (species dominance and species presence (“floristic composition”)) and four describing the functional composition: number of oligotrophic species, percentage of entomophily species, LDMC and date of flowering. For botanical composition, two grassland classifications were made to determine types of vegetation based on floristic composition (presence/absence) and types of vegetation based on species dominance. These vegetation

characteristics were obtained using the SPAD software package with multiple component analysis (MCA) followed by an ascendant hierarchical classification, and a tree cut with a characterization of classes. Functional composition characteristics were calculated by e-flora-sys software (Table 10). The six characteristics of vegetation were compared to exclude redundancy among them. To study the link between vegetation characteristics, three types of statistical treatments were performed with the SAS software package (9.2 run time): (i) linear regression between functional characteristics using ‘proc reg procedure’, (ii) variance analysis between botanical characteristics (qualitative variable) and functional characteristics (quantitative variables), and (iii) a  $\chi^2$  test between types of species dominance and types of floristic composition.

### 2.3.3. Estimation of the effect of environmental factors on vegetation characteristics

Selected management, edaphic and climatic factors were compared with selected vegetation characteristics. Qualitative vegetation characteristics were implemented in the CANOCO software package (Version 4.5; Ter Braak & Smilauer 2002). A canonical correspondence analysis (CCA) was used with the CANOCO software (Leps & Smilauer 2003). Each group of factors was tested separately using a forward stepwise procedure with associated Monte Carlo permutation tests. These tests assessed the significance of the correlation between the predicted variable (qualitative characteristics of vegetation) and the predictors (management, edaphic and climatic factors). Secondary factors had a weak effect on vegetation characteristics. For quantitative data (functional composition) a stepwise regression was performed using the “proc glmselect” procedure from the SAS software package on 9.2 run time. Secondary factors were significant in the Anova results but were not selected by the stepwise procedure. Interactions between factors were tested and only significant interactions were conserved in the model.

## Results

### 3.1. Botanical composition and links between vegetation characteristics

Classification of botanical characteristics of vegetation results from two independent classifications of grasslands: the first based on species dominance with 14 classes of species dominance (type SD1 to SD14, Table 11) and the second on species presence with 12 classes of floristic composition (type FC1 to FC12, Table 12). The mean proportion in the biomass

(dominance) of 20 species, mostly grasses, explains the discrimination between types of grasslands according to dominance classes (Table 11). The main pedoclimatic and management features of the types of grasslands (dominance and floristic composition classifications) are presented in Table 13. We cannot detail all these features, as the main purpose of the present work is not to demonstrate their effects on grassland botanical composition. Just as example, the grasslands classified as type SD8 (wet grasslands in oceanic conditions) differ from the other types because of the high dominance of *Agrostis stolonifera* and *Elytrigia repens* (Table 11). Table 5 shows the frequency of the 28 species and genus, each value indicating the proportion of grassland within a class where the species was found, that are the so-called “Differential species” among the 317 different species found in the entire samples: These 28 species were generally found only in one or two classes of grassland, and rarely more. This indicates that the floristic composition of each class is different from the others. Forbs represent the majority of these species (26 species out of 29) presented in Table 12. For example, type FC 10 comprises mountain grasslands and is characterized by the presence of *Luzula campestris*, *Polygonum bisorta*, or *Sanguisorba officinalis*. The classification of grasslands according to types of dominance is not similar to the classification based on the floristic composition. This means that in grasslands containing almost the same list of species, the dominance of these species may vary significantly. In only one type of grassland, found in oceanic lowland conditions (floristic composition types FC11 and FC12, and dominance type SD8) was there a strong convergence between species composition and species dominance.

Concerning the link between botanical characteristics and functional characteristics, two types of responses can be distinguished (Table 14). For some classes of floristic composition or species dominance, a very high variability of functional characteristics was observed, whereas this variability was low for some other types, as demonstrated in Figures 21 and 22 for LDMC. In fact SD3 or FC4 presented a low variability, whereas SD8 or FC9 was characterized by a high variability (Figure 21-22). These results pointed to a low level of redundancy among the six selected characteristics of vegetation, which were thus kept for further analyses.

### 3.2. Environmental factors influencing botanical and functional composition

The links between the characteristics of vegetation selected previously and the management, edaphic and climatic factors are presented in Table 15 for functional composition and in

Table 16 for botanical composition. The best-fitting models were able to predict from 0.70 (species dominance) to 0.92 (number of oligotrophic species) of the variability of the model considering all factors and from 0.30 (percentage of entomophily species) to 0.73 (number of oligotrophic species) of the variability of main factors only. Factors were distributed into main and secondary factors according to their ranking in stepwise regressions and Anova analysis. The total number of main factors underlying vegetation characteristics ranged from 3 to 7 for functional composition (Table 15) and was higher (11 to 12) for botanical composition (Table 16).

Soil and climate appeared as main factors in accounting for all the vegetation characteristics. Even so, management factors occurred as secondary factors in all cases. Soil fertility was a major factor for many vegetation characteristics. Concerning the main factors, the determination of floristic composition and species dominance was more complex, with more driving factors and interactions between factors.

For functional composition, the factors determining the number of oligotrophic species were similar to those for botanical composition, with a marked effect of management factors, but a very short list of main climatic and edaphic factors. Winter conditions played an important role in climatic parameters with the contribution of average T and average ET during winter. The percentage of entomophily species was mainly related ( $R^2$  of main factors = 0.30) to the water status of soil, the annual nitrogen supply and the number of grassland uses. Factors affecting LDMC were more closely linked to intensification (livestock density and soil fertility), with an impact of annual solar radiation. Finally, the date of flowering was influenced by more main factors than other functional characteristics, with a mixture of climatic, edaphic and management factors.

The floristic composition appears mainly driven by climatic factors, distinguishing oceanic and continental or semi-continental climates. The effect of management factors was weakest, except for the first date of use, and the P and K annual supply. The results were quite different for species dominance, both climatic factors and soil fertility being responsible for the dominating species. The importance of management factors was very low for this characteristic.

Similarly to the main factors, the number of secondary factors accounting for vegetation characteristics was higher for botanical composition than for functional composition. Unlike the main factors, the species dominance and the number of oligotrophic species was much more strongly influenced by management factors.

Considering all type of factors (both main and secondary) and taking into consideration all vegetation characteristics, date of first use and time of grazing were the most frequent factors featuring in the list of factors. Soil fertility was the most frequent main edaphic factor, whereas acidity and humidity were the most frequent secondary factors, other edaphic factors (depth of soil, soil bearing capacity, etc.) rarely occurring in the list of explanatory factors. Annual radiation and average evapotranspiration during summer and to a lesser extent average evapotranspiration during winter were the most frequent climatic factors determining vegetation characteristics. The effect of temperature and precipitations appeared relatively weak.

## **Discussion**

A set of grasslands was made up composed of a large sample located in various areas and characterized by different combinations of management, edaphic and climatic factors. This network allows us to develop an original approach to test the abiotic and management factors, which drive the botanical and functional composition of permanent grasslands.

The proportions of only cut, only grazed and cut and grazed grasslands in our sample were close to the proportions estimated from a national survey in 1998 (Agreste 2000). However, high environmental value grasslands, which have an elevated floristic richness (i.e. more than 50 species for a surface about  $10^5$  m<sup>2</sup>), are less well represented here. However, such grasslands are not the most frequent in France, so the effect on representativeness is slight. Overall the set was strongly representative of French grasslands.

Environmental factors used in this study were precise enough to estimate management and climate, but the evaluation of soil conditions was mostly indirect. Two types of edaphic information were studied: (i) information from surveys on location, specific exposure, soil bearing capacity, type of soil, acidity of soil and humidity of soil and (ii) Ellenberg indicators information. Some factors from surveys were retained, such as location, specific exposure, soil bearing capacity and type of soil. However, for the other variables of the survey, the validity of data in a country-wide context was difficult to demonstrate, information on these variables being related to a small area and so difficult to compare at a national scale. Thus specific soil measurements such as depth, humidity and acidity could enrich edaphic factors.



#### 4.1. Redundancy among vegetation characteristics

The lack of similarity between the classifications by floristic composition and species dominance may be related to the dynamics of the vegetation, and the changes in the management of grassland during the past decades. As previously shown by Plantureux *et al.* (1993) for grasslands submitted to significant changes in their management, species dominance is affected before floristic composition, until a new equilibrium is reached. These mechanisms have different rates, what explain that the floristic composition mostly reflects past conditions, whereas species dominance reflects response to the perturbation resulting to present conditions. In addition, intensification of exploitation generally favors the competitive (productive) species such as *Lolium perenne*, *Poa trivialis*, *Trifolium repens*, whatever soil conditions. In more lenient management, the nature of dominating species is more sensitive to soil conditions. All these mechanisms result in a discrepancy between floristic composition and species dominance. Moreover, the lower level of redundancy between functional and botanical characteristics may be imputed to the fact that different species share the same range of variability of functional traits.

In our conditions, we could hypothesized that the botanical composition of a grassland results in the trade-off between edaphic and management conditions (“two step process”), the issue of the balance depending of the relative intensity of the more structuring (stress induced) factor.

#### 4.2. Effect of management, edaphic and climatic factors on vegetation characteristics

##### 4.2.1. Global hierarchy between factors

Our results support the view that hierarchy between factors is not the same according to each vegetation characteristic. However, a higher effect of edaphic and climatic factors was found compared with management. This effect of climatic factors has been shown (Pakeman *et al.* 2009). Also, studies showing a significant effect of management factors are generally conducted in a precise pedoclimatic context. Overall, a combined effect of management, edaphic and climatic factors generally explains the botanical or functional composition of grassland (Klimek *et al.* 2007). The large gradient of edaphic and climatic conditions (from oceanic lowlands to continental mountainous conditions) considered in our study certainly offers an explanation for this ranking. In comparison to botanical data collected in 1980 and 1990 in the same area (Lorraine, Plantureux *et al.* 1993), we note a reduction of the floristic

richness in the data collected in 2009. This erosion of biodiversity is due to a general intensification in grassland use, which flattens the gradient of management factors.

#### 4.2.2. Factors influencing vegetation characteristics

Continentality (evaluated by average summer and winter temperature) and intensification (evaluated by number of uses, fertility of soil and organic fertilization) are the main factors affecting the community and then indirectly date of flowering. Plant communities with a late date of flowering are found in less intensive grasslands or oceanic conditions. This effect of climatic factors, and more specifically temperature, precipitation and humidity on date of flowering is consistent with the literature (Martini *et al.* 2010), as for edaphic factors (Seghieri *et al.* 2009). Management factors and particularly intensification could affect date of flowering, reducing flowering and number of species (Kopek *et al.* 2010). Also, little is known about the direct effect of nutrients and defoliation regimes on phenological stages for species-rich grasslands, and studies generally find small variations in date of flowering (Cleland *et al.* 2004).

The effect of soil fertility appears, as expected, as the main explanatory factor for a number of oligotrophic species. Soil fertility is linked to the region and to past and present management, which affect this factor (Kapfer 1988; Grevilliot & Muller 1996). In addition, the other factors expected were management factors. Here management factors, which are more closely linked to grazing conditions, appear secondary (Kapfer 1988; Grevilliot & Muller 1996).

However, we showed that south mountain grassland conditions associated with uplands grassland of central France and oceanic wet grassland conditions affect a number of oligotrophic species. These are characterized by an elevated average ET during winter (Table 15), which helps to increase the number of oligotrophic species. Upland grasslands of central France have an elevated number of oligotrophic species due to the acidity of soil and average T in winter conditions (limitation of winter mineralization).

As expected from the hypothesis, intensification was the main factor affecting the percentage of entomophily species. The impact of an intensification of the practices on this factor has been shown (Potts *et al.* 2009; Batary *et al.* 2010). We also demonstrated a negative effect of humidity of soil on this factor. The most probable explanation in our conditions is due to the management of grasslands. In fact grasslands in humid conditions present a weak percentage of entomophily species because they are more intensively managed.

The main factors affecting LDMC are consistent with the fact that LDMC reflects the nutrient capture strategy of plants. LDMC is thus a life trait mainly driven by soil fertility and

frequency of use as expected by the hypothesis. LDMC decreases when grazing pressure or mowing frequency increases and with high fertilization (Fonseca *et al.* 2000; Al Haj Khaled *et al.* 2005; McIntyre 2008; Ordonez *et al.* 2010).

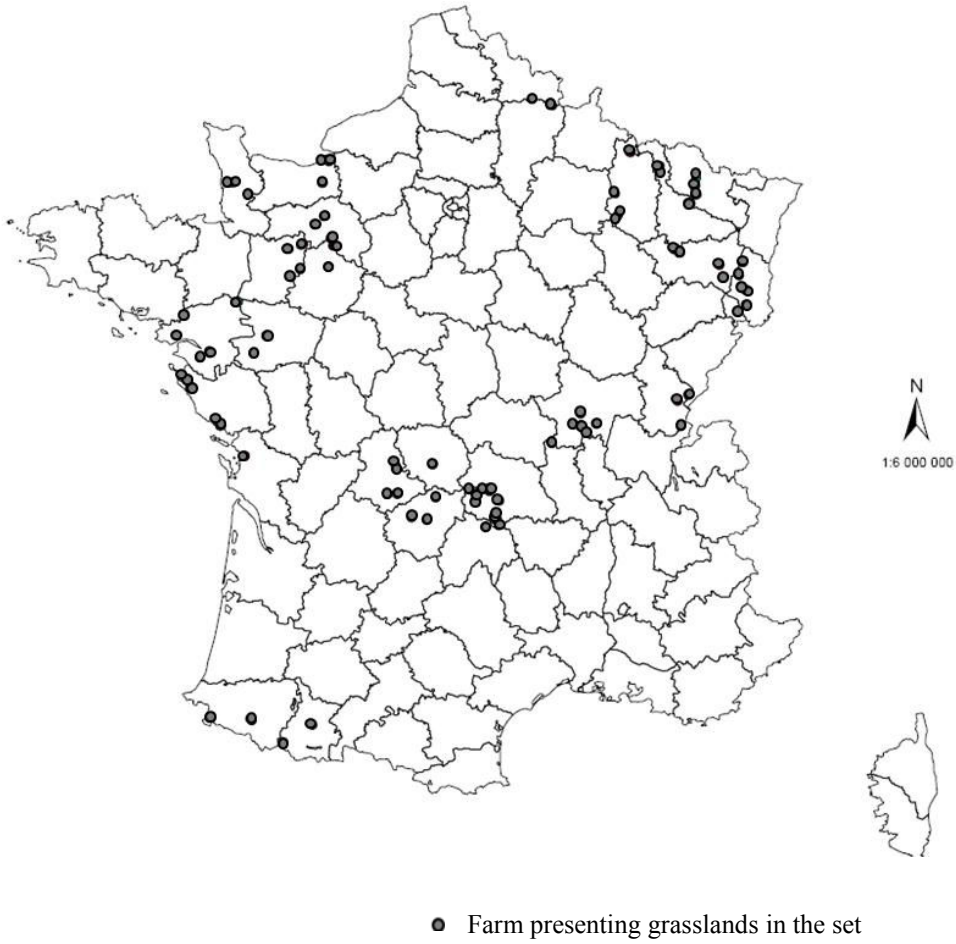
Botanical composition was mainly influenced by climatic and edaphic factors as expected by the hypothesis. The marked effect of habitat factors taking into consideration soil and management factors has been shown (Weibull & Östman 2003) and notably the effect of soil fertility (Kopeck *et al.* 2010). The effect of habitat includes management factors (Kamhen *et al.* 2002) and also a joint effect of management and environmental factors (Klimek *et al.* 2007). The more sensitive effect of management factors on dominance species was not demonstrated here. Management factors were less strongly represented for floristic composition and dominance species. A very small effect of landscape factors on botanical composition has been demonstrated (Weibull & Östman 2003), but the weakness of the effect confirmed that it did not need to be taken into consideration here.

## **Conclusion**

Management, edaphic and climatic factors help to explain vegetation characteristics, with a predominant effect of edaphic and climatic factors. Functional composition was characterized by management, edaphic and climatic factors together, whereas botanical composition was mainly influenced by climatic and edaphic factors and included more factors and more interactions between factors. Interactions between factors have to be taken into consideration to predict the botanical and the functional composition of grasslands. Also, relations between vegetation characteristics and environmental factors could be extrapolated over a long gradient of situations. The hypotheses concerning factors driving the functional composition were confirmed. However, functional composition is explained by other factors such as management factors for percentage of entomophily species, although the effect of management on botanical composition and more specifically on dominance species was demonstrated but not as a major factor. This study demonstrates that over the management and pedoclimatic gradient studied in this set of grasslands, functional and botanical vegetation characteristics were not closely linked. Vegetation characteristics are good predictors of ecosystem services. Thus to predict ecosystem services delivered by grasslands, functional and botanical composition have to be taken into consideration and may be used in combination.

**Acknowledgments**

This study was funded by the French Ministry of Agriculture and supported by the CAS DAR program. This program was conducted in collaboration with the French Livestock Institute, INRA, Nancy University and agricultural extension services. We thank E. Pottier, the manager of the study, botanical experts (P. Carrère, L. Chabrol, P.O. Cochard, B. Dury, A. Farruggia, D. Leconte, and P. Pierre), 33 members of agricultural extension services for data collection, Meteo France, the national service for climate recording for climatic data and B. Noirtin for specialization data. Finally, we thank the farmers who helped us set up our sample of grasslands.



**Figure 21. Location of farms where grasslands were studied.**

**Tableau 8. Management, edaphic and climatic factors available by survey, calculation (e-flora-sys software) and from Meteo France database.**

<b>Management factors</b> (investigation) ( <i>15 factors</i> )
Quantity of mineral nitrogen fertilization
Quantity of organic nitrogen fertilization
Quantity of mineral and organic phosphorus fertilization
Quantity of mineral and organic potassium fertilization
Total nitrogen supply
Lime supply
Milling
Harrowing
Livestock grazing intensity
Mean instantaneous livestock density
Time of grazing
Date of first use
Number of uses
Type of use
Grass regrowth duration
<b>Edaphic factors</b> (investigation and e-flora-sys) ( <i>11 factors</i> )
Topography
Specific exposure
Type of soil (light, heavy, constraint-free)
Soil humidity (qualitative appraisal during winter and summer)
Soil acidity (qualitative appraisal)
Depth of soil
Soil bearing capacity
Nitrogen nutritient index (NNI)
Ellenberg indicators of soil humidity
Ellenberg indicators of soil acidity
Ellenberg indicators of soil fertility
<b>Climatic factors</b> (Meteo France data) ( <i>8 factors</i> )
Annual precipitations
Average temperature during winter
Average temperature during summer
Average evapotranspiration during winter
Average evapotranspiration during summer
Sum of temperature from February to June
Annual radiation
Altitude

NNI was calculated using the proportion of nitrogen and dry matter yield ( $NNI = N \times 10 / 4.8 (DM)^{-0.32}$ , with N in g/kg DM) (Lemaire & Salette 1984)

**Tableau 9. Management, edaphic and climatic factors retained for the study of links between those factors and characteristics of vegetation.**

<b>Management factors (9 factors)</b>	<b>Minimum value</b>	<b>Maximum value</b>
Quantity of mineral nitrogen (N) fertilization (kg/ha)	0	500
Quantity of organic nitrogen (N) fertilization (kg/ha)	0	195
Total phosphorus (P) fertilization (kg/ha)	0	42
Total potassium (K) fertilization (kg/ha)	0	93
Livestock grazing intensity (days LU/ha/year)	0	1728
Mean instantaneous livestock density (LU/ha)	0	55
Total duration of grazing (days/ year)	0	298
Date of first use (day of year)	45	305
Number of uses (per year)	1	11
<b>Edaphic factors (9 factors)</b>		
Topography	no slope	slope
Specific exposure	no specific exposition	NW/NE or SE/SW
Type of soil	constraint-free	light/heavy
Depth of soil	shallow	deep
Soil bearing capacity	no problem of load-bearing capacity	problem load-bearing capacity
Nitrogen nutrient index (NNI)	19	101
Ellenberg indicators of soil humidity (soil humidity)	4.67	8.08
Ellenberg indicators of soil acidity (soil acidity)	4.38	7.33
Ellenberg indicators of soil fertility (soil fertility)	3.96	7.10
<b>Climatic factors (7 factors)</b>		
Annual precipitations (mm/year)	650	1890
Sum of temperature on 1 April (°C days)	53	113
Average temperature during winter (°C)	3.5	9.4
Average temperature during summer (°C)	11.5	15.9
Average evapotranspiration during winter (mm/j)	0.62	1.6
Average evapotranspiration during summer (mm/j)	2.59	3.73
Annual radiation (MJ/m <sup>2</sup> )	3745	4808

NNI was calculated using the proportion of nitrogen and dry matter yield ( $NNI = N \times 10 / 4.8 (DM)^{-0.32}$ , with N in g/kg DM) (Lemaire & Salette 1984)

**Tableau 10. Number of data (n), mean, minimum, maximum, median and standard deviation data for quantitative characteristics of vegetation.**

<b>Quantitative characteristics of vegetation</b>	<b>n</b>	<b>Mean</b>	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>	<b>Median</b>	<b>Standard deviation</b>
Thermal time to inflorescence emergence (from 1 February) (° C days)	178	1156.00	804.00	1810.00	1123.00	185.32
Number of oligotrophic species	178	4.53	0.00	28.00	4.00	3.40
Percentage of entomophily species	178	0.21	0.00	0.62	0.20	0.13
LDMC (calculated for grasses) (mg/g)	177	248.95	228.13	277.31	247.16	12.14



**Tableau 11. Classification of grasslands according to species categories and main dominating species.**

		SD1	SD2	SD3	SD4	SD5	SD6	SD7	SD8	SD9	SD10	SD11	SD12	SD13	SD14
	Number of grasslands per type	4	8	4	6	6	7	13	23	37	11	31	19	4	4
Grasses	<b>Total grasses in class (including dominated grasses)</b>	<b>0.71</b>	<b>0.60</b>	<b>0.61</b>	<b>0.83</b>	<b>0.80</b>	<b>0.69</b>	<b>0.63</b>	<b>0.79</b>	<b>0.71</b>	<b>0.72</b>	<b>0.72</b>	<b>0.80</b>	<b>0.58</b>	<b>0.72</b>
	<i>Agrostis capillaris</i> L.		0.08	0.02	0.04	0.01	0.04	0.01	0.02	0.12	0.03	0.02	0.05		0.09
	<i>Agrostis stolonifera</i> L.	0.03		0.08		0.06	0.01	0.02	0.22	0.01		0.02	0.01		
	<i>Alopecurus pratensis</i> L. subsp. <i>pratensis</i>			0.01		0.03	0.08	0.04	0.02	0.02	0.02	0.03	0.12		0.10
	<i>Anthoxanthum odoratum</i> L.	0.02	0.06	0.01	0.03	0.04	0.03	0.06	0.03	0.12	0.09	0.02	0.03		0.01
	<i>Cynosurus cristatus</i> L.	0.01	0.02			0.01	0.06	0.03	0.02	0.03	0.01				0.00
	<i>Dactylis glomerata</i> L.		0.05	0.03	0.20	0.04	0.03	0.04	0.01	0.02	0.06	0.04	0.01		0.04
	<i>Elytrigia repens</i> (L.) Desv. ex Nevski	0.03	0.01		0.01	0.01			0.11					0.01	
	<i>Festuca arundinacea</i> Schreb. subsp. <i>arundinacea</i>	0.08		0.03	0.06	0.01		0.03	0.00	0.02	0.01		0.04	0.07	0.02
	<i>Festuca rubra</i> L.		0.22		0.01	0.01		0.04	0.00	0.06	0.08	0.01	0.02		0.04
	<i>Holcus lanatus</i> L.	0.12	0.01	0.02	0.01	0.17	0.11	0.07	0.06	0.09	0.08	0.11	0.07		0.08
	<i>Hordeum secalinum</i> Schreb.	0.02							0.08						
	<i>Lolium perenne</i> L.	0.01	0.02	0.34	0.22	0.21	0.18	0.07	0.08	0.07	0.07	0.25	0.20	0.40	0.10
	<i>Poa pratensis</i> L.		0.01		0.02	0.06				0.01		0.01	0.06	0.05	
	<i>Poa trivialis</i> L.	0.06	0.04	0.04	0.16	0.12	0.13	0.09	0.05	0.06	0.07	0.16	0.09	0.01	0.21
	<i>Trisetum flavescens</i> (L.) P.Beauv.		0.01		0.04			0.02			0.09	0.01	0.01		0.01
	<i>Vulpia bromoides</i> (L.) Gray	0.11							0.01						
Legumes	<b>Total legumes in class (including dominated legumes)</b>	<b>0.12</b>	<b>0.08</b>	<b>0.20</b>	<b>0.07</b>	<b>0.10</b>	<b>0.14</b>	<b>0.20</b>	<b>0.07</b>	<b>0.13</b>	<b>0.08</b>	<b>0.14</b>	<b>0.06</b>	<b>0.24</b>	<b>0.12</b>
	<i>Trifolium pratense</i> L.	0.03	0.01			0.01		6.00	0.00	0.03	0.02				
	<i>Trifolium repens</i> L.	0.07	0.06	0.20	0.04	0.08	0.13	0.09	0.02	0.08	0.03	0.14	0.05	0.23	0.12
Forbs	<b>Total forbs in class (including dominated forbs)</b>	<b>0.13</b>	<b>0.27</b>	<b>0.14</b>	<b>0.09</b>	<b>0.08</b>	<b>0.13</b>	<b>0.16</b>	<b>0.09</b>	<b>0.15</b>	<b>0.18</b>	<b>0.12</b>	<b>0.09</b>	<b>0.17</b>	<b>0.15</b>
	<i>Ranunculus acris</i> L.			0.01		0.04	0.04	0.03	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.04	0.05
	<i>Taraxacum officinale</i> Weber		0.01	0.09	0.03	0.02	0.02	0.02		0.02	0.02	0.06	0.02		0.04

SD: Species dominance classes of grasslands;

Values indicate the mean dominance of the species in the class of grassland (e.g. the mean dominance of *Agrostis capillaris* in the 8 grasslands of the class SD2 is 0.08).

Dominance is expressed as a proportion of the total plant biomass. The sum of total grasses, legumes and forbs in class is equal to 1; the difference is the proportion of bare soil. Dominances values higher or equal to 0.05 are highlighted (species mainly contributing to biomass).

**Tableau 12. Classification of grasslands according to their floristic composition and frequency of presence species of each class of grassland.**

	FC12	FC7	FC11	FC4	FC6	FC1	FC5	FC8	FC3	FC9	FC10	FC2
Number of grasslands per type	12	5	12	8	17	29	27	9	19	17	14	9
<i>Oenanthe silaifolia</i> M.Bieb.	0.83	0.20				0.03						
<i>Carduus tenuiflorus</i> Curtis	0.50	0.20										
<i>Bromus racemosus</i> L.		0.60										
<i>Carduus pycnocephalus</i> L. subsp. <i>pycnocephalus</i>		0.20										
<i>Carum verticillatum</i> (L.) W.D.J.Koch		0.20										
<i>Oenanthe fistulosa</i> L.	0.08		0.50									
<i>Phalaris arundinacea</i> L.			0.33									
<i>Atriplex prostrata</i> Boucher ex DC.			0.25									
<i>Pleurozium schreberi</i> (Willd. ex Brid.) Mitt.				0.88		0.14						
<i>Juncus effusus</i> L.				0.38		0.07				0.06		
<i>Carex flacca</i> Schreb.				0.25								
<i>Carex</i> sp.					0.29					0.06		
<i>Luzula campestris</i> (L.) DC.					0.24					0.18	0.50	
<i>Centaurea thuillieri</i> (Dostál) J.Duvign. & Lambinon						0.07						
<i>Trifolium fragiferum</i> L.						0.14						
<i>Allium vineale</i> L.	0.08				0.06		0.30					
<i>Trifolium arvense</i> L.					0.06			0.44				
<i>Senecio erucifolius</i> L.								0.22				
<i>Geranium pratense</i> L. subsp. <i>pratense</i>								0.44				
<i>Cerastium fontanum vulgare</i> Greu.&Burd.									0.68			
<i>Veronica serpyllifolia</i> L.					0.06	0.07	0.04		0.32		0.07	0.11
<i>Polygonum bistorta</i> L.										0.41	0.14	
<i>Alchemilla vulgaris</i> L.										0.59	0.14	
<i>Avena pratensis</i> L.											0.36	
<i>Sanguisorba officinalis</i> L.											0.36	
<i>Cirsium eriophorum</i> (L.) Scop.											0.43	
<i>Vulpia myuros</i> (L.) C.C.Gmel.												0.44
<i>Veronica persica</i> Poir.							0.07					0.22

FC: Floristic composition classes of grasslands. Values indicate the proportion of the grassland of the class where the species is present (e.g. 0.83 of the 12 grasslands of the class FC12 contain *Oenanthe silaifolia*). Empty cells of the table indicate that species is always missing in the class.

**Tableau 13a. Main pedoclimatic and management features of the classes of grassland according to the floristic composition typology (types FC1 to FC12). Missing information on features indicate that the variability of the feature within the class is too high. Soil properties are estimated from the values of Ellenberg indexes, N fertilization includes mineral and organic fertilization, stocking rates are calculated from data collected by interviewing farmers.**

Grassland Type	Climate type	Elevation (above sea level) in m	Soil properties (1)	N	Date of first exploitation (in julian day)	Type of use (G/M/C)	Grazing intensity (SR / GD)
			Fertility Acidity Moisture	Fertilisation			
FC1	Atlantic	70-250	Medium to high soil fertility, low to medium soil pH	0-200		G or M	
FC2	Atlantic or semi-continental	30-600	low to medium soil fertility, low to medium soil pH, dry to medium moisture conditions	0-50		G or M	
FC3	Atlantic or semi-continental	100-600	low to medium soil fertility, low to medium soil pH, dry to medium moisture conditions	0-175		G, M or C	GD<100
FC4	Atlantic	100-200	Medium to high soil fertility, low to medium soil pH, wet to medium moisture conditions	0-120		G or M	
FC5	Semi-continental	100-350	High soil fertility, medium to high pH, medium moisture conditions	0-100	120-150	G or M	
FC6	Semi-continental	200-900	Medium to high soil fertility, medium soil pH, medium moisture conditions	0-100		M or C	
FC7	Atlantic	0-30	low to medium soil fertility, medium soil pH, medium moisture conditions	0		G or M	
FC8	Semi-continental	300-450	medium soil fertility	0-50		G or M	GD>100
FC9	Semi-continental	600-1000	Medium to high soil fertility, low to medium soil pH	0-175	>120	M or C	GD<100
FC10	Semi-continental	750-2000	low to medium soil fertility, medium to low soil pH, dry conditions	0-90	>120	G or M	GD<100
FC11	Atlantic	0-30	medium to high soil pH, wet conditions	0-60	>150	G, M or C	

(1) Estimated from Ellenberg indexes ; Fertilisation  $\text{ikgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ ; G : only grazed; M : cut and grazed; C : only cut; Stocking rate (SR) in  $\text{LU}\cdot\text{ha}^{-1}$  and grazing duration (GD) in  $\text{days}\cdot\text{year}^{-1}$ ;

**Tableau 13b. Main pedoclimatic and management features of the classes of grassland according to the floristic composition typology (types FC1 to FC12). Missing information on features indicate that the variability of the feature within the class is too high. Soil properties are estimated from the values of Ellenberg indexes, N fertilization includes mineral and organic fertilization, stocking rates are calculated from data collected by interviewing farmers.**

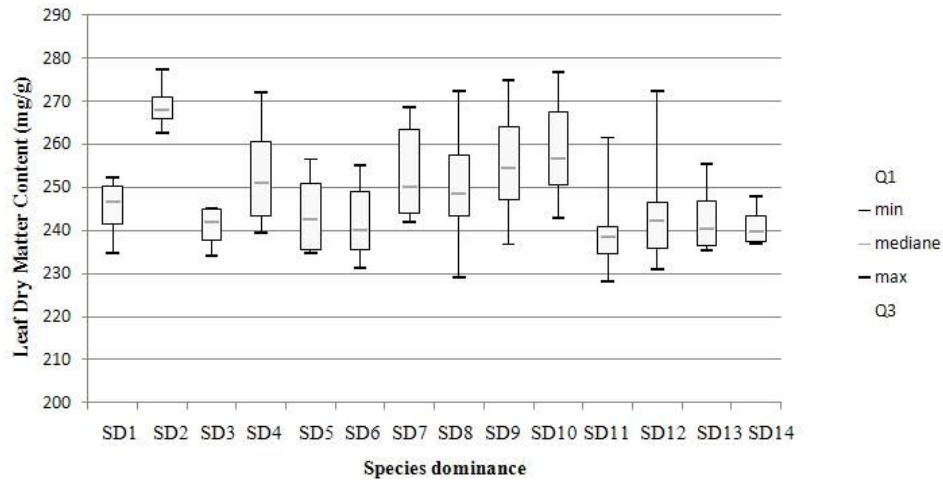
Grassland Type	Climate type	Elevation (above sea level) in m	Soil properties (1) Fertility Acidity Moisture	N Fertilisation	Date of first exploitation (in julian day)	Type of use (G/M/C)	Grazing intensity (SR / GD)
SD1	Atlantic	0-20	low soil fertility	0-50	>150	G or M	GD<150
SD2	Semi-continental	600-2000	low soil fertility acid soil and dry conditions	0	120-150	G	SR>2
SD3	Atlantic	0-150	medium soil fertility	0-30	<90	G	GD>100
SD4	Semi-continental	250-800	medium to high soil fertility, medium pH	40-100		G or M	SR>2
SD5	Atlantic	50-350	medium to high soil fertility, medium pH	0-125	90-120	G or M	
SD6	Atlantic	100-350	medium to high soil fertility, acid soil	0-50	<90	G	SR>2, GD>150
SD7	Semi-continental	200-500	low to medium soil fertility, acid soil and dry conditions	0-130	>150	G, M or C	SR>2, GD 100-150
SD8	Atlantic	0-30	medium soil fertility and pH, wet conditions	0-50	>90	G, M or C	SR<2
SD9	Atlantic or semi-continental	0-700	medium soil fertility, acid to neutral soil pH	0-130	>150	G, M or C	
SD10	Semi-continental	550-850	medium soil fertility, acid to neutral soil pH, dry conditions	0-100	>150	M or C	GD<100
SD11	Atlantic or semi-continental	80-900	high soil fertility	30-80		G, M or C	GD<100
SD12	Atlantic or semi-continental	130-340	high soil fertility	50-200	120-150	G, M or C	GD<150
SD13	Semi-continental	300-400	high soil fertility, medium soil pH	0-60		G or M	SR>2, GD<100
SD14	Atlantic or semi-continental	150-800	Medium soil fertility	0-60			GD>100

(1) Estimated from Ellenberg indexes ; Fertilisation  $\text{ikgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ ; G : only grazed; M : cut and grazed; C : only cut; Stocking rate (SR) in  $\text{LU}\cdot\text{ha}^{-1}$  and grazing duration (GD) in  $\text{days}\cdot\text{year}^{-1}$ ;

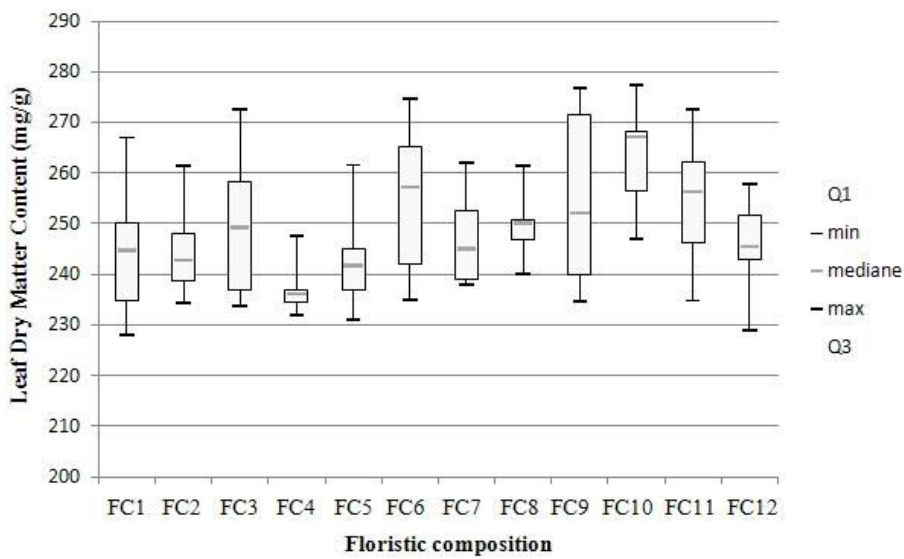
**Tableau 14. Correlation matrix between vegetation characteristics. Linear regressions were performed between functional characteristics, variance analysis between botanical characteristics (qualitative variable) and functional characteristics (quantitative variables), and a  $\chi^2$  test between types of species dominance and types of floristic composition.**

LDMC	Date of flowering			Number of oligotrophic species			Percentage of entomophily species			Dominant species		Floristic composition	
	effect	P	R <sup>2</sup>	effect	P	R <sup>2</sup>	effect	P	R <sup>2</sup>	P	R <sup>2</sup>	P	R <sup>2</sup> / $\chi^2$
LDMC	.	0	0.1030	+	<0.0001	0.26	0	0.6675		<0.0001	0.41	<0.0001	0.29
Date of flowering	.	.	-	0	0.8684	-	-	<0.0001	0.09	<0.0001	0.4	<0.0001	0.45
Number of oligotrophic species				.			+	0.0397	0.02	<0.0001	0.51	<0.0001	0.58
Percentage of entomophily species							.			<0.0001	0.32	<0.0001	0.31
Dominant species										.		<0.0001	/ 515.99
Floristic composition													.

LDMC: Dry matter content. P: significance threshold; -: negative effect; +: positive effect; 0: no statistical trend.



**Figure 22. Variability of leaf dry matter content ( $\text{mg g}^{-1}$ ) for fourteen species dominance type (SD) identified (cf. tableau 4).**



**Figure 23. Variability of leaf dry matter content ( $\text{mg g}^{-1}$ ) for the twelve floristic composition types (FC) identified (cf. tableau 5).**

**Tableau 15. Significance of management, edaphic and climatic factors on functional composition (date of flowering, number of oligotrophic species, percentage of entomophily species, and LDMC): stepwise shortlisted factors (main factors) and significant factors (secondary factors). Main factors were classified weight hierarchy in the stepwise. See Table 2 for description of factors.**

Characteristics of vegetation	R <sup>2</sup> of the model	R <sup>2</sup> of main factors	Main factors	positive or negative effect of factor	Secondary factors
Date of flowering	0.85	0.47	Average T during W	+	Time of grazing, Average ET during S, Annual radiation, Average ET during W*Date of first use
			Number of uses	-	
			Soil humidity	+	
			Soil fertility	-	
			Organic N fertilization	-	
			Average T during S	-	
Number of oligotrophic species	0.92	0.73	Annual precipitations	-	Livestock grazing intensity, Soil bearing capacity, Constraint of type of soil, Time of grazing, Soil humidity, Soil acidity, Average ET during S, Topography, Average T during W, Specific exposure, Average T during S, Livestock grazing intensity*Annual precipitations, Nitrogen nutrient index, Total P fertilization
			Soil fertility	-	
			Acidity of soil*Average T during W	-	
Percentage of entomophilies species	0.77	0.30	Average ET during W	+	Soil acidity*Topography, Time of grazing, Type of soil, Average ET during S, Average ET during S*Annual radiation, Annual precipitations*Average T during W, Soil humidity*Date of first use
			Soil humidity	-	
			Number of uses	+	
			Organic N fertilization	+	
LDMC	0.85	0.31	Mineral N fertilization	-	Number of uses, Time of grazing, Total K fertilization, Soil humidity*Date of first use, Soil humidity, Average ET during S, Depth of soil, Type of soil, Specific exposure, Soil humidity*Average T during S, Average ET during W, Soil humidity*Soil acidity, Soil bearing capacity, Soil acidity*Annual radiation
			Soil fertility	-	
			Mean instantaneous livestock density	-	
			Annual radiation	-	

LDMC: Dry Matter Content; N: Nitrogen; ET: Evapotranspiration; T: Temperature; P: Phosphorus; K: Potassium; S: Summer; W: Winter. Factors are classified in order of importance.

**Tableau 16. Significance of management, edaphic and climatic factors on botanical composition (dominance species and floristic composition): stepwise shortlisted factors (main factors) and significant factors (secondary factors). Main factors were classified weight hierarchy in the stepwise. See Table 11 for description of factors.**

Characteristics of vegetation	R <sup>2</sup> of the model	R <sup>2</sup> of main factors	Main factors	Secondary factors
Groups of presence or absence vegetation	1.03	0.51	Average T during W Annual radiation Average T during S Annual radiation*Average ET during S Average ET during S Annual precipitations*Soil fertility Annual radiation*Average ET during W Soil fertility*Soil acidity Sum of T on 1 April*Annual radiation Date of first use*Soil humidity Soil acidity Total K fertilization*Total P fertilization	Soil fertility*Average ET during W, Time of grazing*Soil bearing capacity, Annual precipitations, Annual precipitations* Annual radiation, Average ET during W, Average ET during S*Soil acidity, Annual radiation*Soil acidity, Sum of T on 1 April*Average ET during S, Sum of T on 1 April*Average ET during W, Annual precipitations*Average ET during W, Sum of T on 1 April*Soil acidity, Topography, Soil bearing capacity*Average ET during W, Soil bearing capacity* Soil humidity, Soil bearing capacity* Soil acidity
Groups of dominance vegetation	0.70	0.31	Average T during S Annual radiation*Average ET during S Soil fertility* Soil acidity Soil fertility*Annual radiation Average T during winter Soil fertility*Average ET during S Soil fertility Type of soil Annual radiation Total K fertilization*Soil bearing capacity Average ET during S	Sum of T on 1 April*Annual radiation, Livestock grazing intensity, Date of first use*Time of grazing, Specific exposure, Specific exposure*Soil acidity, Date of first use* Average ET during S, Annual radiation* Soil bearing capacity, Average ET during W

N: Nitrogen; ET: Evapotranspiration; T: Temperature; P: Phosphorus; K: Potassium; S: Summer; W: Winter. Factors are classified in order of importance. The R<sup>2</sup> of the model could be equal or greater than 1 because of the integration of interaction in the calculation of R<sup>2</sup>.



## References

- AGRESTE (2000). Les prairies en 1998 [Grasslands in 1998]. *Agreste Chiffres et Données Agriculture* **128**, 1-73.
- 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**, 391-398.
- ALLARD, V., SOUSSANA, J. F., FALCIMAGNE, R., BERBIGIER, P., BONNEFOND, J. M., CESCHIA, E., D'HOOR, P., HENAULT, C., LAVILLE, P., MARTIN, C. & PINARES-PATINO, C. (2007). The role of grazing management for the net biome productivity and greenhouse gas budget (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub>) of semi-natural grassland. *Agriculture Ecosystems & Environment* **121**, 47-58.
- ANDUEZA, D., CRUZ, P., FARRUGGIA, A., BAUMONT, R., PICARD, F. & the late of Michalet-Doreau B. (2010). Nutritive value of two meadows and relationships with some vegetation traits. *Grass and Forage Science* **65**, 325-334.
- ANSQUER, P., DURU, M., THEAU, J.-P. & Cruz P. (2009). Convergence in plant traits between species within grassland communities simplifies their monitoring. *Ecological Indicators* **9**, 1020-1029.
- BATARY, P., BALDI, A., SAROPATAKI, M., KOHLER, F., VERHULST, J., KNOP, E., HERZOG, F. & KLEIJN, D. (2010). Effect of conservation management on bees and insect-pollinated grassland plant communities in three European countries. *Agriculture Ecosystems & Environment* **136**, 35-39.
- BENIZRI, E. & AMIAUD, B. (2005). Relationship between plants and soil microbial communities in fertilized grasslands. *Soil Biology & Biochemistry* **37**, 2055-2064.
- BRUM, O., LOPEZ, S., GARCIA, R., ANDRES, S. & CALLEJA, A. (2009). Influence of harvest season, cutting frequency and nitrogen fertilization of mountain meadows on yield, floristic composition and protein content of herbage. *Revista Brasileira de Zootecnia* **38**, 596-604.
- BUREL F., GARNIER E., AMIAUD B., AULAGNIER S., BUTET A., CHAUVEL B., CARRE G., CORTET J., COUVET D., JOLY P., LESCOURET F., PLANTUREUX S., SARTHOU J-P., STEINBERG C., TICHIT M., VAISSIERE B., VAN TUINEN D. & VILLENAVE C. (2009). Chapitre 1: les effets de l'agriculture sur la biodiversité. In : *ESCo: Agriculture et biodiversité*, pp 1-175.
- CLELAND, E. E., SMITH, M. D., ANDELMAN, S. J., BOWLES, C., CARNEY, K. M., HORNER-DEVINE, M. C., DRAKE, J. M., EMERY, S. M., GRAMLING, J. M. & VANDERMAST, D. B. (2004). Invasion in space and time: non-native species richness and relative abundance respond to interannual variation in productivity and diversity. *Ecology Letters* **7**, 947-957.
- CRUZ P., QUADROS, F.L.F., THEAU, J.P., FRIZZO, A., JOUANY, C., DURU, M. & CARVALHO, P.C. (2010). Leaf traits as functional descriptors of the intensity of continuous grazing in native grasslands in the south of Brazil. *Rangeland, Ecology & Management* **63** (3), 350-358.
- DE BELLO, F., LAVOREL, S., DIAZ, S., HARRINGTON, R., CORNELISSEN, J. H. C., BARDGETT, R. D., BERG, M. P., CIPRIOTTI, P., FELD, C. K., HERING, D., DA SILVA, P. M., POTTS, S. G., SANDIN, L., SOUSA, J. P., STORKEY, J., WARDLE, D. A. & HARRISON, P. A. (2010). Towards an assessment of multiple ecosystem processes and services via functional traits. *Biodiversity and Conservation* **19**, 2873-2893.
- DELPECH, R. (2005). Structure of some grassland and meadow plant communities from basic substrates of Vanoise mountains (France). *Acta Botanica Gallica* **152**, 465-481.
- DIAZ, S., MARCELO, C. & CASANOVES, F. (1998). Plant functional traits and environmental filters at a regional scale. *Journal of Vegetation Science* **9**, 113-122.
- DIAZ, S., LAVOREL, S., MCINTYRE, S., FALCZUK, V., CASANOVES, F., MILCHUNAS, D.G., SKARPE, C., RUSCH, G., STERNBERG, M., NOY-MEIR, I., LANDSBERG, J., ZHANG, W., CLARK, H. & CAMPBELL, B.D. (2007). Plant trait responses to grazing—a global synthesis. *Global Change Biology* **13**, 313-341.

- DIBB, D.W., FIXEN, P. E. & MURPHY, L. S. (1990). Balanced Fertilization with Particular Reference to Phosphates-Interaction of Phosphorus with Other Inputs and Management-Practices. *Fertilizer Research* **26**, 29-52.
- DURU, M., CRUZ, P., THEAU, J.-P., JOUANY, C., ANSQUER, P., AL HAJ KHALED, R. & THEROND, O. (2007). Typologies des prairies riches en espèces en vue d'évaluer leur valeur d'usage: bases agro-écologiques et exemple d'application [Typologies of multi-specific pastures in view of the assessment of their use value : agro-ecological bases and examples of applications]. *Fourrages* **192**, 453-475.
- DURU, M., CRUZ, P., AL HAJ KHALED, R., DUCOUTURIEUX, C. & THEAU, J.-P. (2008). Relevance of plant functional types based on leaf dry matter content for assessing digestibility of native grass species and species-rich grassland communities in spring. *Agronomy Journal* **100**, 1622-1630.
- DURU, M., ANSQUER, P., JOUANY, C., THEAU, J. P. & CRUZ, P. (2010). Comparison of methods for assessing the impact of different disturbances and nutrient conditions upon functional characteristics of grassland communities. *Ann Bot.* **106** (5), 823-831.
- EITZINGER, J., ORLANDINI, S., STEFANSKI, R. & NAYLOR, R.E.L. (2010). Climate change and agriculture: introductory editorial. *The Journal of Agricultural Science* **148**, 499-500.
- FLEURY, P. (1995). *Aptitude des couverts prairiaux à assurer des fonctions agricoles et environnementales: recherche méthodologique et application aux prairies de fauche des Alpes du Nord [Abilities of meadow cover to ensure agricultural and environmental functions. Methodological research and application to the hay meadows of the Northern Alps]*. PhD thesis, Université de Lorraine, Nancy, France.
- FONSECA, C. R., OVERTON, J. M., COLLINS, B. & WESTOBY, M. (2000). Shifts in trait-combinations along rainfall and phosphorus gradients. *Journal of Ecology* **88**, 964-977.
- GREVILLIOT, F. & MULLER, S. (1996). Study of the impact of the modification of agricultural practices on vegetal biodiversity in the flood plain meadows of the Meuse: methods and first results. *Acta Botanica Gallica* **143**, 317-338.
- HOPKINS, A. & HOLZ, B. (2006). Grassland for agriculture and nature conservation: production, quality and multi-functionality. *Agronomy Research* **4**, 3-20.
- HOPKINS, A. & WILKINS, R.J. (2006). Temperate grassland: key developments in the last century and future perspectives. *The Journal of Agricultural Science* **144**, 503-523.
- KAHMEN, S., POSCHOLD, P. & SCHREIBER, K-F. (2002). Conservation management of calcareous grassland. Changes in plant species composition and response of functional traits during 25 years. *Biological Conservation* **104**, 319-328.
- KAHMEN, S. & POSCHOLD, P. (2008). Effect of grassland management on plant functional trait composition. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **128**, 137-145.
- KAPFER, A. (1988). Studies on the return of fertilized damp grassland to its natural condition - impoverishment and vegetation development. *Dissertationes Botanicae* **120**, 1-154.
- KLIMAS, E. & BALEZENTIENE, L. (2008). Fertilization impact on natural and sown grassland floristic improvement. *Zemes ukio Mokslai* **15**, 41-45.
- KLIMEK, S., KEMMERMANN, A. R. G., HOFMANN, M. & ISSELSTEIN, J. (2007). Plant species richness and composition in managed grasslands: the relative importance of field management and environmental factors. *Biological Conservation* **134**, 559-570.
- KOHOUTEN, A., POZDISEK, J., SRAMEK, P., ODSTRCILOVA, V., NERUSIL, P., KOMAREK, P., GAISLER, J., FIALA, J., MICOVA, P. & SVOZILOVA, M. (2005). Effects of fertilizer level and cutting frequency on yield and forage quality of grasslands. In: *Proceeding of the 13th International Occasional Symposium of the European-Grassland-Federation*, pp. 332-335. Tartu, Estonia: Grassland Science in Europe.

- KOPEC, M., ZARZYCKI, J. & GONDEK, K. (2010). Species Diversity of Submontane Grasslands: effects of Topographic and Soil Factors. *Polish Journal of Ecology* **58**, 285-295.
- LAVOREL, S. & Garnier, E. (2002). Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail. *Functional Ecology* **16**, 545-556.
- LEMAIRE, G. & SALETTE, J. (1984). Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I. Etude de l'effet du milieu [Relation between growth and N intake dynamic for a forage grass populating. I. Study of environment effect]. *Agronomie* **4**, 423-430.
- LEPS, J. & SMILAUER, P. (2003). *Multivariate analysis of ecological data*. Cambridge: Cambridge University Press.
- LINDEMANN-MATTHIES, P., JUNGE, X. & MATTHIES, D. (2010). The influence of plant diversity on people's perception and aesthetic appreciation of grassland vegetation. *Biological Conservation* **143**, 195-202.
- LOUAULT, F., PILLAR, V.D, AUFRERE, J., GARNIER, E. & SOUSSANA, J-F. (2005). Plant traits and functional types in response to reduced disturbance in a semi natural grassland. *Journal of Vegetation Science* **16** (2), 151-160.
- MARTINI, A., BIONDI, D., BATISTA, A.C. & NATAL, C.M. (2010). Phenology of native species with landscaping potential. *Semina-Ciencias Agrarias* **31**, 75-84.
- MATSON, P.A, PARTON, W.J., POWER, A.G. & SWIF, M.J. (1997). Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science* **277**, 504-509.
- MCINTYRE, S. (2008). The role of plant leaf attributes in linking land use to ecosystem function in temperate grassy vegetation. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **128**, 251-258.
- ORDONEZ, J.C., VAN BODEGOM, P.M., WITTE, J-P.M., WRIGHT, I.J., REICH, P.B. & AERTS, R. (2010). A global study of relationships between leaf traits, climate and soil measures of nutrient fertility. *Global Ecology and Biogeography* **18**, 137-149.
- PAKEMAN, R., LEPS, J., KLEYER, M., LAVOREL, S., GARNIER, E. & the VISTA consortium (2009). Relative climatic, edaphic and management controls of plant functional trait signatures. *Journal of Vegetation Science* **20**, 148-159.
- PARRIS, K. (2002). Grasslands and the environment: recent European trends and future directions - an OECD perspective. Multi-function grasslands: quality forages, animal products and landscapes. In: *Proceedings of the 19th General Meeting of the European Grassland Federation*, pp 957-985. La Rochelle, France: Grassland Science in Europe.
- PAVLU, V., HEJCMAN, M., PAVLU, L. & GAISLER, J. (2007). Restoration of grazing management and its effect on vegetation in an upland grassland. *Applied Vegetation Science* **10**, 375-382.
- PETER-SCHMID, M.K.Y, KOLLIKER, R. & BOLLER, B. (2008). Value of permanent grassland habitats as reservoirs of *Festuca pratensis* Huds. and *Lolium multiflorum* Lam. populations for breeding and conservation. *Euphytica* **164**, 239-253.
- PLANTUREUX, S., BONISCHOT R. & GUCKERT, A. (1993). Classification, vegetation dynamics and forage production of permanent pastures in Lorraine. *Eur. J. Agron.* **2**, 11-17.
- PLANTUREUX, S., NEY, A. & AMIAUD, B. (2010). Evaluation of the agronomical and environment relevance of the CAP measure "flowering grassland". Grassland in a changing world. In: *Proceedings of the 23th General Meeting of the European Grassland Federation*, pp. 666-668. Kiel, Germany: Grassland Science in Europe. <http://eflorasys.inpl-nancy.fr> (verified 21 September 2010).
- POTTS, S. G., WOODCOCK, B. A., ROBERTS, S. P. M., TSCHEULIN, T., PILGRIM, E. S., BROWN, V. K. & TALLOWIN, J. R. (2009). Enhancing pollinator biodiversity in intensive grasslands. *Journal of Applied Ecology* **46**, 369-379.

- REID, W.V., MOONEY, H.A., CROPPER, A., CAPISTRANO, D., CARPENTER, S.R., CHOPRA, K., DASGUPTA, P., DIETZ, T., DURAIAPPAH, A.K., HASSAN, R., KASPERSON, R., LEEMANS, R., MAY, R.M., MCMICHAEL, A.J., PINGALI, P., SAMPER, C., SCHOLLES, R., WATSON, R.T., ZAKRI, A.H., SHIDONG, Z., ASH, N.J., BENETT, E., KUMAR, P., LEE, M.J., RAUDSEPP-HEARNE, C., SIMONS, H., THOELL, J. & ZUREK, N.B. (2005). Millennium Ecosystem Assessment Synthesis report. pp 219.
- RUDMANN-MAURE, K., WEYAND, A., FISCHER, M. & STÖCKLIN, J. (2008). The role of landuse and natural determinants for grassland vegetation composition in the Swiss Alps. *Basic and Applied Ecology* **9**, 94-503.
- SEGHIERI, J., VESCOVO, A., PADEL, K., SOUBIE, R., ARJOUNIN, M., BOULAIN, N., DE ROSNAY, P., GALLE, S., GOSSET, M., MOUCTAR, A. H., PEUGEOT, C. & TIMOUK, F. (2009). Relationships between climate, soil moisture and phenology of the woody cover in two sites located along the West African latitudinal gradient. *Journal of Hydrology* **375**, 78-89.
- SCHAFFERS, A.P. & SYKORA K.V. (2000). Reliability of Ellenberg indicator values for moisture, nitrogen and soil reaction: a comparison with field measurements. *Journal of Vegetation Science* **11**, 225-244.
- SOUSSANA, J-F. & LUSCHER, A. (2007). Temperate grassland and global atmospheric change: a review. *Grass and Forage Science* **62**,127-134.
- TER BRAAK, C.J.F. & SMILAUER, P. (2002). *CANOCO Reference manual and CanocoDraw for Windows User's guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5)*. Microcomputer Power Ithaca, NY, USA.
- THEAU, J-P. & ZEROUROU, A. (2008). Herb'âge, une méthode de calcul des sommes de température pour la gestion des prairies [Herb'âge, a method of sum of temperatures calculation for grassland management]. In : Outils pour la gestion des couverts prairiaux (Eds P. Cruz, C. Jouany & J-P. Theau), pp. 91-102. Les Cahiers d'Orphée, INRA UMR AGIR, Toulouse.
- WEIBULL, A.C. & OSTMAN, O. (2003). Species composition in agroecosystems: The effect of landscape, habitat, and farm management. *Basic and Applied Ecology* **4**, 349-361.
- ZIEGLER, D. & HEDUIT, M. (1991). *Engrais de ferme: valeur fertilisante, gestion, environnement*. Levallois, France.

## 2. Résultats de l'étude des liens entre les descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion et la proportion de graminées, légumineuses et diverses

### *Redondance entre les états de la végétation*

L'étude des liens entre la proportion de graminées, légumineuses et diverses, et les autres états de la végétation a montré une indépendance entre les variables de composition botanique et de composition fonctionnelle. Cependant des liens ont été mis en évidence entre les variables de la composition fonctionnelle et notamment entre la proportion de graminées et le pourcentage d'espèces entomogames, entre la proportion de graminées et la proportion de légumineuses ou entre la proportion de graminées et la proportion de diverses (Tableau 17).

### *Quels descripteurs influencent la proportion de graminées, légumineuses et diverses ?*

Les proportions de graminées, légumineuses et diverses mesurées au niveau de la parcelle ont été calculées par le logiciel e-FLORA-sys (Tableau 18). Les descripteurs sont classés en descripteurs principaux et secondaires selon leur rang dans les stepwises (descripteurs principaux) et analyses de variances (descripteurs secondaires). Les modèles de prévision de la proportion de graminées, légumineuses et diverses, à partir de l'ensemble des descripteurs sont élevés (de 75% à 79%), alors que ceux basés sur les descripteurs principaux sont moins précis (9 à 23%) (Tableau 19). Le nombre total de descripteurs contribuant à prédire la proportion de graminées, légumineuses et diverses s'élève au maximum à 6 descripteurs si on considère l'ensemble des modèles ou 2 à 3 descripteurs si on considère les descripteurs principaux (Tableau 19).

Si on considère l'ensemble des descripteurs, les conditions climatiques et les pratiques de gestion sont ceux qui contribuent majoritairement à prédire la proportion de graminées, légumineuses et diverses. Les conditions de sol et notamment la fertilité, l'humidité ou l'acidité du sol contribuent à expliquer les proportions de graminées et de légumineuses. L'évapotranspiration (ETP) hivernale constitue un descripteur secondaire important dans la prévision de la proportion de graminées, légumineuses et diverses (Tableau 19).

La proportion de graminées est gouvernée principalement par l'intensité d'exploitation, avec un effet positif de la fertilisation et un effet négatif du nombre d'exploitation, ainsi que par l'humidité du sol (Tableau 19). La proportion de légumineuses est prévue uniquement par les pratiques de gestion, si on considère les descripteurs principaux. Les conditions d'ETP en hiver de sol (acidité, fertilité) contribuent à expliquer les modèles complets (Tableau 19). Les

conditions météorologiques et les pratiques de gestion contribuent à expliquer la proportion de diverses, avec un effet négatif de la durée de pâturage et un effet positif des précipitations sur cet état de la végétation (Tableau 19).

### 3. Discussion sur l'étude des liens entre les descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion et la proportion de graminées, légumineuses et diverses

L'effet des pratiques de gestion sur les proportions de graminées, légumineuses et diverses est important. Les descripteurs climatiques et édaphiques interviennent le plus souvent en tant que descripteurs secondaires. De plus, un effet combiné des descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion peut contribuer à expliquer la composition fonctionnelle (Klimek *et al.* 2007). Les modèles de prévision basés sur les descripteurs principaux sont beaucoup moins précis que les modèles intégrant l'ensemble des descripteurs et particulièrement pour la proportion de légumineuses. Ces modèles basés sur les descripteurs principaux sont composés de peu de descripteurs contrairement aux modèles globaux, ce qui peut être à l'origine d'une diminution de la précision des modèles. Dans certains cas, comme pour la proportion de légumineuses, il serait plus intéressant de retenir les descripteurs secondaires.

La proportion de graminées est influencée positivement par l'humidité du sol. Les pratiques de gestion ont une influence sur la proportion de graminées et légumineuses. En effet la fertilisation a un effet positif sur la proportion de graminées (Odstreilia *et al.* 2007) et négatif sur la proportion de légumineuses (Butkuvienne et Butkute 2008), avec une faible persistance à la fertilisation potassique pour cette dernière (Klimas et Balzentiene 2008). Kadziulienė et Kadziulis (2007) ont montré que la proportion de graminées diminuait dans des pelouses pâturées depuis un certain temps, ce qui est en lien avec un effet négatif du nombre d'exploitation. Le nombre d'utilisation a également un effet sur la proportion de légumineuses, en l'augmentant mais cette proportion est variable selon le type d'animal présent (Ndreata-Koren *et al.* 2009). La composition en diverses varie aussi avec les pratiques de gestion : les diverses en rosettes sont associées au pâturage alors que les diverses de grande taille sont associées à la fauche ou à un pâturage peu intense (Lanta *et al.* 2009). Globalement, la proportion de diverses est plus importante sur des chargements peu élevés (Dumont *et al.* 2009). Un chargement élevé est souvent associé à des durées de pâturage longues ce qui a un effet négatif sur la proportion de diverses. Un effet des précipitations sur la proportion en diverses a également été montré (Liu et Zangh 2010), notamment vis-à-vis des précipitations entre avril et octobre.

**Tableau 17. Matrice de corrélation entre les états de la végétation. Des régressions linéaires ont été effectuées entre les différents variables de la composition fonctionnelle, des analyses de variance entre les variables de la composition botanique et les variables de la composition fonctionnelle, et un test du Khi2 entre les variables de la composition botanique.**

TMS	Date de floraison			Nombre d'espèces oligotrophes			Pourcentage d'espèces entomogames			Proportion graminées			Proportion légumineuses			Proportion diverses			Dominance en espèces		Composition floristique	
	effet	P	R <sup>2</sup>	effet	P	R <sup>2</sup>	effet	P	R <sup>2</sup>	effet	P	R <sup>2</sup>	effet	P	R <sup>2</sup>	effet	P	R <sup>2</sup>	P	R <sup>2</sup>	P	R <sup>2</sup> /Khi <sup>2</sup>
TMS	0	-	0.1029	+	<0.0001	0.26	0	0.6675			0.5385		0.5917		0.1734				<0.0001	0.41	<0.0001	0.29
Date de floraison	.	.		0	0.8684	-	-	<0.0001	0.09	+	0.0022	0.05	-	0.0351	0.02	-	0.0265	0.03	<0.0001	0.40	<0.0001	0.45
Nombre d'espèces oligotrophes				.			+	0.0397	0.02	-	0.0045	0.04		0.4707		+	0.0015	0.05	<0.0001	0.51	<0.0001	0.58
Pourcentage d'espèces entomogames							.		0.52	-	<0.0001	0.39	+	<0.0001	0.16	+	<0.0001	0.32	<0.0001	0.32	<0.0001	0.31
Proportion de graminées										.		0.46	-	<0.0001	0.53	-	<0.0001	0.18	***	0.18	<0.0001	0.11
Proportion de légumineuses													.		0.9885				**	0.18	***	0.22
Proportion de diverses																.			*	0.15	*	0.11
Dominance en espèces																			.		***	515.99
Composition floristique																						.

TMS : Teneur en Matière Sèche ; P : significativité ; \* P<0.05 ; \*\* : P<0.01 ; \*\*\* : P<0.001 ; ns : non significatif ; - : effet négatif ; + : effet positif

**Tableau 18. Nombre de données (n), moyenne, minimum, maximum, médiane et écart type de la proportion de graminées, légumineuses et diverses.**

Composition fonctionnelle	n	Moyenne	Minimum	Maximum	Médiane	Ecart type
Proportion de graminées	178.00	72.37	36.02	100.00	73.21	15.03
Proportion de légumineuses	178.00	11.59	0.00	60.63	9.38	10.71
Proportion de diverses	178.00	15.98	0.00	53.75	14.75	11.06

**Tableau 19. Significativité des descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion sur la proportion de graminées, légumineuses et diverses. Les descripteurs principaux ont été classés par une hiérarchie de leur poids dans la stepwise.**

Composition fonctionnelle	R <sup>2</sup> du modèle complet	R <sup>2</sup> des descripteurs principaux	Descripteurs principaux	Effet positif ou négatif des descripteurs	Descripteurs secondaires
Proportion de graminées	0.75	0.23	Nombre d'exploitation	-	ETP hiver*rayonnement, Chargement instantané
			Fertilisation azotée minérale	+	
			Indice d'humidité du sol	+	
Proportion de légumineuses	0.76	0.09	Fertilisation potassique	-	ETP hiver, Indice d'humidité du sol, INN, Indice d'acidité du sol* pente, ETP hiver* rayonnement, Indice d'acidité du sol*Fertilisation azotée minérale
			Nombre d'exploitation	+	
Proportion de diverses	0.79	0.19	Précipitations annuelles	+	ETP hiver, ETP hiver* Pente, Chargement animal global, Fertilisation azotée minérale
			Durée de pâturage	-	



#### 4. Conclusion générale

Ce travail nous a permis de montrer que **la composition botanique et fonctionnelle sont influencées par des descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion différents.**

La composition fonctionnelle est influencée par des descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion alors que la composition botanique est majoritairement influencée par des descripteurs pédoclimatiques. Par exemple, la proportion de graminées est influencée par un descripteur de sol et des descripteurs de pratiques de gestion, alors que la présence en espèce est majoritairement influencée par des descripteurs pédoclimatiques. A l'extrême, la proportion de légumineuses est uniquement prédite par des descripteurs des pratiques de gestion, en descripteurs principaux. L'interaction entre les descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion est également à prendre en compte dans la prévision de la composition botanique et fonctionnelle. Le nombre de descripteurs nécessaires à la prévision des états de la végétation est variable mais ils sont plus nombreux pour la composition botanique. Nous avons également vu que les modèles de prédiction de la composition botanique sont plus précis que ceux de la composition fonctionnelle. Les modèles basés sur les descripteurs principaux sont parfois beaucoup moins précis que les modèles incluant l'ensemble des descripteurs. En effet le modèle de prédiction de la proportion de légumineuses est de 0.76 en tenant compte de l'ensemble des descripteurs et de 0.09, avec les descripteurs principaux (Tableau 19).

Nous avons également montré que la composition botanique et fonctionnelle sont non redondantes. Des liens entre les variables de composition fonctionnelle ont été mis en évidence, notamment entre la proportion de graminées et le pourcentage d'espèces entomogames.

Ces états de la végétation sont de bons prédicteurs des services fourragers et environnementaux : ces deux approches sont donc complémentaires et sont à prendre en compte dans la prévision des services des prairies permanentes. Cette étude nous a également permis de sélectionner les descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion qui gouvernent les états de la végétation. Ils sont synthétisés dans le tableau 20.

**Tableau 20. Récapitulatif des liens entre descripteurs, états de la végétation, critères d'aptitude et services après étude des liens entre descripteurs et états de la végétation.**

SERVICES														
services "environnementaux"				Services fourragers										
Pollinisation	Aspect esthétique de la prairie	Maintien de la diversité ordinaire	Maintien de la diversité patrimoniale	valeur aromatique	Stock de bonne qualité au printemps et pâturage de bonne qualité pour les animaux exigeants	Stock exclusif de bonne qualité au printemps et en été	Stock sans attente de qualité au printemps et pâturage des repousses en été autonome des animaux à faibles besoins	Stock exclusif de printemps sans attente de qualité	Pâturage de qualité toute l'année (sauf l'hiver) des animaux exigeants, avec forte contribution à la ration	Nourrir les animaux à besoins exigeants à l'herbe de la fin de printemps à l'automne avec un apport extérieur possible	Finition à l'herbe au printemps avec utilisation possible en été et automne	Faire pâturer les animaux l'hiver et poursuivre l'utilisation au printemps	Pâturage d'ajustement sans attente de qualité et sans catégorie d'animaux préférentielle	Nourrir des animaux à faibles besoins à l'herbe du printemps à l'automne sans apport extérieurs et sans attente de qualité
CRITERES D'APTITUDE DE LA VEGETATION														
Quantité de nectar disponible	Variété et intensité globale de floraison	Diversité des espèces floristiques	Nombre d'espèces à statut de protection	Proportion de la biomasse en composés aromatiques										
	Variété du couvert	Abondance relative		Palatabilité										
ETATS DE LA VEGETATION														
	Présence/absence des espèces			Présence/absence des espèces			Présence/absence des espèces			Présence/absence des espèces				
	Dominance en espèces			Dominance en espèces			Dominance en espèces			Dominance en espèces				
Date de floraison (des espèces mellifères)				Date de floraison						Stade de développement				
Pourcentage d'espèces entomozames				Nombre d'espèces oligotrophes						Proportion de graminées, légumineuses et diverses				
DESCRIPTEURS PEDOCLIMATIQUE														
Température (moyenne été et hiver)														
Précipitations annuelles							Précipitations annuelles							
							Rayonnement annuel							
							ETP moyenne été							
				ETP moyenne hiver										
Humidité sol										Humidité sol				
Fertilité sol	Fertilité sol									Fertilité sol				
							Acidité sol							
	Type de sol			Type de sol						Type de sol				
							Rayonnement annuel * ETP moyenne été							
										Rayonnement annuel * ETP moyenne hiver				
										Précipitations annuelles * Fertilité du sol				
										Somme T 1 avril * Rayonnement annuel				
										Fertilité sol * Acidité sol				
										Fertilité sol * Rayonnement annuel				
										Fertilité sol * ETP moyen été				
										Fertilité sol * ETP moyen été				
										Acidité sol * Température moyenne hiver				
INTERACTIONS PEDOCLIMATIQUES ET PRATIQUES														
	Date de 1 <sup>re</sup> utilisation * Humidité du sol			Date de 1 <sup>re</sup> utilisation * Humidité du sol			Date de 1 <sup>re</sup> utilisation * Humidité du sol			Date de 1 <sup>re</sup> utilisation * Humidité du sol				
	Fertilisation K tot * Portance sol			Fertilisation K tot * Portance sol			Fertilisation K tot * Portance sol			Fertilisation K tot * Portance sol				
PRATIQUES DE GESTION														
Fertilisation N min										Fertilisation N min				
Fertilisation N org										Fertilisation N org				
Nombre d'utilisations										Nombre d'utilisations				
										Chargement instantané				
				Fertilisation P tot * Fertilisation K tot						Fertilisation P tot * Fertilisation K tot				
										Fertilisation K				
										Durée de pâturage				

# Chapitre 3

## **Etude des liens entre les états de la végétation et les critères d'aptitude fourragers**

*Quels sont les critères d'aptitude étudiés ?*

*Quels liens entre la composition fonctionnelle et  
les critères d'aptitude des services fourragers ?*



Dans cette partie, nous étudions les liens entre les états de la végétation et les critères d'aptitude (Figure 24). Nous travaillerons uniquement sur les critères d'aptitude fourragers. Les critères d'aptitudes environnementaux sont très liés aux états de la végétation et peuvent être calculés notamment à l'aide du logiciel e-FLORA-sys. Nous ne les étudierons pas dans ce chapitre. Nous étudierons uniquement les états de la végétation mesurés au niveau des mises en défens, soit la composition fonctionnelle (proportion de graminées, légumineuses et diverses, phénologie de la parcelle, TF, et TMS). Nous analyserons d'abord ces liens sur un même milieu et dans un dispositif expérimental maîtrisé, à l'aide du dispositif "*Prairies Marcenat*". Nous évaluerons les différences de production et de qualité liées aux types fonctionnels. Ce travail fait l'objet d'une publication dans la revue "*Grass and Forage Science*". Ensuite nous testerons si la composition fonctionnelle permet d'expliquer la variabilité des critères d'aptitudes fourragers sur une large gamme de prairies. Nous utiliserons le dispositif "*réseau national*", en travaillant sur les données obtenues **dans les mises en défens**. Ce travail est présenté au paragraphe 2 sous la forme d'un manuscrit en cours de préparation pour publication. Enfin nous synthétiserons l'ensemble des résultats obtenus dans les deux études.

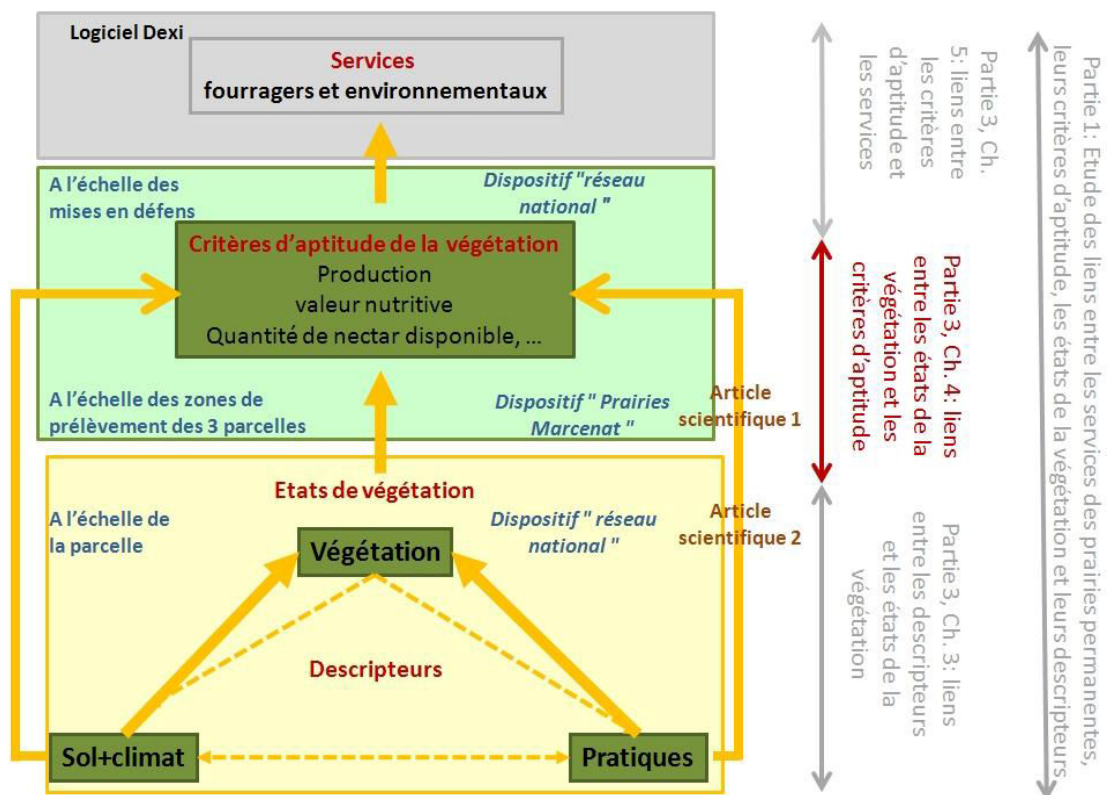


Figure 24. Démarche du travail de thèse illustrée par les dispositifs mis en place et les articles scientifiques rédigés.

### 1. Evaluation des différences de production et de qualité liées aux types fonctionnels dans un même milieu : introduction à l'article soumis à Grass and Forage Science

L'étude des prairies permanentes à partir d'une approche par la composition fonctionnelle (traits de vie) s'est développée. Cruz *et al.* (2002, 2010) ont proposé une classification des prairies permanentes selon leurs appartenances à des TF. Ces TF traduisent les stratégies des plantes vis-à-vis des ressources, selon le niveau de fertilisation et le taux de défoliation (Cruz *et al.* 2002 ; Louault *et al.* 2005 ; Cruz *et al.* 2010). Cette classification est associée à un gradient de production, de phénologie et de potentiel de digestibilité des plantes au stade feuillu. Il est important de noter que la classification en TF ne prend en compte que les graminées, qui sont généralement présentes en grande proportion dans les prairies permanentes.

L'objectif de cette étape est de vérifier les hypothèses avancées quant aux TF pour trois cycles de végétation :

- 1) Les espèces du TF A ou B sont caractérisées par une phénologie précoce, avec des productions élevées et des valeurs de digestibilité élevées, qui chutent rapidement au cours du temps (Cruz *et al.* 2010) ;
- 2) Les espèces du TF C ont une phénologie plus tardive, avec des productions plus faibles et une digestibilité plus faible mais qui reste stable plus longtemps au cours du temps (Cruz *et al.* 2010).

Nous voulons vérifier ces hypothèses et quantifier ces liens pour trois cycles de végétation. Pour cela, nous avons travaillé sur trois prairies contrastées par leur composition en TF : une prairie avec une proportion élevée de TF A, une prairie avec une proportion élevée de TF B et b et une prairie avec une proportion élevée de TF C. Nous avons suivi la dynamique de la végétation au premier cycle de végétation en fonction des ST. Pour les deuxièmes et troisièmes cycles, nous avons travaillé en fonction des jours de repousse, car la température n'est plus considérée comme un facteur limitant (De Montard 1981 ; Niqueux et Arnaud 1981).

Pour répondre aux hypothèses posées, nous avons étudié les liens entre les TF et les stades de développement avec la production et valeur nutritive au cours des trois cycles de végétation et durant deux années sur un dispositif expérimental contrôlé (site expérimental INRA de Marcenat, 15). Pour chaque cycle de végétation, nous avons ajusté un modèle mixte, en considérant le type de parcelle comme un effet fixe et la ST ou les jours de repousse comme

une covariable. Les modèles ont été testés en incluant les effets linéaires, quadratiques de la covariable et les interactions avec le type de parcelle. Les variables non significatives ont été retirées du modèle. Les analyses ont inclus les deux années de suivi, en considérant l'année comme un effet aléatoire. Les ST et les jours de repousse aux différentes semaines de prélèvement ont également été considérés en variables de classe pour prendre en compte la structure répétée des données.

## **The seasonal dynamics of biomass production and herbage quality of three grasslands with contrasting functional compositions**

Michaud A (1, 2, 3), Andueza D. (1), Picard F. (1), Plantureux S. (2), Baumont R. (1)

(1) INRA UR1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France

(2) Nancy Université-INRA, UMR 1121 LAE, 2 avenue de la Forêt de Haye, 54501 Vandoeuvre-les-Nancy, France

(3) Institut de l'Élevage, Le Mourier 87900 Saint-Priest-Ligoure, France

Corresponding author:

A. Michaud

INRA UR1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France

Phone: 00 33 4 73 62 46 11

Fax: 00 33 4 73 62 41 18

e-mail: Audrey.michaud@clermont.inra.fr

### **Abstract**

Classifying grasses into plant functional types (PFT) according to their strategy of capture (PFT A, B and b) or conservation (PFT C and D) is claimed to predict variability in biomass production and herbage quality in grasslands. We tested this hypothesis in three consecutive vegetation cycles on three grasslands located in the same area with contrasting dominant grasses classified respectively PFT A, PFT Bb and PFT C. During the first cycle, biomass accumulation was rapid and high for the PFT A and PFT Bb grasslands and the high quality of herbage at the beginning of the cycle declined rapidly with the reproductive development. By contrast, biomass accumulation was slow in the PFT C grassland, with a lower quality at the beginning of the cycle that declined slowly, consistent with the later reproductive development. For the regrowth cycles the same ranking of grasslands was observed for biomass accumulation, and the differences in digestibility were similar to those observed at the beginning of the first vegetation cycle, with constantly higher values for the PFT A and Bb grasslands. Combining type of grassland with sum of temperature for the first cycle and regrowth days for the regrowth cycles provides quantitative models of herbage biomass and quality that show high accuracy for the first vegetation cycle.

**Keywords:** grassland, phenology, nutritive value, biomass production, functional groups



## Introduction

The contribution of permanent grasslands to ecosystemic services (e.g. biodiversity maintenance, prevention of soil erosion, potential sequestration of carbon, etc.) has been recently recognized (Hopkins and Holtz, 2006), highlighting their utility for multifunctional livestock systems. Yet European grassland area has significantly shrunk (by 15 Mha) in the last thirty years. One important way to promote the use of permanent grasslands by farmers is to foster a better understanding of their agronomic features (Huyghe 2008).

Nutritive value and production of cultivated grasses and legume forages is well researched (Demarquilly and Jarrige, 1981) but estimates for permanent grassland are scant (Tallowin and Jefferson, 1999; Bruinenberg *et al.*, 2002). Every permanent grassland sward is a unique mixture of species differing in phenology, and this complexity makes it difficult to characterize its seasonal dynamics of biomass production and feed value. The botanical composition of permanent grasslands, which helps to explain nutritive value and production levels (Jeangros and Schmid, 1991; Baumont *et al.*, 2008), results from the combined effects of environmental factors such as type of soil, water availability, climate effects, altitude (Buxton, 1996; Todorova and Kirilov, 2002) and management practices (Jeangros and Schmid, 1991; Duru *et al.*, 1998; Blackstock *et al.*, 1999; Cop *et al.*, 2009).

Plant community ecologists account for grassland ecosystem function on the basis of plant functional type composition, rather than taxonomic composition. Leaf traits such as specific leaf area and leaf dry matter content can be used to classify grasses co-occurring in grasslands into functional types. These types correspond to plant growth strategies according to fertility level and defoliation rate (Cruz *et al.*, 2002, Louault *et al.*, 2005, Cruz *et al.*, 2010). Species adapted to fertile soils and frequent defoliation (e.g. *Lolium perenne*, *Dactylis glomerata*) are characterized by high specific leaf areas and low leaf dry matter content, favouring fast regrowth after defoliation. By contrast, species adapted to infertile soils and infrequent defoliation (e.g. *Festuca rubra*) show low specific leaf area and high leaf dry matter content. This classification is associated with a gradient of production and digestibility values as growth rate and digestibility increase with specific leaf area and digestibility declines with leaf dry matter content (Pontes *et al.*, 2007). Most grassland functional typologies are based on grasses, even though legumes and forbs may account in some cases for more than half of the biomass. Convergence in plant traits between grasses and dicotyledonous species within grassland communities has been recently demonstrated (Ansquer *et al.*, 2009). A successful attempt was made to model grassland dynamics using the mean value of functional traits of its

composition in grass functional types (Jouven *et al.*, 2006a). Thus in the classification of grasses into four functional types proposed by Cruz *et al.* (2002), grassland swards with plant functional types PFT A and PFT B are characterized by high nutritive value at the beginning of the first vegetation cycle and a rapid decline of nutritive value with early plant maturity and high biomass accumulation. Conversely, PFT C and PFT D grassland swards are characterized in general by low digestibility values at the beginning of the cycle, but a slower decline through the vegetation cycle, owing to later plant maturity and lower biomass accumulation (Duru *et al.*, 2008). Recently, an intermediate functional type, b, was defined to characterize species from fertile soils that had later phenology than species of types A and B (Cruz *et al.*, 2010) (e.g. *Agrostis capillaris*).

In this study we sought to test this classification at the community level for three consecutive vegetation cycles to cover the whole growing season and quantify the differences in the seasonal dynamics of biomass production and herbage quality according to the functional type composition of grasslands. To this end, three grasslands with contrasting functional types growing under the same climate in the same area were studied over three successive vegetation cycles and two consecutive years. Hypotheses on the role of functional type composition in vegetation dynamics primarily concern the first vegetation cycle, and data on second and third regrowths are rare. For the first vegetation cycle, we opted to follow the vegetation dynamics by the sum of temperature (ST), as this is the main environmental factor influencing plant phenology in the first cycle (De Montard, 1981; Berekoutou, 1986; Schaumberger *et al.*, 2009; Schut *et al.*, 2010). For the second and third vegetation cycles, we followed the vegetation dynamics according to regrowth days (RD) because temperature is not the limiting factor during summer and autumn, unlike in spring (De Montard, 1981; Niqueux and Arnaud, 1981).

## Materials and Methods

### Study area and experimental design

The experiment was conducted in 2007 and 2008 on the experimental INRA farm of Marcenat in an upland area of central France (45°15'N, 2°55'E; altitude 1135–1215 m). The local climate is semi-continental, with a mean annual temperature of 6.1°C ranging from –0.2°C in winter to 14.25°C in summer and with a mean annual rainfall of 1210 mm over the period 2007–2008 (Figure 25). Three grasslands were chosen in the same location with

contrasting botanical compositions: (i) a 5-year-old temporary grassland sown with *Lolium perenne* and characterized by early phenology growing on a fertile area (early fertile (EF)), (ii) a 12-year-old temporary grassland sown with *Dactylis glomerata* and now considered as a semi-natural grassland characterized by a medium phenology on a fertile area (medium fertile (MF)) and (iii) a permanent grassland, never fertilized, characterized by late phenology on a poor area (late poor (LP)).

The three grasslands were studied in a fully factorial design with three replicate blocks for each of the grasslands in a homogenous area. The replicate blocks were changed between 2007 and 2008. Each year three consecutive vegetation cycles were studied. In each grassland, about 200 m<sup>2</sup> was cut in mid-June for the second cycle and about 100 m<sup>2</sup> at the beginning of August for the third cycle. After cutting, each block of EF and MF were fertilized with 40 N units. Herbage sampling was scheduled as follows: first cycle sampling began on the first week in May and lasted 12 weeks, the second cycle sampling began in mid-July and lasted 11 weeks and the third cycle sampling began in the first week of September and lasted 7 weeks. Nine samples were taken in each measurement week (three grasslands, three blocks). The samples were achieved by cutting a strip 5 m long and 0.10 m wide at a cut height of 0.05 m. The samples were weighed and divided into two sub-samples: one was kept at each sampling date for dry matter yield and nutritive value measurements and the other was kept every two sampling dates for phenology and botanical composition measurements.

## Measurements

### *Dry matter yield*

At each sampling date, for each grassland and each block, a sub-sample of the fresh harvest biomass was weighed and dried at 60°C for 72 h to determine the dry matter (DM) content and then to calculate the dry matter yield (DMY) of each plot (t DM ha<sup>-1</sup>).

### *Nutritive value*

The nutritive value of the herbage harvested was assessed using the 540 sub-samples collected for DM yield for the three plots of the three grasslands and for all cutting dates, comprising three vegetation cycles. These sub-samples were ground using a sample mill through a 0.8 mm screen. Each herbage sub-sample was analysed using near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to determine crude protein (CP) concentration, and pepsin-cellulase DM

digestibility. Near infra-red spectra were collected with a monochromator (FOSS-NIRSystems 6500, Silver Spring, MD, USA), which scanned the spectral range 400–2500 nm. All spectra and reference data were recorded and managed with the WINISI Version 1.6 software (Infrasoft International, Port Matilda, PA, USA). Modified partial least square (MPLS) calibration equations were developed using 103 samples selected from the total spectral population collected (Shenk and Westerhaus, 1991). The calibration set was analysed for CP concentration (using Kjeldahl Nx6.25) and pepsin-cellulase DM digestibility (Aufrère and Demarquilly, 1989) of herbage.

The statistical parameters of the calibration models obtained for CP concentration and pepsin-cellulase DM digestibility of herbage were as follows: number of samples, 103; ranges, 21–263 g.kg<sup>-1</sup> DM and 0.334–0.885 g.g<sup>-1</sup>; standard errors of cross validation, 5.6 g.kg<sup>-1</sup> DM and 0.034, and  $R^2$  values of cross validation 0.98 and 0.86 respectively.

#### *Botanical composition*

Botanical composition of the three grasslands was determined in spring 2007, based on three samples per grassland. On each sample, species were identified and weighed (fresh and dry weight). They were clustered by families (grasses, legumes and forbs) and by functional types for grasses (PFT A, PFT B, PFT C and PFT b).

#### *Phenology*

The sub-samples kept for phenology measurements were frozen at –20°C. After thawing, plant phenology for grasses was determined on 40 tillers, classified according the 13 vegetation stages defined (from an adaptation of the method proposed by Moore et al. (1991) (Table 21). The medium plant stage for each sample (MPS) was calculated as follows:

$$\text{MPS} = \frac{\sum_{i=1}^{13} (C_i N_i)}{N}$$

with  $C_i$ , code of stage  $i$  as defined in Table 21;  $N_i$  number of plants in stage  $i$ ;  $N$  total number of plants.

### Statistical analyses

All analyses were performed using the SAS software package on 9.1 run time. Data on proportions of grasses, legumes and forbs and on the functional type composition measured on the first sampling date in 2007 were tested for the effect of grassland by a one-way analysis of variance using the ANOVA procedure.

To analyse the dynamics of DM production, CP content, pepsin-cellulase digestibility and MPS, the Mixed procedure was used. A mixed model was established for each vegetation cycle separately. The statistical models considered grassland type (G) as the fixed-effect term with ST for the first vegetation cycle or RD for the second and third cycles as the covariate. The initial models tested for quadratic and linear effects with ST or RD and the possible interaction with grassland type. The higher-order terms and interactions that were not significant were sequentially removed from the model and the analysis repeated. Analysis incorporated the year and the block nested within grassland and year as random effects. Finally ST or RD were also considered as class variables and used in the repeated statement to account for time effect across the sampling dates.

## Results

### Botanical composition of grasslands

The species composition was determined in 2007 for the three grasslands (Table 22). The EF grassland was dominated by *Lolium perenne*, *Dactylis glomerata* and *Bromus mollis*, the MF grassland by *Dactylis glomerata*, *Holcus mollis*, *Taraxacum officinale*, *Trifolium pratense* and *Bromus hederaceus*, and the LP grassland by *Festuca rubra*, *Thymus serpyllum*, *Agrostis sp.*, *Sanguisorba minor* and *Briza media*. The proportion of grasses was significantly higher in EF than in LP grassland, while the contrary opposite was the case for forbs (Table 23). The proportions of grasses and forbs were intermediate for EM grassland, but there were no significant statistical differences in the dominance of legumes between grasslands. Within grasses, the three grasslands were characterized by contrasting proportions of functional types (Table 23). EF was composed of 73% of type A, with MF similar to LP and both different from EF. MF was characterized by 36% of PFT B and 24% of PFT b and both were different from the other grasslands. LP had the highest proportion of PFT C (23%), with a significant difference from the other two grasslands. EF, MF and LP were thus classified for PFT as PFT

A and PFT Bb and PFT C respectively, according to the predominance of functional types (Table 23).

### **Dry matter yield**

Results for DMY, OMD, CP content and phenology in first, second and third cycles are presented respectively in Tables 24, 25 and 26. For each variable, least square means, significance of fixed effect and parameter estimates for fixed effects are given.

The type of grassland significantly affected DMY for each vegetation cycle (Figure 26 and Tables 24, 25 and 26). DMY was significantly higher for EF than for LP grassland during all three cycles and significantly higher than MF grassland during the second and third cycles. The peaks of production at the end of the first vegetation cycle reached 6.3, 5.3 and 3.5 t DM ha<sup>-1</sup> for EF, MF and LP grassland respectively. The DMY decreased from cycle to cycle, but the ranking of grassland types remained unchanged (Figure 26).

The time course of DMY was curvilinear for the three vegetation cycles as revealed by the significant linear and quadratic effects observed for ST in the first cycle ( $P < 0.001$ , Table 24) and for RD in the second and third cycles ( $P < 0.01$ , Tables 25 and 26). The interaction between the effect of grassland and the effect of time was significant only for the second vegetation cycle (GxRD  $P < 0.001$ , Table 25), as the increase of DMY in the second cycle occurred at a higher rate for EF and MF than for LP grassland. The coefficient of determination of the predictive models for DMY reached 0.63 in the first cycle, 0.78 in the second cycle, but only 0.24 in the third cycle.

### **Organic matter digestibility**

Organic matter digestibility (OMD) decreased significantly during each cycle and for all three grasslands (Figure 27). The type of grassland affected OMD and its time course very significantly for each vegetation cycle ( $P < 0.001$ , Table 24, 25 and 26). The decrease in OMD with time was curvilinear during the first vegetation cycle as revealed by the significant linear ( $P < 0.001$ ) and quadratic effects ( $P < 0.05$ ) of ST (Table 24). The decrease with regrowth days was linear during the second and third vegetation cycles ( $P < 0.001$  in Table 25 and  $P < 0.01$  in Table 26). During the second and third vegetation cycles OMD was lowest for LP grassland ( $P < 0.05$ , Table 25 and 26). It was significantly higher for EF grassland during the third vegetation cycle (Table 26). A highly significant interaction ( $P < 0.001$ ) between

grassland type and sum of temperature was observed during the first vegetation cycle (Table 24). The decrease in OMD with ST was slower for LP grassland than for EF and MF grassland. OMD was lower for LP than for EF and MF at the beginning of the cycle for ST values around 500 °C.d, but remained higher at the end of the cycle for ST values higher than 1300 °C.d (Figure 27). Thus the mean OMD values during the first vegetation cycles were not significantly different between grasslands (Table 24).

The coefficients of determination of the relationship between OMD and ST or RD and grassland type reached 0.79 and 0.66 for the first and third vegetation cycles respectively with values of residual mean square deviation from the model (RMSD) of respectively 0.0226 and 0.0234 g.g<sup>-1</sup> (Table 24 and 26). OMD values were highly variable at the beginning of the second vegetation cycle (Figure 27). Thus the precision of the relationship was lower for the second vegetation cycle, with a coefficient of determination of only 0.36 and an RMSD value of 0.0339 g.g<sup>-1</sup> (Table 25).

### Crude protein

Crude protein (CP) content decreased significantly during each cycle and for all three grasslands (Figure 28) and was very significantly affected ( $P < 0.001$ ) by the type of grassland during each cycle (Tables 24, 25 and 26). The decrease in CP content of grasslands was curvilinear during the three vegetation cycles as revealed by the highly significant ( $P < 0.001$ ) linear and quadratic effects of ST (Table 24) during the first vegetation cycle, and also highly significant ( $P < 0.001$ ) linear and quadratic effects of RD during the second and the third vegetation cycles (Table 25 and 26). The decrease in CP content followed different trends according to the grassland, as shown by the significant interaction between G and ST ( $P < 0.001$ ) during the first vegetation cycle (Table 24), and between G and RD as well as between G and RD<sup>2</sup> during the second ( $P < 0.001$ ) and third ( $P < 0.01$ ) cycles (Tables 25 and 26). During the first and second vegetation cycles, the decrease in CP content of LP grassland was slower than that of EF and MF grasslands, resulting in a significantly higher mean CP content than EF during the first vegetation cycle (Table 24) and than EF and MF grasslands during the second vegetation cycles (Table 25).

The coefficients of determination of the relationship between OMD and ST or RD and grassland type were high, reaching 0.83 and 0.85 for the first and second vegetation cycles, with RMSD values of 15.0 and 12.9 g.kg<sup>-1</sup> (Table 24 and 25). The coefficient of

determination of the relationship was only 0.50 for the third vegetation cycle, but with a RMSD value of  $12.2 \text{ g.kg}^{-1}$ , which is in the same range (Table 26).

### Medium plant stage

The evaluation of medium plant stage (MPS) allowed the evolution of plant phenology of the three grasslands to be followed in the course of the vegetation cycles (Figure 29). The type of grassland significantly affected MPS ( $P < 0.001$ ) during the first and second vegetation cycles (Table 24 and 25). A highly significant ( $P < 0.001$ ) linear effect of ST on MPS was observed for the first vegetation cycle, without interaction with the grassland type (Table 24). The MPS of EF and MF grasslands was significantly higher than that of LP grassland throughout the first vegetation cycle. At 500 °C.d EF and MF grasslands were at the beginning of elongation, when LP grassland was only at the vegetative stage. At 1500 °C.d EF and MF grasslands reached the inflorescence emergence stage, when LP grassland was still at the elongation stage (Figure 29). During the second vegetation cycle, the effect of RD on MPS was significant only for EF and MF grasslands, with a marked curvilinear trend for EF grassland (Table 25 and Figure 29). LP grassland did not show reproductive development and stayed at a vegetative stage. During the third vegetation cycle, no reproductive development was detected, and the three grasslands stayed at a vegetative stage with no significant differences between grasslands (Table 26 and Figure 29).

The coefficients of determination of MPS with ST or RD and grassland type were 0.51 for the first and second vegetation cycles, and no significant relationship could be established for the third vegetation cycle.

### Discussion

As expected, the botanical compositions of the grasslands contrasted, and plots EF, MF and LP were classified respectively as PFT A, PFT Bb and PFT C. From this classification the EF and MF grasslands were expected to have an early-to-medium reproductive development, a high biomass production, and a high quality declining rapidly with reproductive development (Cruz *et al.*, 2010). LP grassland was expected to have a later reproductive development, a lower biomass production, and a lower quality declining less rapidly with time. The aim of this study was to test these predictions on three consecutive vegetation cycles to investigate



the whole growing season and quantify the dynamics of biomass and quality according the grassland type.

#### *Biomass and quality dynamics during the first vegetation cycle*

During the first vegetation cycle, the time course of DMY and OMD for all three grasslands was consistent with expectations. The biomass accumulation was significantly higher for the EF and EM grasslands, which were dominated by grass species such as *Lolium perenne* and *Dactylis glomerata* characterized by a nutrient capture strategy. The high above-ground productivity of these species has often been reported (Rawnsley *et al.*, 2002), even on perennial native plants (Pontes *et al.*, 2007). By contrast, the biomass accumulation in LP grassland was significantly lower, consistent with the lower productivity of species like *Festuca rubra* (Pontes *et al.*, 2007) or *Agrostis* species, which are characterized by a nutrient conservation strategy (Ryser, 1996).

The time course of OMD during the first vegetation cycle also contrasted between EF and MF grasslands and LP grassland. In agreement with Duru *et al.* (2008), the digestibility of PFT A and B grasslands was higher at the beginning of the cycle when most plants are at a vegetative stage, than the digestibility of PFT C grassland. The difference in maximum digestibility, estimated by the fixed effect of grassland type in the analysis of variance, reached 0.07 g g<sup>-1</sup>. At a leafy stage, plants of PFT C, for example *Festuca rubra*, are characterized by a higher proportion of structural carbohydrates and thus by a lower digestibility than plants of PFT A and B such as *Lolium perenne* and *Dactylis glomerata* (Bruinenberg *et al.*, 2002; Pontes *et al.*, 2007). The decrease in digestibility during a reproductive growth cycle results mainly from the development and ageing of reproductive tissues, which are less digestible than leaves (Fick, 1994; Demarquilly *et al.*, 1995). When biomass accumulation and reproductive development is faster, as in plants of PFT A and B compared with plants of PFT C, the decrease in digestibility occurs faster (Duru, 2008; Duru *et al.*, 2008). Our results show that the lower biomass accumulation of LP grassland and its lower maturation rate assessed by the constantly lower medium plant stage, explain its lower decrease in digestibility compared with EF and MF grasslands. The time course of the crude protein content in the three grasslands followed similar trends to digestibility with a slower decrease for the LP compared with the EF and MF grasslands.

The PFT classification of grasslands considers only grasses. Despite a different range of values, traits of forbs show a strong convergence with those of grasses (Ansquer *et al.*, 2009).

It can therefore be assumed that the associated forbs will show the same properties and the same functions in the grassland as the dominant PFT grasses. This seems to be confirmed by the results presented here, as the high proportion of forbs in LP grassland did not apparently change the biomass and digestibility dynamics that could be predicted from the properties of PFT C grasses. Also, the most abundant forb species in grassland MF was *Taraxacum officinale*, known for its high digestibility (Jeangros *et al.*, 2002), whereas the most abundant forb species in LP grassland was *Thymus serpyllum*.

The use of the sum of temperature as a predictive variable for the dynamics of biomass and quality during the first vegetation cycle is justified by the well-known relationship between sum of temperature and species phenology (De Montard, 1981). Our results confirm that it is possible to establish a relationship between sum of temperature and phenology at the grassland level. The fact that the relationship is linear validates the relevance of the scale we adapted from Moore *et al.* (1991) to express the phenological stages. The expression of digestibility as a function of sum of temperature was used by several authors to model digestibility (Groot and Lantinga, 2004; Jouven *et al.*, 2006a; Duru *et al.*, 2008). The elevation of temperature speeds up the increase in the proportion of structural tissues that occurs with the growth of the plant and the decrease in the digestibility of the tissues, both processes being involved in the decrease in digestibility with time. The effect of the sum of temperature was modelled using a simple linear relationship in the models developed by Jouven *et al.* (2006a) and by Duru *et al.* (2008) with the differentiation of vegetative and reproductive phases to take into account the acceleration of the decrease in digestibility with the development of reproductive tissues. However, the curvilinear relationships we obtained here tend to decelerate the decrease in digestibility with time. This may be explained by the differences in phenology between the numerous species that compose permanent grasslands. Linear decrease with time of *in vivo* digestibility was observed in diversified permanent grasslands (Andueza *et al.*, 2010).

The most accurate relationships during the first vegetation cycle were obtained for crude protein and for digestibility ( $R^2$  0.83 and 0.79). The RMSD value of 0.02 g.g<sup>-1</sup> for digestibility was similar to the value obtained with the mechanistic model of Jouven *et al.* (2006b). This value is also close to the precision of the *in vivo* measurement of digestibility (Demarquilly *et al.*, 1995). The accuracy of the relationship for dry matter yield was lower, with an  $R^2$  of 0.63 and an RMSD of 1.22 t DM.ha<sup>-1</sup>. This latter value was higher than the value obtained by Jouven *et al.* (2006b), which was only 0.48 t DM.ha<sup>-1</sup>. This may be explained by the fact that

climate effects are only partly taken into account; for example the rainfall was not introduced into the relationship.

#### *Contribution of second and third vegetation cycles*

Data on regrowth cycles are relatively scarce in the literature. For the second growth cycle the same ranking between grasslands was observed for dry matter yield as for the first vegetation cycle, but with lower biomass accumulation. Similarly, for the third cycle, a significantly higher biomass production was observed for the EF grassland. Thus the differences between grasslands dominated by nutrient capture strategy plants (PFT A, B and b) and grasslands dominated by nutrient conservation strategy plants (PFT C) remain consistent across successive growth cycles. However, the fact that to reproduce appropriate management according the type of grasslands, EF and MF but not LP grasslands received N fertilization before the second and the third cycles has to be taken into account to explain this result.

A significant evolution of the vegetation stages during regrowth cycles was only observed for the MF grassland during the second cycle. The evolution was still limited and mean plant stage did not exceed the elongation stage. Thus the decrease in digestibility was lower during the regrowth cycles than during the first cycle, as is well known for leafy swards. In these situations the diminution of digestibility is mainly due to the decrease in digestibility of the structural tissues with ageing (Groot *et al.*, 1999). The difference in digestibility between the grasslands during the regrowth cycles reflects the difference in digestibility between the PFT of grasses at a leafy stage as observed in the beginning of the first vegetation cycle. Thus the digestibility of grasslands dominated by grasses of PFT C remains lower during regrowth cycles than the digestibility of grasslands dominated by grasses of PFT A, B and b. The decrease in digestibility with time was similar for all three grasslands, at close to  $0.001 \text{ g.g}^{-1}$  per day. This value is in the same range as those reported for pure grasses by Demarquilly and Andrieu (1988).

In most cases, the relationships between biomass and quality variables, grassland type and time expressed by the days of regrowth were less accurate during the regrowth cycles than those obtained during the first vegetation cycle. This may be partly due to the lower amplitude of variation of the variables during the regrowth cycles, which increases the relative variability of the measurements. The most accurate relationships were obtained for dry matter yield during the second vegetation cycle ( $R^2 = 0.78$ ,  $\text{RMSD} = 0.54 \text{ t DM ha}^{-1}$ ) and for

digestibility ( $R^2 = 0.66$ ,  $\text{RMSD} = 0.023 \text{ g g}^{-1}$ ) during the third vegetation cycle. The accuracy of these relationships was close to that obtained with the model of Jouven *et al.* (2006b).

### *Seasonal yield of digestible dry matter and crude protein*

From the parameter estimates of the dynamics of DMY, OMD and CP, it is possible to simulate the yield of digestible dry matter (DMY\*OMD) and crude protein (DMY\*CP) that the three types of grassland would provide over the three vegetation cycles (Figure 30). The three types of grasslands show contrasting dynamics over the season, especially during the first vegetation cycle. EF and MF show a rapid accumulation of energy and protein in agreement with Pontes *et al.* (2007) for *Lolium perenne* and *Dactylis glomerata*, their dominant grasses. For these types of grassland the yield of energy reaches a plateau and the yield of protein tends to decrease after 1000 °C days, and there is no benefit for animal nutrition in harvesting them later. By contrast, the yield of energy and protein of LP grassland continues to increase to 1500 °C days consistent with the late phenology of type C species making up this grassland (Figure 30). In agreement with Duru *et al.* (2008) later use of this type of grassland is indicated.

In contrast to the first vegetation cycle, the pattern of energy and protein yield was similar for all three types of grasslands during the two regrowth cycles (Figure 30). However, the ranking of the grasslands differed between the second and third cycles. Although EF grassland was the most productive grassland for both cycles, MF grassland was close to EF during the second cycle, but with lower energy and protein productivity, and close to LP grassland during the third cycle.

## **Conclusion**

This study validates the effect of the functional composition of grassland on the seasonal dynamics of herbage biomass and quality. During the first vegetation cycle, grasslands in which dominant grasses belonged to PFT A, B and b were characterized by a rapid, high biomass accumulation and a high quality of herbage at the beginning of the cycle that then declined rapidly with the reproductive development. These time courses were consistent with the nutrient capture strategy of dominant species in these grasslands. By contrast, the grassland in which dominant grasses were of nutrient conservation strategy type, belonging to PFT C, was characterized by a slow biomass accumulation and a lower quality in the

beginning of the first vegetation cycle, but which declined slowly consistent with the later reproductive development. For the second and third growth cycles the same ranking of grasslands was observed for dry matter yield as for the first vegetation cycle, but with lower biomass accumulation. As there was almost no reproductive development during the regrowth cycles, the differences in digestibility were similar to those observed at the beginning of the first vegetation cycle, with constantly higher values for the grassland in which dominant grasses belonged to PFT A, B and b. Combining type of grassland with time-driven variables, sum of temperature for the first cycle and regrowth days for the subsequent vegetation cycles, provides quantitative models of grassland phenology and dynamics of herbage biomass and quality. These models, of high accuracy for the first vegetation cycle, can enable simulation of energy and protein production dynamics and so help to optimize strategies of grassland utilization.

### **Acknowledgements**

The authors thank Anne Farruggia, Philippe Pradel and the technical staff at INRA Marcenat for their help in designing and conducting this grassland experiment.

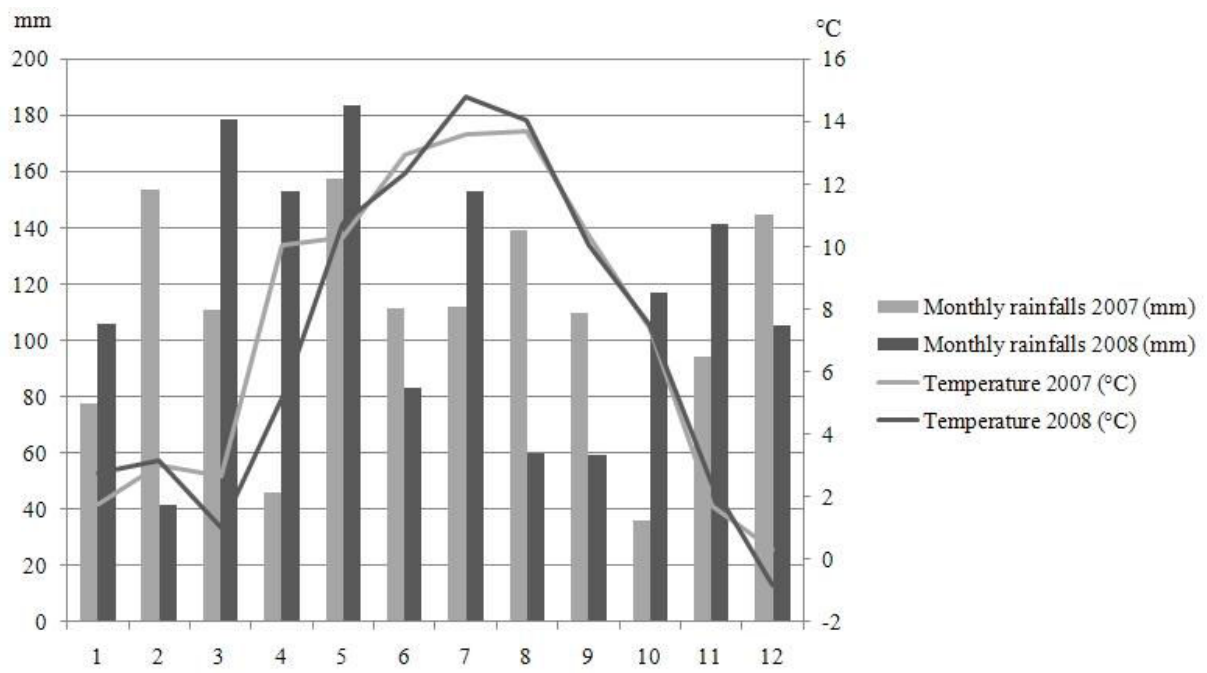


Figure 25. Monthly rainfall and mean temperature in Marcenat in years 2007 and 2008.

**Tableau 21. Definitions of the 13 plant stages used to characterize medium plant stage of the grasslands (adapted from Moore et al., 1991).**

Stage	Code	Description
Vegetative leaf development	1.5	
<i>Elongation-Stem elongation</i>		
Elongation (beginning)	2	First node palpable / visible
Elongation	2.5	Nodes palpable / visible
Elongation (end)	3	Boot stage
<i>Reproductive/Floral development</i>		
Inflorescence emergence	3.1	First spikelet visible
Inflorescence	3.3	Spikelets fully emerged / peduncle not emerged
Inflorescence emerged	3.5	Inflorescence emerged / peduncle fully elongated
Another emergence/anthesis	3.8	
<i>Seed development and ripening</i>		
Caryopsis visible	4	
Milk	4.1	
Dough	4.4	
Endosperm hard/physiological maturity	4.7	
Endosperm dry/seed ripe	4.9	

**Tableau 22. Botanical composition (proportion of dry matter, as % with “-“ for absence), plant functional types (PTF) of grasses, unknown and senescent material in EF (early phenology and fertile area) MF (medium phenology and fertile area) and LP (late phenology and poor area) grasslands. Values are averages for the three samples analysed in 2007.**

		EF	MF	LP	PTF	
Grasses	Agrostis sp.	2.0	0.5	11.4	b	
	Avenula pubescens (Huds.) Dumort.	-	-	3.0	.	
	Briza media L.	-	-	5.7	C	
	Bromus hordeaceus L.	5.4	5.3	0.0	E	
	Dactylis glomerata L.	8.2	33.4	0.3	B	
	Deschampsia flexuosa (L.) Trin.	-	-	2.5	C	
	Festuca arundinacea Schreb.	2.3	-	-	B	
	Festuca rubra L.	-	-	14.4	C	
	Holcus mollis L.	-	23.0	-	b	
	Lolium perenne L.	67.5	-	-	A	
	Phleum pratense L.	0.3	-	2.9	b	
	Poa pratensis L.	0.3	2.7	1.7	B	
	Poa trivialis L.	-	0.5	0.0	b	
	Legumes	Lathyrus vernus (L.) Bernh.	-	-	0.9	.
		Medicago lupulina L.	-	-	0.3	.
Trifolium pratense L.		1.2	6.1	0.0	.	
Trifolium repens L.		3.4	0.9	3.1	.	
Vicia sativa L.		0.1	-	2.0	.	
Forbs	Achillea millefolium L.	-	-	2.2	.	
	Ajuga reptans L.	-	-	2.2	.	
	Carex sp.	-	-	0.0	.	
	Cerastium arvense L.	-	-	0.5	.	
	Cerastium fontanum Baumg.	1.6	1.1	0.9	.	
	Conopodium majus (Gouan) Loret	-	-	2.4	.	
	Galium mollugo L.	-	-	0.7	.	
	Geranium dissectum L.	-	-	0.0	.	
	Hieracium pilosella subsp. Pilosella	-	-	1.7	.	
	Hieracium vulgatum Fr.	0.4	-	-	.	
	Leucanthemum vulgare Lam.	0.5	-	0.2	.	
	Meum athamanticum Jacq.	-	-	1.5	.	
	Plantago major L.	0.1	-	2.3	.	
	Rumex acetosella L.	-	-	5.2	.	
	Sanguisorba minor Scop.	-	-	7.0	.	
	Stellaria graminea L.	-	-	0.9	.	
	Stellaria media (L.) Vill.	0.0	0.7	-	.	
	Taraxacum officinale Weber	1.3	12.2	-	.	
	Thymus serpyllum L.	-	-	13.1	.	
	Viola tricolor L.	-	-	0.9	.	
Veronica chamaedrys L.	1.9	3.2	0.8	.		
Unknown material	1.1	3.5	6.6	.		
Senescent material	2.3	7.0	2.5	.		



**Tableau 23. Average values for the proportion of grasses, legumes and forbs, of senescent and unknown material and of plant functional type A (PFT A), B (PFT B), b (PFT b), C (PFT C) and E (PFT E) of the three grasslands, with ANOVA significance levels for the effect of grassland type (G).**

	Grasslands			G	SEM
	EF	EM	LP		
<b>Grasses</b>	0.86a	0.65b	0.42c	***	0.06
<b>Legumes</b>	0.05a	0.07a	0.06a	ns	0.04
<b>Forbs</b>	0.06b	0.17b	0.43a	***	0.04
<b>PFT A</b>	0.73a	0.05b	0.00b	***	0.03
<b>PFT B</b>	0.11b	0.36a	0.02b	*	0.09
<b>PFT b</b>	0.02a	0.24b	0.14a	*	0.06
<b>PFT C</b>	0.00b	0.00b	0.23a	**	0.03
<b>PFT E</b>	0.05a	0.05a	0.00a	ns	0.04
<b>Senescent material</b>	0.02a	0.07a	0.03a	**	0.01
<b>Unknown material</b>	0.01c	0.03b	0.07a	***	0.00

EF: early phenology and fertile area grassland; MF: medium phenology and fertile area grassland; LP: late phenology and poor area grassland

\*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ ; \*\*\*:  $P < 0.0001$ ; ns: not significant

Within a line, means without a common superscript letter differ ( $P < 0.05$ )

PFT A to PFT E values are expressed in % of total grasses

**Tableau 24. Least squares means ( $\pm$  SEM), significance of fixed effects and parameter estimates for the relationship of dry matter yield (DMY) ( $t\ DM\cdot ha^{-1}$ ), organic matter digestibility (OMD) ( $g\cdot g^{-1}$ ), crude protein concentration (CP) ( $g\cdot kg^{-1}$ ) and medium plant stage (MPS) with the sum of temperature for the three grassland types (G) during the first vegetation cycle.**

Item	DMY	OMD	CP	MPS
Least square means				
EF	5.02a	0.66a	102.74a	2.52a
MF	4.11a	0.64a	126.38b	2.56a
LP	2.42b	0.66a	122.38b	2.00b
SEM	0.27	$6.34\cdot 10^{-3}$	4.53	0.12
Significance of fixed effect				
G	***	***	***	***
ST	***	***	***	***
ST <sup>2</sup>	***	*	***	ns
GxST	ns	***	***	ns
GxST <sup>2</sup>	ns	ns	ns	ns
Fixed effects estimates				
EF	-1.45	0.87	291.44	1.79
MF	-2.35	0.88	343.11	1.82
LP	-4.05	0.80	292.83	1.26
ST	0.01	$-2.08\cdot 10^{-4}$	-0.29	$7.50\cdot 10^{-4}$
ST <sup>2</sup>	$-3.27\cdot 10^{-6}$	$6.00\cdot 10^{-8}$	$1.08\cdot 10^{-4}$	
STxEF		$-7.62\cdot 10^{-5}$	-0.02	
STxMF		$-1.01\cdot 10^{-4}$	-0.47	
STxLP		0.00	0.00	
$r^2$	0.63	0.79	0.83	0.51
RMSD	1.22	$2.26\cdot 10^{-2}$	15.01	0.35

EF: early phenology and fertile area grassland; MF: medium phenology and fertile area grassland; LP: late phenology and poor area grassland; ST: sum of temperatures; ST<sup>2</sup>: sum of temperature<sup>2</sup>; G: grassland type;  $r^2$ : coefficient of determination; RMSD: residual mean square deviation of the model; \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ ; \*\*\*:  $P < 0.0001$ ; ns: not significant; within a column, means without a common superscript letter differ ( $P < 0.05$ ).

**Tableau 25. Least squares means ( $\pm$  SEM), significance of fixed effects and parameter estimates for the relationship of dry matter yield (DMY) ( $\text{t DM}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), organic matter digestibility (OMD) ( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ), crude protein concentration (CP) ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) and medium plant stage (MPS) with the regrowth days for the three grassland types (G) during the second vegetation cycle.**

Item	DMY	OMD	CP	MPS
Least square means				
EF	2.92a	0.69a	106.75a	1.74a
MF	2.28b	0.69a	134.21b	1.99b
LP	1.53c	0.68a	141.35b	1.61a
SEM	0.08	$4.20\cdot 10^{-3}$	4.05	0.05
Significance of fixed effect				
G	**	***	***	***
RD	***	***	***	**
RD <sup>2</sup>	**	ns	***	ns
GxRD	***	ns	***	***
GxRD <sup>2</sup>	ns	ns	***	**
Fixed effects estimates				
EF	-1.04	0.76	259.21	1.60
MF	-1.20	0.76	301.07	0.88
LP	-0.70	0.75	134.56	1.66
RD	0.06	$-1.12\cdot 10^{-3}$	0.62	$-1.77\cdot 10^{-3}$
RD <sup>2</sup>	$-2.80\cdot 10^{-4}$		$-7.26\cdot 10^{-3}$	
RDxEF	0.03		-4.80	$2.55\cdot 10^{-3}$
RDxMF	0.02		-4.59	0.04
RDxLP	0.00		0.00	0.00
RD <sup>2</sup> xEF			0.03	$2.10\cdot 10^{-5}$
RD <sup>2</sup> xMF			0.03	$-2.30\cdot 10^{-4}$
RD <sup>2</sup> xLP			0.00	$1.50\cdot 10^{-5}$
$r^2$	0.78	0.36	0.85	0.51
RMSD	0.54	$3.39\cdot 10^{-2}$	12.85	0.18

EF: early phenology and fertile area grassland; MF: medium phenology and fertile area grassland; LP: late phenology and poor area grassland; ST: sum of temperatures; ST<sup>2</sup>: sum of temperature<sup>2</sup>; G: grassland type;  $r^2$ : coefficient of determination; RMSD: residual mean square deviation of the model; \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ ; \*\*\*:  $P < 0.0001$ ; ns: not significant; within a column, means without a common superscript letter differ ( $P < 0.05$ ).

**Tableau 26. Least squares means ( $\pm$  SEM), significance of fixed effects and parameter estimates for the relationship of dry matter yield (DMY) ( $\text{t DM}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), organic matter digestibility (OMD) ( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ), crude protein concentration (CP) ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) and medium plant stage (MPS) with the regrowth days for the three grassland types (G) during the third vegetation cycle.**

Item	DMY	OMD	CP	MPS
Least square means				
EF	1.13a	0.74a	138.55a	1.54a
MF	0.62b	0.71b	147.93b	1.53a
LP	0.59b	0.67c	138.96a	1.53a
SEM	0.08	$5.70\cdot 10^{-3}$	1.94	0.02
Significance of fixed effect				
G	***	***	***	***
RD	**	**	***	ns
RD <sup>2</sup>	**	ns	***	ns
GxRD	ns	ns	**	ns
GxRD <sup>2</sup>	ns	ns	**	ns
Fixed effects estimates				
EF	-0.88	0.79	291.26	1.54
MF	-1.38	0.75	226.94	1.53
LP	-1.41	0.72	175.67	1.53
RD	0.07	$-8.70\cdot 10^{-4}$	-0.78	
RD <sup>2</sup>	$-6.40\cdot 10^{-4}$		$1.59\cdot 10^{-3}$	
RDxEF			-4.49	
RDxMF			-1.60	
RDxLP			0.00	
RD <sup>2</sup> xEF			0.04	
RD <sup>2</sup> xMF			0.01	
RD <sup>2</sup> xLP			0	
$r^2$	0.24	0.66	0.50	0.01
RMSD	0.43	0.02	12.15	0.02

EF: early phenology and fertile area grassland; MF: medium phenology and fertile area grassland; LP: late phenology and poor area grassland; ST: sum of temperatures; ST<sup>2</sup>: sum of temperature<sup>2</sup>; G: grassland type;  $r^2$ : coefficient of determination; RMSD: residual mean square deviation of the model; \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ ; \*\*\*:  $P < 0.0001$ ; ns: no significance; within a column, means without a common superscript letter differ ( $P < 0.05$ ).

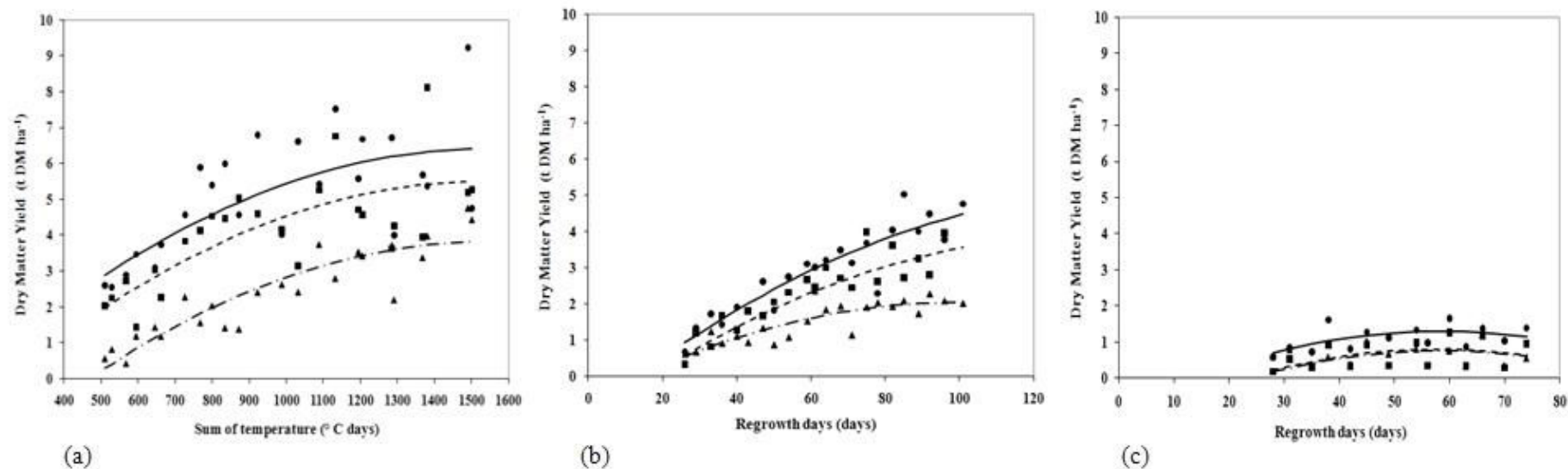


Figure 26. Measurements (EF ● (early phenology and fertile area grassland), MF ■ (medium phenology and fertile area grassland) and LP ▲ (late phenology and poor area grassland) and prediction (EF solid line, MF dashed line and LP dotted line) of dry matter yield for 2 years and respectively for first (a), second (b) and third (c) cycles.

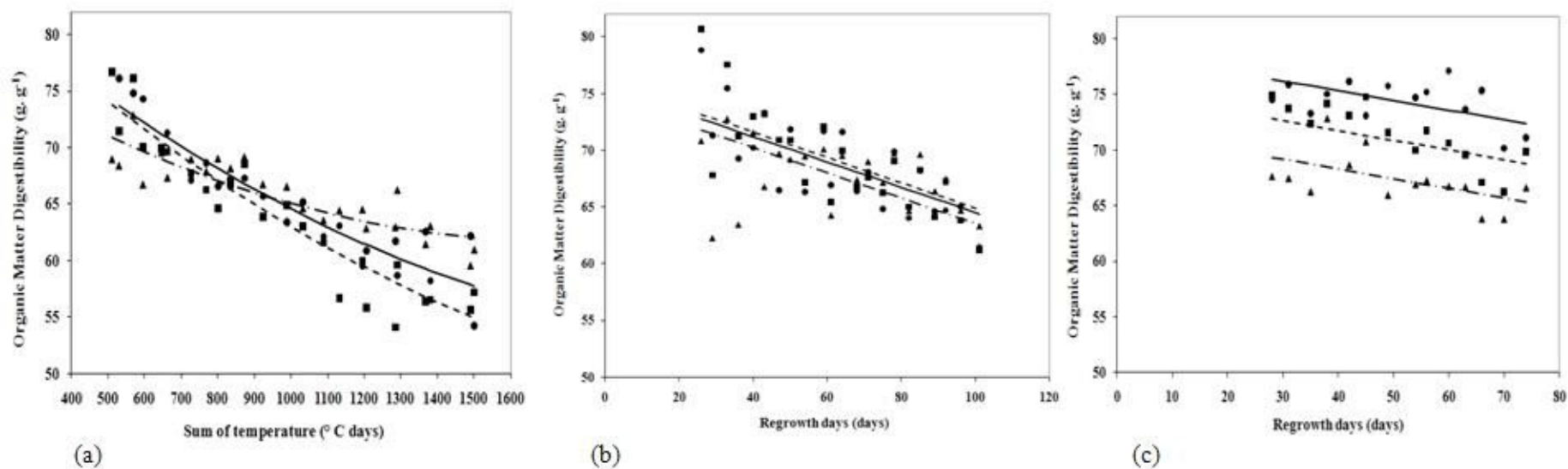


Figure 27. Measurements (EF ● (early phenology and fertile area grassland), MF ■ (medium phenology and fertile area grassland) and LP ▲ (late phenology and poor area grassland) and prediction (EF solid line, MF dashed line and LP dotted line) of organic matter digestibility for 2 years and respectively for first (a), second (b) and third (c) cycles.

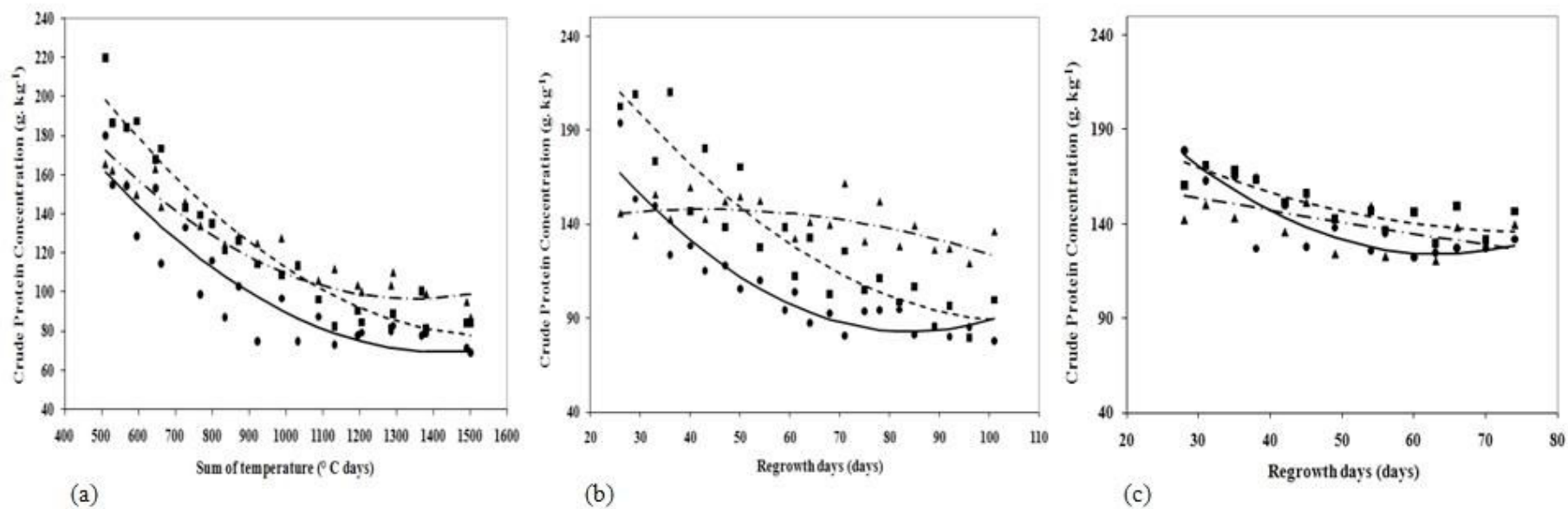


Figure 28. Measurements (EF ● (early phenology and fertile area grassland), MF ■ (medium phenology and fertile area grassland) and LP ▲ (late phenology and poor area grassland) and prediction (EF solid line, MF dashed line and LP dotted line) of crude protein content for 2 years and respectively for first (a), second (b) and third (c) cycles.

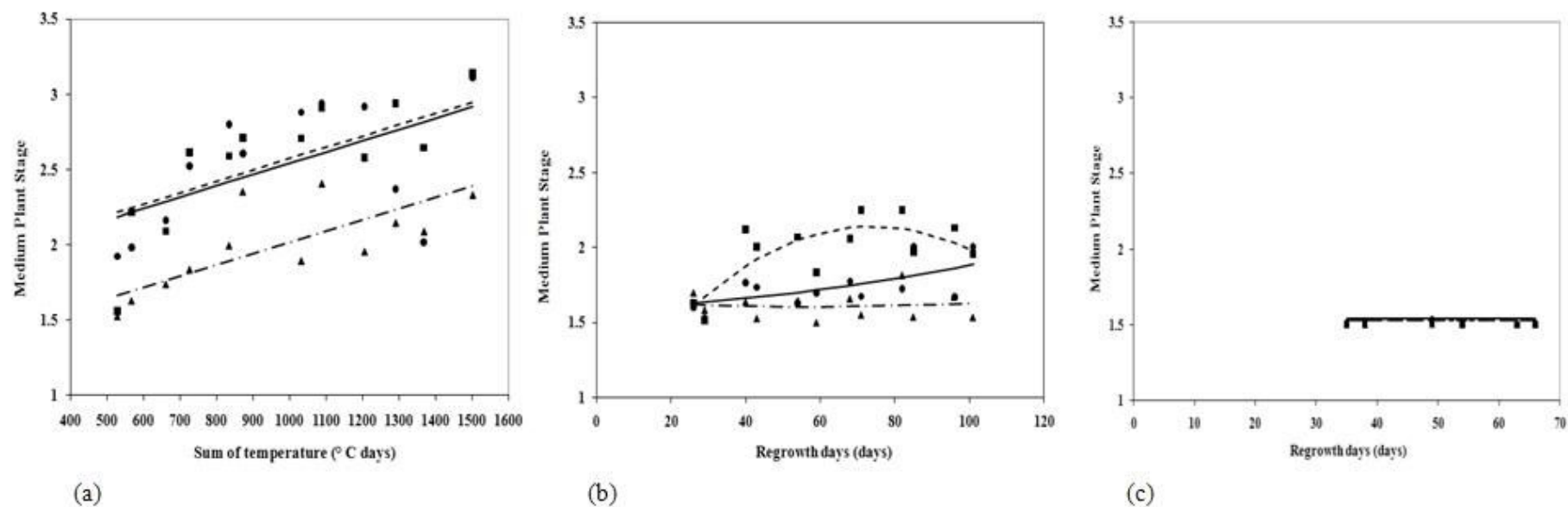


Figure 29. Measurements (EF ● (early phenology and fertile area grassland), MF ■ (medium phenology and fertile area grassland) and LP ▲ (late phenology and poor area grassland) and prediction (EF solid line, MF dashed line and LP dotted line) of medium plant stage for 2 years and respectively for first (a), second (b) and third (c) cycles.



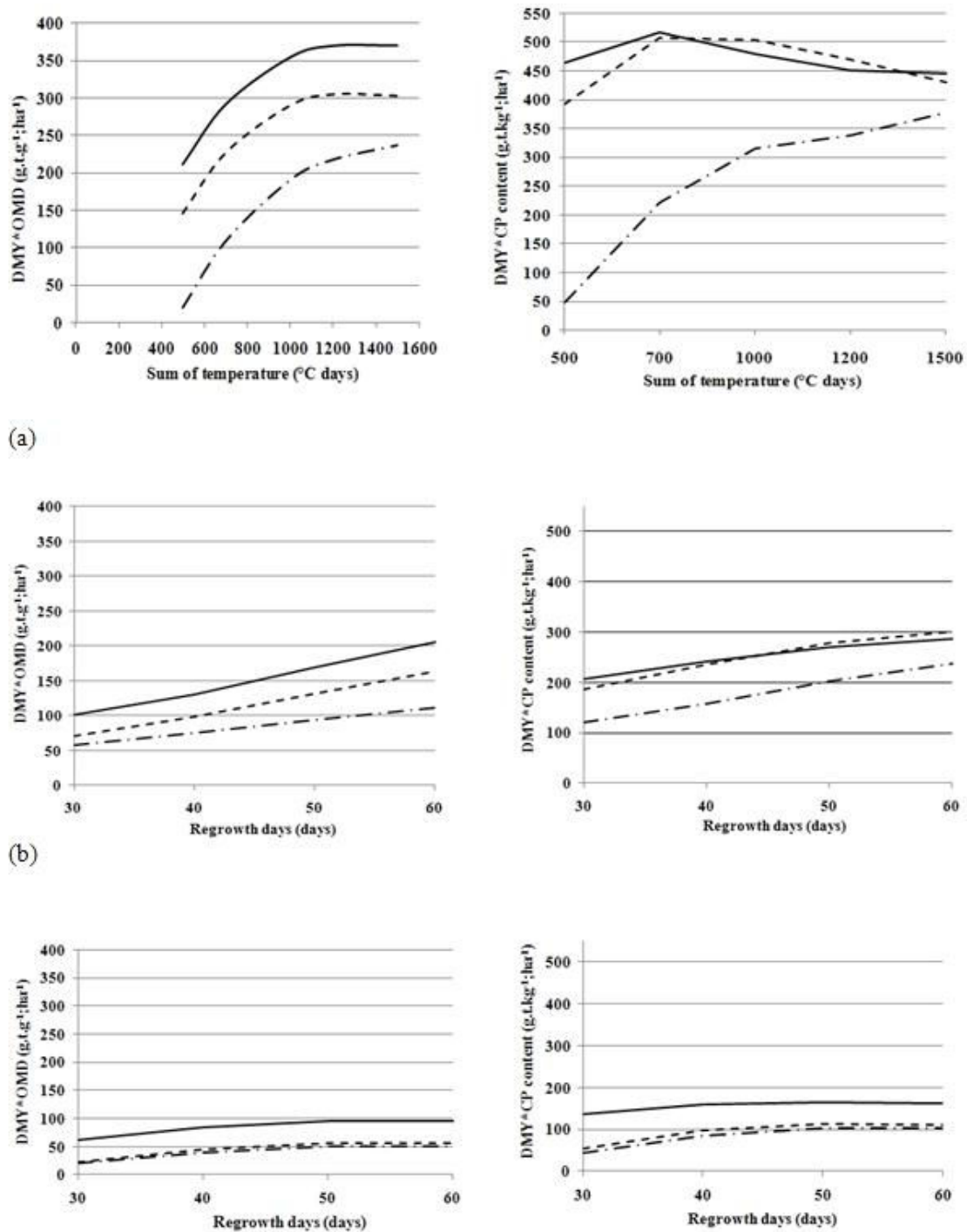


Figure 30. Prediction (EF solid line (early phenology and fertile area grassland), MF dashed line (medium phenology and fertile area grassland) and LP dotted line (late phenology and poor area grassland)) of yield of digestible dry matter (OMD\*DMY) and yield of crude protein (CP content\*DMY) for first (a), second (b) and third cycle (c).

## References

- ANUDEZA D., CRUZ P., FARRUGGIA A., BAUMONT R., PICARD F. and the late of MICHALET-DOREAU B. (2010) Nutritive value of two meadows and relationships with some vegetation traits. *Grass and Forage Science*, **65**, 325-334.
- ANSQUER P., DURU M., THEAU J.-P. and CRUZ P. (2009) Convergence in plant traits between species within grassland communities simplifies their monitoring. *Ecological Indicators*, **9**, 1020-1029.
- AUFRERE J. and DEMARQUILLY C. (1989) Predicting organic matter digestibility of forage by two pepsin-cellulase methods. *Proceedings of the 16th International Grassland Congress, Nice, France*, **2**, pp. 877-878.
- BAUMONT R., AUFRERE J., NIDERKORN V., ANDUEZA D., SURAULT F., PECCATTE J.R., DELABY L. and PELLETIER P. (2008) Specific diversity in forages: its consequences on the feeding value. *Fourrages*, **194**, 189-206.
- BEREKOUTOU M. (1986) Influence de quelques facteurs climatiques sur le développement, la composition et la valeur nutritive de deux graminées en activités. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, Montpellier, pp. 1-130.
- BLACKSTOCK T.H., RIMES C.A., STEVENS D.P., JEFFERSON R.G., ROBERTSON H.J., MACKINTOSH J. and HOPKINS J.J. (1999) The extent of semi-natural grassland communities in lowland England and Wales: a review of conservation surveys 1989-1996. *Grass and Forage Science*, **54**, 1-18.
- BRUINENBERG M.H., VALK H.H., KOREVAAR H. and STUIK P.C. (2002) Factors affecting digestibility of temperate forages from semi-natural grassland. *Grass and Forage Science*, **57**, 292-301.
- BUXTON D.R. (1996) Quality-related characteristics of forages as influenced by plant environment and agronomic factors. *Animal Feed Science and Technology*, **59**, 37-49.
- COP J., VIDRIH M. and HACIN J. (2009) Influence of cutting regime and fertilizer application on the botanical composition, yield and nutritive value of herbage of wet grasslands in Central Europe. *Grass and Forage Science*, **64**, 454-465.
- CRUZ P., DURU M., THEROND O., THEAU J.-P., DUCOURTIEUX C., JOUANY C., AL HAJ KHALED R. and ANSQUER P. (2002) Une nouvelle approche pour caractériser les prairies naturelles et leur valeur d'usage. [A new approach to the characterization of natural grasslands and their use value]. *Fourrages*, **172**, 335-354.
- CRUZ P., THEAU J.-P., LECLOUX E., JOUANY C. and DURU M. (2010) Typologie fonctionnelle de graminées fourragères pérennes: une classification multitraits. [Functional typology of perennial forage grasses: a classification based on several characteristics]. *Fourrages*, **201**, 11-17.
- DE MONTARD F. (1981) L'action des facteurs climatiques sur la croissance de l'herbe. [Effect of climatic factors on grass growth]. *Fourrages*, **85**, 39-52.
- DEMARQUILLY C. and JARRIGE R. (1981) Panorama des méthodes de prévision de la digestibilité et de la valeur énergétique des fourrages. [Panorama of methods of prediction of digestibility and energy value of ofdder]. In: INRA Publ (ed) *Prévision de la valeur nutritive des aliments des ruminants*. pp. 41-59.
- DEMARQUILLY C. et ANDRIEU J. (1988). Les fourrages. In : *Alimentation des bovins, ovins et caprins*, pp. 315-337. France : INRA.
- DEMARQUILLY C., CHENOST M. and GIGER S. (1995) Pertes fécales et digestibilité des aliments et des rations. In: Jarrige R., Ruckebusch Y., Demarquilly C., Farce M.H. and Journet M. (eds) *Nutrition des ruminants domestiques*, pp. 601-647. Paris: INRA Editions.

- DURU M., BALENT G., GIBON A., MAGDA D., THEAU J.-P., CRUZ P. and JOUANY C. (1998) Fonctionnement et dynamique des prairies permanentes. Exemple des Pyrénées Centrales. [Ecology and dynamics of permanent pastures. An example from the central Pyrenees]. *Fourrages*, **153**, 97-113.
- DURU M., CRUZ P., AL HAJ KHALED R., DUCOURTIEUX C. and THEAU J.-P. (2008) Relevance of plant functional types based on leaf dry matter content for assessing digestibility of native grass species and species-rich grassland communities in spring. *Agronomy Journal*, **100**, 1622-1630.
- DURU M. (2008) Improvement of Time-Driven Models of Lamina Cocksfoot Digestibility by a Process-Based Model to Take Account of Plant N Nutrition and Defoliation. *J. Agronomy and Crop Science*, **194**, 401-412.
- FICK G.W., WILKENS P.W. and CHERNEY J.H. (1994) Modeling forage quality changes in the growing crop. In: Fahey C.G. (ed) *Forage Quality, Evaluation and Utilization*. pp. 757-795. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy Inc., Crop Science Society of America Inc. and Soil Science Society America Inc.
- GROOT J.C.J., NEUTEBOOM J.H. and DEINUM B. (1999) Composition and digestibility during ageing of consecutive leaves on the main stem of Italian ryegrass plants, growing undisturbed or regrowing after cutting. *Journal of Science of Food and Agriculture*, **79** (12), 1691-1697.
- GROOT J.C.J. and LANTINGA E.A. (2004) An object-oriented model of the morphological development and digestibility of perennial ryegrass. *Ecological Modelling*, **177**, 297-312.
- HOPKINS A. and HOLZ B. (2006) Grassland for agriculture and nature conservation: production, quality and multi-functionality. *Agronomy research*, **4**, 3-20.
- HUYGHE C. (2008) Plant diversity in grasslands and feed quality. *Biodiversity and Animal Feed. Future challenges for grass production. EGF, Uppsala, Sweden*, **13**, pp. 375-386.
- JEANGROS B. and SCHMID W. (1991) Production et valeur nutritive des prairies permanentes riches en espèces. [Productivity and nutritive value of species-rich permanent pasture]. *Fourrages*, **126**, 131-136.
- JEANGROS B., SCHUBIGER F.X., DACCORD R., ARRIGO Y., SCEHOVIC J. and LEHMANN J. (2002) Digestibility of selected grassland plant species. Multi-Function Grasslands: quality forages, Animal Products and Landscapes. *Multi-function grasslands: quality forages, animal products and landscapes. Proceedings of the 19th General Meeting of the European Grassland Federation, La Rochelle, France*, pp. 128-129.
- JOUVEN M., CARRÈRE P. and BAUMONT R. (2006a) Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage in managed permanent pastures. 1. Model description. *Grass and Forage Science*, **61**, 112-124.
- JOUVEN M., CARRÈRE P. and BAUMONT R. (2006b) Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage in managed permanent pastures. 2. Model evaluation. *Grass and Forage Science*, **61**, 125-133.
- LOUAULT F., PILLAR V.D., AUFRERE J., GARNIER E. and SOUSSANA J.-F. (2005) Plant traits and functional types in response to reduced disturbance in a semi-natural grassland. *Journal of vegetation*, **16**, 151-160.
- MOORE K.J., MOSER L.E., VOGEL K.P., WALLER S.S, JOHNSON B.E. and FEDERSEN J.F. (1991) Describing and quantifying growth stages of perennial forage grasses. *Agron*, **83**, 1073-1077.
- NIQUEUX M. and ARNAUD R. (1981) Peut-on prévoir la date d'épiaison des variétés de graminées? [Is it possible to forecast date of inflorescence for grasses varieties?] *Fourrages*, **88**, 39-56.
- PONTES L., SOUSSANA J., LOUAULT F., ANDUEZA D. and CARRERE P. (2007) Leaf traits affect the above-ground productivity and quality of pasture grasses. *Functional Ecology*, **21**, 844-853.

- RAWNSLEY R.P., DONAGHY D.J., FULKERSON W.J. and LANE P.A. (2002) Changes in the physiology and feed quality of cocksfoot (*Dactylis glomerata* L.) during regrowth. *Grass and Forage Science*, **57**, 203-211.
- RYSER P. (1996) The importance of tissue density for growth and life span of leaves and roots: A comparison of five ecologically contrasting grasses. *Functional Ecology*, **10**, 717-723.
- SCHAUMBERGER A., TRNKA M., EITZINGER J., FORMAYER H., BUCHGRABER K. and RESCH R. (2009) An enhanced approach for estimating grassland yield potential under various cutting regimes. *Alternative functions of grassland. Proceedings of the 15th European Grassland Federation Symposium, Brno, Czech Republic, 7-9 September 2009*, pp. 444-447.
- SHENK J.S. and WESTERHAUS M.O. (1991) New Standardization and Calibration Procedures for Nirs Analytical Systems. *Crop Science*, **31**, 1694-1696.
- SCHUT A., GHERARDI S. and WOOD D. (2010) Empirical models to quantify the nutritive characteristics of annual pastures in south-west Western Australia. *Crop & Pasture Science*, **61**, 32-43.
- TALLOWIN J.R.B. and JEFFERSON R.G. (1999) Hay production from lowland semi-natural grasslands: a review of implications for ruminant livestock systems. *Grass and Forage Science*, **54**, 99-115.
- TODOROVA P. and KIRILOV A. (2002) Changes in the permanent grassland composition and feeding value during the growing season. Multi-Function Grasslands. quality forages, Animal Products and Landscapes. *Multi-function grasslands: quality forages, animal products and landscapes. Proceedings of the 19th General Meeting of the European Grassland Federation, La Rochelle, France*, pp. 27-3.

2. Dans quelle mesure la composition fonctionnelle permet-elle de prédire la production et la valeur nutritive des prairies permanentes ? Etude sur un réseau national (projet d'article)

**Cette partie fait l'objet d'un projet d'article.** Elle est donc rédigée sous forme d'un article scientifique.

## Introduction

Les services fourragers et environnementaux des prairies permanentes sont aujourd'hui reconnus (Ph. Fleury 1994 ; Hopkins et Holtz 2006). En effet, ces surfaces ont non seulement un rôle dans l'alimentation animale mais aussi dans le maintien de la diversité des espèces, dans la séquestration du carbone ou dans le paysage (Soussana et Lüscher 2007 ; Leroux *et al.* 2008). Cependant les valeurs alimentaires des prairies permanentes, d'un point de vue quantitatif et qualitatif, restent peu précises (Tallowin et Jefferson 1999 ; Bruinenberg *et al.* 2002) : elles sont ainsi délaissées au profit de productions plus rentables. Il est donc important de caractériser les valeurs fourragères des prairies permanentes pour promouvoir leur utilisation dans les systèmes fourragers.

Les prairies permanentes sont des surfaces complexes, composées de graminées, légumineuses et autres plantes (diverses) qui présentent des phénologies et caractéristiques différentes. Leur caractérisation fourragère, que ce soit qualitativement (valeur nutritive) ou quantitativement (production) reste donc difficile à établir. Leurs productions à la première coupe s'étalent entre 2 et 5 t de MS/ha (Jeangros et Schmid 1991) et les productions annuelles peuvent s'étaler de 1 à 8.31 t MS/ha (Nerusil *et al.* 2008 ; Stybnarova *et al.* 2010). La digestibilité (dMO) des prairies permanentes est d'environ 83% au début du premier cycle (Demarquilly et Andrieu 1988) et chute entre 58 et 79% à la date de première coupe (Daccord *et al.* 2006 ; INRA 2007 ; Rodrigues *et al.* 2007). La valeur nutritive et la production constituent des critères d'aptitude des services fourragers. Ces deux critères sont liés à la composition botanique (Jeangros et Schmid 1991 ; Baumont *et al.* 2008) et à la composition fonctionnelle (Andueza *et al.* 2010 ; Duru *et al.* 2010a). La composition fonctionnelle traduit les caractéristiques fonctionnelles des plantes à partir de leurs traits de vie, sans qu'elles ne présentent forcément de lien de parenté taxonomique (Duru *et al.* 2007). La teneur en matière sèche des limbes (TMS), la durée de vie de feuilles (DVF), la surface spécifique foliaire (SSF) ou encore la date de floraison constituent des traits de vie, qui sont des caractéristiques

morphologiques, physiologiques et phénologiques de l'individu (de la cellule à l'organisme) (Violle *et al.* 2007). Une classification des graminées prairiales en types fonctionnels (TF), basée sur ces traits de vie, a été construite. Cette classification est orientée selon les stratégies des plantes vis à vis de la ressource : stratégies de capture ou de conservation de la ressource (Cruz *et al.* 2002 ; Louault *et al.* 2005 ; Cruz *et al.* 2010). Les espèces à stratégie de capture de la ressource croient sur des milieux riches en nutriments et présentent une défoliation fréquente (ex : *Lolium perenne*). Elles sont caractérisées par une SSF élevée et une TMS faible, favorisant une repousse rapide après défoliation. A l'inverse, les espèces à stratégie de conservation de la ressource sont adaptées à des milieux peu fertiles et à une défoliation peu fréquente (ex : *Festuca rubra*). Ces espèces ont une SSF faible et une TMS élevée. Cette classification des espèces repose uniquement sur les graminées qui sont très présentes dans les prairies permanentes. Cependant, les légumineuses et diverses peuvent parfois atteindre plus de la moitié de la biomasse. Des études entre les graminées et dicotylédones ont montré une convergence entre des traits de vie des graminées et certaines dicotylédones comme les rosettes, excepté pour la TMS (Ansquer *et al.* 2009 ; Duru *et al.* 2010a). Cette classification est également associée à un gradient de production et de qualité (Pontes *et al.* 2007 ; Duru *et al.* 2010a). Actuellement cette classification des graminées est composée de six TF (Cruz *et al.* 2010) les TF A, B, C, D et b.

A l'échelle de la communauté végétale que constitue une prairie, plusieurs auteurs ont proposé d'utiliser la composition de la prairie en TF pour caractériser ses propriétés agronomiques. Ainsi Duru *et al.* (2010b) proposent de calculer des indices de productivité, de qualité et de souplesse d'utilisation de la prairie à partir de la composition fonctionnelle pondérée de coefficients estimés à partir des traits de vie moyens de ces différents types. Jouven *et al.* (2006) ont également utilisé les traits de vie moyens des TF pour prévoir à partir de la composition en TF d'une prairie sa production et sa qualité dans un modèle de simulation dynamique. Ces approches reposent sur une hypothèse d'additivité des traits de vie et du fonctionnement des espèces à l'échelle de la communauté prairiale.

Dans cette étude, en nous appuyant sur les données obtenues sur un réseau de prairies couvrant un large gradient de conditions de milieu et de pratiques, nous avons donc voulu tester dans quelle mesure la qualité et la production d'une prairie peuvent être expliquées par la composition en TF de graminées et en familles botaniques. Ceci constitue notre première hypothèse de travail ( $H_1$ ). Dans cette approche nous avons également pris en compte les proportions de légumineuses et de diverses car les résultats sur les liens entre types

fonctionnels et dicotylédones sont encore incomplets (Ansquer *et al.* 2009 ; Duru *et al.* 2010a) ;

Dans une deuxième approche, nous avons recherché des états de la végétation mesurés directement à l'échelle de la communauté pouvant être explicatifs de la production et de la qualité de la prairie. Notre choix s'est porté sur le stade moyen de végétation et sur la teneur en MS. En effet la TMS des limbes et la phénologie sont les deux traits de vie majeurs qui sous-tendent la classification fonctionnelle proposée par Cruz *et al.* (2010). Des liens entre TMS, DVF et SSF ont été démontrés (Roche *et al.* 2004; Al Haj Khaled *et al.* 2005; Ansquer 2006 ; Duru *et al.* 2007 ; McIntyre 2008) et le stade végétation est le principal facteur de variation de la valeur nutritive des plantes au cours d'un cycle de développement. Nous faisons l'hypothèse que, mesurés à l'échelle de la prairie, la teneur en MS et le stade moyen de végétation traduisent d'une part les propriétés intrinsèques des plantes et leur réponse aux facteurs de milieu et de pratiques. Notre deuxième hypothèse de travail (**H<sub>2</sub>**) a donc pour objet d'évaluer dans quelles mesures la production et la qualité d'une prairie peuvent être expliquées par la teneur de MS et le stade moyen de végétation de la biomasse.

Dans une troisième approche nous avons voulu tester la capacité de l'ensemble de ces états de la végétation à prévoir la production et la qualité des prairies. Pour cela nous avons combiné l'ensemble des variables testées dans les hypothèses H<sub>1</sub> et H<sub>2</sub> afin d'évaluer dans quelle mesure elles sont redondantes ou peuvent améliorer les modèles de prévision (**H<sub>3</sub>**). Afin de tester ces hypothèses, nous travaillerons sur un dispositif national de 190 parcelles, à différentes périodes de l'année et sur plusieurs cycles de végétation. L'objectif ici est de quantifier ces phénomènes sur un large gradient de parcelles et pour plusieurs cycles de végétation.

## Matériels et méthodes

### Description de l'échantillon

Un échantillon de 190 parcelles a été sélectionné, selon un gradient de pratiques et leur localisation géographique, parmi 1500 parcelles recensées dans le cadre d'enquêtes réalisées en 2008 sur 78 exploitations agricoles (Michaud *et al.*, 2011, chapitre 3). Ce réseau de parcelles couvre la plupart des types de prairies françaises ; il couvre un gradient climatique large (depuis les conditions atlantiques jusqu'aux conditions montagnardes) et inclut des altitudes allant du niveau de la mer à 2000 mètres d'altitude. Ce gradient pédoclimatique est croisé avec un gradient de gestion des prairies, caractérisé par la diversité des systèmes

d'exploitation enquêtés (bovin lait ou viande et ovin lait ou viande) et les pratiques de gestion (type et nombre d'utilisations, type d'animal et chargement, type et quantité de fertilisation). Les prairies étudiées ont été subdivisées en trois catégories : celles uniquement pâturées (43%), celles uniquement fauchées (11%) et celles utilisées en usage mixte (46%).

### **Collecte des données**

Sur chaque parcelle étudiée, des données concernant la composition botanique, la production et la valeur nutritive ont été collectées. Pour cela, trois mises en défens ont été mises en place sur le faciès dominant de la parcelle, où quatre prélèvements par an ont été effectués : deux au printemps (début de printemps ( $P_1$ ) et fin de printemps ( $P_2$ )), un en été ( $P_3$ ) et un en automne ( $P_4$ ). Les parcelles ont été suivies durant deux années. Sur chaque parcelle et à chaque prélèvement, deux échantillons ont été récoltés : un échantillon pour l'étude de la composition botanique et fonctionnelle et un échantillon pour l'étude de la production et valeur nutritive. Ces prélèvements ont été effectués par des techniciens de terrain. Les prélèvements de printemps ont été effectués selon des sommes de température (ST), considérées comme une variable de temps. La ST est calculée à partir du cumul des moyennes minimales et maximales des températures journalières (bornée entre 0 et 18 °C). Les températures sont sommées à partir du 1<sup>er</sup> février (Theau et Zérourou 2008). Nous avons effectué le premier prélèvement à une ST entre 500 et 600°C jours, correspondant à une exploitation de printemps et le second entre 1100-1200°C jours, correspondant à un potentiel de production en fin de premier cycle de végétation (fauche tardive).

#### *Mesure de la composition botanique et fonctionnelle*

Sur chaque échantillon récolté pour l'étude de la composition botanique et fonctionnelle, une estimation visuelle de la proportion (en pourcentage) de graminées, légumineuses et autres diverses a été effectuée pour les quatre prélèvements. Cette estimation a été faite en tenant compte du volume des espèces sur pied. Pour les prélèvements de printemps ( $P_1$  et  $P_2$ ), des mesures complémentaires de stade de végétation et d'identification des espèces de graminées, pour les classer selon les TF ont été effectuées. Pour cela, 40 talles de graminées ont été prélevées au hasard dans l'échantillon. Ces 40 talles ont été réparties selon leurs stades de développement (Tableau 5, chapitre 2), organisés en 13 classes (Moore *et al.* 1991). Pour chaque stade de développement, l'ensemble des plantes a été identifié (espèces) et classé selon leur appartenance aux TF (Figure 19, chapitre 2) (Cruz *et al.* 2010). De plus, le stade



moyen des plantes a été calculé selon la formule ci-dessous, afin d'évaluer le stade moyen de la parcelle.

$$MPS = \frac{\sum_{i=1}^{13} (C_i N_i)}{N} \quad MPS \text{ (Medium Plant Stage)}$$

avec  $C_i$ , la note correspondant au stade de développement  $i$  défini dans le tableau 1;  $N_i$  le nombre de plants au stade  $i$ ;  $N$  le nombre total de plants.

Le calcul du stade moyen a été effectué en  $P_1$  en considérant l'ensemble des talles y compris les talles végétatives. En  $P_2$  deux calculs ont été effectués : avec et sans les talles végétatives. Le calcul du stade moyen sans les talles végétatives permet de mieux qualifier la part de talles en reproduction.

#### *Mesure de la teneur en MS et de la production de l'herbe*

Les données de teneur en MS ont été récoltées à partir de l'échantillon destiné à l'étude de la valeur nutritive. A chaque prélèvement, celui-ci a été pesé en vert puis séché à l'étuve à 60°C durant 72h. Son poids sec a ensuite été déterminé, ce qui a permis de calculer la teneur en MS dans l'échantillon récolté. Celle-ci est considérée comme un état de la végétation. La production de la parcelle (en tonne (t) de MS/ha) a été calculée à chaque prélèvement, à partir de la mesure de la MS, du poids de l'herbe récoltée sur les surfaces coupées et de la surface de coupe. La hauteur de coupe de l'herbe était de 5 cm. Afin d'homogénéiser les données de hauteur de coupe, la production d'herbe a été corrigée à une hauteur 5 cm pour les prélèvements  $P_1$ ,  $P_3$  et  $P_4$ . Pour cela, elle a été corrigée par la hauteur d'herbe coupée ainsi que la différence entre la hauteur de coupe et la hauteur de 5 cm. Les hauteurs d'herbe ont été mesurées avec un herbomètre à plateau. La production  $P_2$  n'a pas subi de correction car les mesures de hauteurs d'herbe n'étaient pas fiables du fait de la hauteur importante de l'herbe à ce prélèvement. La production annuelle a été mesurée par la somme des mesures de  $P_2$ ,  $P_3$  et  $P_4$ ,  $P_1$  étant inclus dans  $P_2$ .

#### *Mesure de la valeur nutritive de l'herbe*

Les mesures de valeur nutritive ont été effectuées à chaque prélèvement, à partir de l'échantillon utilisé pour l'estimation de la MS. Les échantillons secs ont été broyés à l'aide d'un broyeur à marteau, avec une grille de 1mm, puis saisis en Spectrométrie Proche Infra Rouge (SPIR) pour estimer la valeur nutritive de l'herbe : 1221 échantillons ont été saisis, en

tenant compte des quatre prélèvements par an. L'analyse en SPIR a permis d'estimer la teneur en matière azotée totale (MAT) et la dMO des échantillons. Les spectres infra rouges ont été collectés avec un appareil scannant les spectres entre 400–2500 nm (FOSS-NIRSystems 6500, Silver Spring, MD, USA). Tous les spectres et données de référence ont été enregistrés avec le logiciel WINISI, version 1.6 (Infrasoft International, Port Matilda, PA, USA). Des analyses chimiques ont permis de mesurer les valeurs des échantillons ne pouvant pas être prévus par la SPIR et de valider les équations de calibration utilisées pour prévoir l'ensemble des échantillons (Shenk et Westerhaus 1991): 207 échantillons ont été sélectionnés de la population totale de spectres. Les analyses de concentration en protéines ont été effectuées selon la méthode Dumas (Buckee 1994) et celles de digestibilité par la méthode enzymatique pepsine-cellulase (Aufrère et Demarquilly 1989). Les paramètres de calibration des modèles obtenus pour la teneur en MAT et la digestibilité pepsine-cellulase sont résumés dans le tableau 27.

Les évolutions de dMO et MAT ont été calculées au printemps par la différence entre les valeurs de  $P_2$  et  $P_1$ , en fonction des deux dates de prélèvements exprimées en ST.

**Tableau 27. Caractéristiques statistiques des équations de calibration en spectrométrie dans le proche infra-rouge utilisées pour estimer la digestibilité à la pepsine-cellulase (dcell) et la concentration en protéines (% N).**

Constituent	Type	N	SEC	RSQ	SECV	1-VR
dcell(%)	1	496	2.12	0.98	2.35	0.97
% N	1	478	0.07	0.99	0.08	0.99

N : nombre d'échantillons dans l'équation ; SEC : erreur standard ; RSQ : valeur du  $R^2$  de la validation croisée ; SECV : erreur standard de la validation croisée ; 1-VR : valeur du  $R^2$  de la validation.

### Analyses de données

Les traitements statistiques ont été effectués par prélèvement ( $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  et  $P_4$ ). Nous avons considéré la production à chaque prélèvement, la production annuelle calculée à partir de  $P_2$ ,  $P_3$  et  $P_4$  et la croissance d'herbe entre  $P_1$  et  $P_2$ . Pour la qualité, nous avons considéré la dMO et la MAT, mesurées à chaque prélèvement ainsi que leurs évolutions entre les deux périodes de printemps. A chaque prélèvement, l'indépendance des variables de composition fonctionnelle a été vérifiée par la réalisation d'une analyse en correspondance multiples (ACP) sur le logiciel SPAD. Les variables corrélées ont été retirées. Au premier et deuxième prélèvement, les variables de végétation comprennent la proportion de graminées,

légumineuses et diverses, la proportion de TF, l'estimation du stade moyen de la prairie et la teneur en MS. Au troisième et quatrième prélèvement, l'estimation du stade moyen et la proportion de TF n'ont pas été mesurés. Nous avons cependant pris en compte la proportion de TF mesurés en P<sub>1</sub> pour évaluer les modèles de prédiction de production et qualité de la prairie en P<sub>3</sub> et P<sub>4</sub> pour H<sub>1</sub>. En effet, les mesures effectuées en P<sub>1</sub> correspondent à des débuts de pousses d'herbe, comme P<sub>3</sub> et P<sub>4</sub>. Dans les modèles de prédiction, nous avons travaillé sur le stade moyen calculé avec les talles végétatives en P<sub>1</sub> et sans les talles végétatives en P<sub>2</sub>. Au premier et deuxième prélèvement, la ST a été introduite comme une co-variable permettant de minimiser l'effet de la date de prélèvement. L'ensemble des analyses a été réalisé sous la procédure GLM du logiciel SAS, version 9.2. Dans chaque analyse, l'effet année est considéré ainsi que ses interactions avec les autres variables quantitatives.

## Résultats

### Description des données

#### *Critères d'aptitude*

Les variables de production et de qualité étudiées présentent une grande variabilité sur les deux années de suivi. En effet, les données de biomasses sont très variables en P<sub>1</sub> (de 0 à 7.2 t de MS) et de façon plus importante en P<sub>2</sub> (de 0.5 à 12.3 t de MS) (Tableau 28). Les mesures de production en P<sub>1</sub> ont été effectuées en moyenne à 562 °C jours, avec une variation entre 401 et 920 °C jours. En P<sub>2</sub>, les prélèvements ont été effectués en moyenne à 1191°C jours avec une variation entre 799 et 1570 °C jours (Tableau 28). Les productions d'été et d'automne sont beaucoup plus faibles (Tableau 28). Les dates de prélèvement en été et automne ont été effectués en moyenne à 47 jours de repousses en P<sub>3</sub>, avec un minimum de 20j et un maximum de 80 jours de repousse et à 55 jours de repousse en moyenne en P<sub>4</sub>, avec un minimum de 20 jours et un maximum de 96 jours de repousse (Tableau 28). La production annuelle montre donc également des variations importantes, avec une moyenne de 6.2 t MS/ha. (Tableau 28).

Les valeurs de dMO et MAT présentent des variations importantes durant les deux années de suivi. Les valeurs de dMO sont en moyenne de 77.1% en P<sub>1</sub>, 64.4% en P<sub>2</sub> et sont plus proches en P<sub>3</sub> et P<sub>4</sub>, aux environ de 71-72 % (Tableau 28). Les valeurs de MAT sont assez proches en P<sub>1</sub>, P<sub>3</sub> et P<sub>4</sub>, avec un maximum de 253 g/kg MS. En P<sub>2</sub> le maximum est plus faible puisqu'il atteint 185 g/kg MS. Les résultats d'évolution printanière de production, dMO et MAT sont également très variables avec des valeurs très étendues pour la production (Tableau 28).

L'étude de l'évolution de la dMO et MAT au printemps montre respectivement une diminution moyenne de 0.02 %/°C jours et de 0.1 g/kg MS/°C jours.

### *Etats de la végétation*

La proportion de graminées dans les parcelles étudiées reste très élevée durant les deux années de suivi, avec une grande variabilité selon les parcelles. Les proportions varient peu entre le P<sub>1</sub> et le P<sub>2</sub> (de 77.3 à 84.1% en moyenne) et sont plus faibles pour le P<sub>3</sub> et le P<sub>4</sub> (de 63.8 à 69.0%) (Tableau 29). Les proportions de légumineuses et diverses varient beaucoup mais sont en moyenne inférieures à 19% de la proportion de biomasse en considérant les quatre prélèvements. En P<sub>3</sub> et P<sub>4</sub>, les moyennes de légumineuses et diverses sont plus élevées qu'en P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub> : elles atteignent 14.4 à 18.4% en P<sub>3</sub> P<sub>4</sub> contre 7.9 à 13.1% en P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub> (Tableau 29).

La proportion de TF est très variable au sein d'un prélèvement donné (Tableau 29). La proportion moyenne de TF A reste très importante sur les parcelles étudiées : elle est en moyenne de 50.0% en P<sub>1</sub> et 39.2% en P<sub>2</sub>, comme la proportion de TF b qui est de 29.5% en moyenne en P<sub>1</sub> et 41.4% en P<sub>2</sub> (Tableau 29). La proportion de TF b augmente entre P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub>. La proportion de TF C reste faible dans notre échantillon, avec en moyenne de 5.7 à 8.4% de TF C en P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub>. Cependant certaines parcelles peuvent être composées jusqu'à 85% de TF C (Tableau 29).

Les valeurs de teneur en MS sont également très variables au sein d'un prélèvement. Par exemple, en P<sub>1</sub> la teneur en MS varie de 11.3% à 34.9% (Tableau 29). De même le stade moyen d'une prairie peut varier de manière importante pour un même prélèvement. En P<sub>2</sub>, les 25% inférieurs des données sont en dessous d'un stade moyen équivalent au début montaison, alors que les 25% supérieurs des données sont au dessus de l'épiaison (pour le calcul avec les talles végétatives) (Tableau 29).

**Tableau 28. Description des critères d'aptitudes fourragers mesurés sur les 190 parcelles pour les deux années: valeur minimum (min), maximum (max), moyenne, médiane et quartile 1 et 3 pour les critères de production (en t MS/ha), de digestibilité de la matière organique (dMO en %), de teneur en matières azotées (MAT en g/kg de MS), de production annuelle (en t de MS/ha), de croissance au printemps (en kg MS/ha/ °C jours) et d'évolution de dMO ou de MAT (en %/°C jours ou g/kg MS/ °C jours).**

	Min	Max	Moyenne	Médiane	Quartile 1	Quartile 3
<b>P1</b>						
Somme de température (°C jours)	401.0	920.0	579.0	562.0	530.0	618.0
Production	0.0	7.2	1.8	1.6	1.0	2.3
dMO	60.6	86.1	77.1	78.1	74.4	80.6
MAT	87.4	253.7	168.4	167.1	143.4	189.4
<b>P2</b>						
Somme de température (°C jours)	799.0	1570.0	1191.4	1178.5	1108.0	1252.5
Production	0.5	12.3	4.6	4.4	3.4	5.7
dMO	54.9	76.5	64.4	64.5	62.2	66.7
MAT	49.1	185.4	94.1	90.5	78.5	106.2
<b>P3</b>						
Jours de repousse (j)	20.0	80.0	47.0	46.0	42.0	50.0
Production	0.0	4.5	0.7	0.4	0.0	1.1
dMO	55.7	82.8	71.2	71.4	67.5	75.0
MAT	82.9	245.6	150.7	150.4	130.2	170.9
<b>P4</b>						
Jours de repousse (j)	20.0	96.0	55.0	51.0	45.0	62.0
Production	0.0	3.7	0.8	0.6	0.0	1.4
dMO	53.8	84.6	72.3	73.6	69.3	76.3
MAT	18.0	256.4	168.1	163.5	146.9	191.0
<b>Variables d'évolution</b>						
Production annuelle	0.5	16.4	6.2	6.1	4.2	8.1
Croissance production	0.4	12.4	4.8	4.8	3.1	6.4
Evolution dMO	-0.04	0.00	-0.02	-0.02	-0.03	-0.02
Evolution MAT	-0.3	0.0	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1

**Tableau 29. Description des états de végétation mesurés sur les 190 parcelles pendant les deux années : valeur minimum (min), maximum (max), moyenne, médiane et quartile 1 et 3 pour la proportion de graminées, légumineuses et diverses (%), la proportion de types fonctionnels (TF) A, B, b, C et D (%), la teneur en matière sèche, (%) et le stade moyen de végétation.**

	Min	Max	Moyenne	Médiane	Quartile 1	Quartile 3
<b>P1</b>						
Pourcentage de graminées	25.0	100.0	77.3	83.3	66.7	91.7
Pourcentage de légumineuses	0.0	83.3	9.8	8.3	0.0	16.7
Pourcentage de diverses	0.0	66.7	13.1	8.3	0.0	16.7
Proportion de TF A	0.0	100.0	50.0	51.2	28.6	71.4
Proportion de TF B	0.0	100.0	8.7	2.5	0.0	11.9
Proportion de TF b	0.0	100.0	29.5	26.2	12.5	43.6
Proportion de TF C	0.0	85.0	5.7	0.0	0.0	2.5
Proportion de TF D	0.0	30.2	0.4	0.0	0.0	0.0
Teneur en matière sèche	11.3	34.9	21.5	21.7	18.3	24.4
Stade moyen avec talles végétatives	1.5	3.5	2.1	2.1	1.8	2.4
<b>P2</b>						
Pourcentage de graminées	25.0	100.0	84.1	91.7	75.0	100.0
Pourcentage de légumineuses	0.0	58.3	7.9	0.0	0.0	16.7
Pourcentage de diverses	0.0	50.0	8.1	0.0	0.0	8.3
Proportion de TF A	0.0	93.8	39.2	39.8	19.4	58.4
Proportion de TF B	0.0	76.2	6.9	2.3	0.0	9.5
Proportion de TF b	0.0	100.0	41.4	39.5	24.8	53.0
Proportion de TF C	0.0	75.6	8.4	0.0	0.0	10.4
Proportion de TF D	0.0	10.2	0.1	0.0	0.0	0.0
Teneur en matière sèche	13.6	55.3	27.9	27.6	23.9	31.3
Stade moyen avec talles végétatives	1.5	4.7	2.7	2.6	2.1	3.2
Stade moyen sans talles végétatives	2.0	4.8	2.9	2.9	2.4	3.4
<b>P3</b>						
Pourcentage de graminées	16.7	100.0	69.0	75.0	50.0	83.3
Pourcentage de légumineuses	0.0	83.3	14.4	8.3	0.0	25.0
Pourcentage de diverses	0.0	83.3	16.6	8.3	8.3	25.0
Teneur en matière sèche	9.9	42.8	24.5	23.8	19.5	28.8
<b>P4</b>						
Pourcentage de graminées	0.0	100.0	63.8	66.7	50.0	83.3
Pourcentage de légumineuses	0.0	91.7	16.3	16.7	0.0	25.0
Pourcentage de diverses	0.0	83.3	18.4	16.7	8.3	25.0
Teneur en matière sèche	11.6	42.9	23.5	22.9	19.1	27.3

### **Etude des liens entre les critères de production et de qualité et la composition fonctionnelle**

Les résultats sont présentés par critère fourrager (production, dMO, MAT). Les analyses en ACP ont permis d'éliminer les variables des états de la végétation corrélées, à savoir le pourcentage de graminées dans l'estimation de la proportion de graminées, légumineuses et diverses. En effet cette variable est très corrélée aux deux autres, puisque par construction la somme des 3 familles est égale à 100%. De même la proportion de TF A est très corrélée à la proportion de TF B et b et n'a pas été introduite dans les modèles de prédiction. Les variables d'évolution (évolution de dMO, MAT et croissance d'herbe) sont calculées par la différence des données de P<sub>2</sub> avec celles de P<sub>1</sub> : les résultats obtenus sont donc négatifs pour la dMO et la MAT et positifs pour la croissance d'herbe. Les tableaux de résultats des modèles de prévision présentent uniquement les interactions significatives. Les tableaux complets sont présentés en annexe 5. L'ensemble des traitements a été effectué sur 380 données.

#### *Production*

La variance expliquée par les modèles construits sur H<sub>1</sub> varie entre 0.11 à 0.25. L'effet de la ST est significatif sur la production en P<sub>1</sub> et sur la variable de croissance au printemps. Dans les modèles de prévision correspondants à H<sub>1</sub>, les proportions de légumineuses et de diverses ont un effet négatif sur la production au printemps, en automne ainsi que sur la production annuelle et la croissance de l'herbe (Tableau 30). L'effet des TF est également significatif durant l'année (sauf l'été). Le TF C est le plus significatif, avec un effet négatif sur les variables de production par prélèvement et sur la production annuelle. Sur la croissance au printemps l'effet de la proportion de TF C varie selon l'année, avec un effet positif ou négatif. Les effets des TF b et B sont moins significatifs. Le TF B a un effet négatif en P<sub>4</sub> et le TF b a un effet positif en P<sub>1</sub>, et négatif en P<sub>2</sub> et sur la production annuelle. De plus, l'effet annuel est significatif sur la production en été (P<sub>3</sub>) et sur la croissance au printemps (Tableau 30).

Dans les modèles correspondant à H<sub>2</sub>, les R<sup>2</sup> varient entre 0.09 et 0.24 (Tableau 30). L'effet de la ST est significatif sur les modèles en P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub>. Le stade moyen contribue de façon significative et positive à expliquer la production au printemps et la production annuelle (Tableau 30). L'effet du stade moyen varie entre les deux années en P<sub>2</sub>. De même, l'effet négatif de la teneur en MS sur la production est significatif dans les modèles de début de printemps, d'été et d'automne, ainsi que sur la production annuelle. L'effet année contribue également à expliquer les modèles en P<sub>1</sub> (Tableau 30).

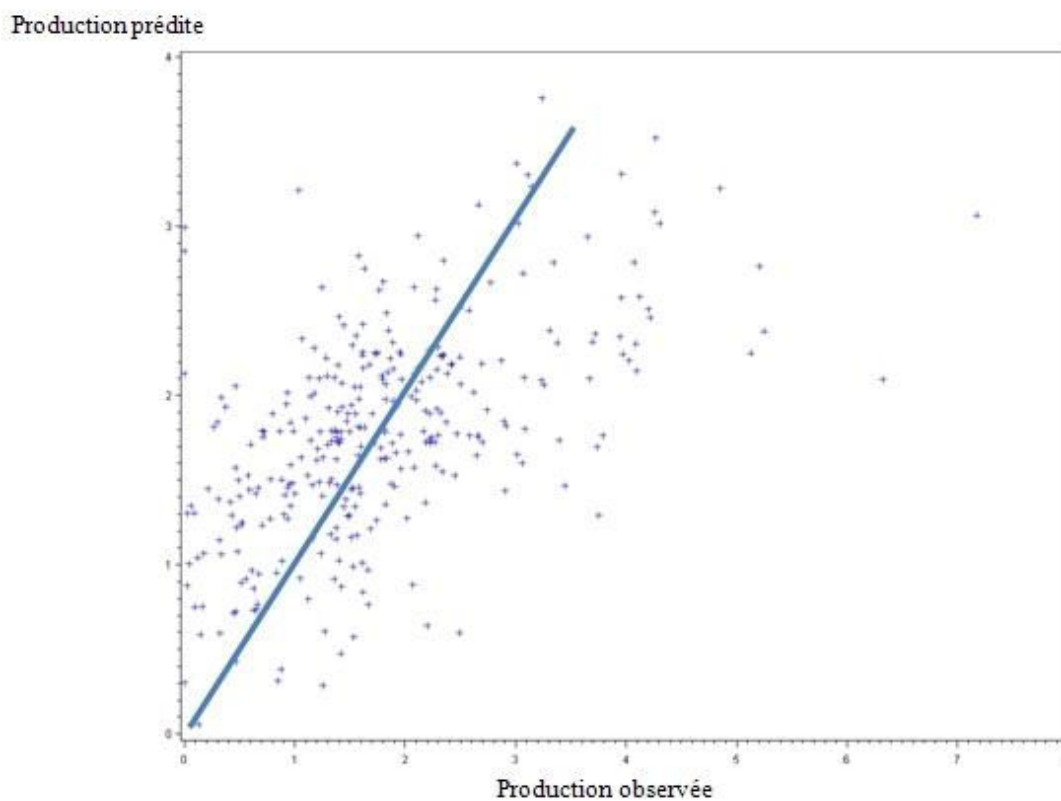
Les modèles basés sur  $H_3$  contribuent à expliquer de façon plus importante la variance ( $R^2$  de 0.16 à 0.31) (Tableau 30). L'effet de la ST est significatif sur les modèles en  $P_1$  et  $P_2$ . Les graphiques comparant les observés et les prédits ne montrent pas de distribution anormale des résidus (Figure 31). Les proportions de légumineuses et de diverses sont fortement significatives, avec un effet négatif sur la production en  $P_1$ ,  $P_2$  et  $P_4$ , sur la production annuelle et sur la croissance d'herbe au printemps. L'effet de la teneur en MS est très important tout au long de l'année (sauf en fin de printemps et sur la croissance au printemps), comme le stade de végétation moyen au printemps. De plus, l'effet du stade moyen en  $P_2$  est variable selon les deux années considérées. Les TF contribuent aussi à expliquer la production mais avec une significativité plus faible. L'effet du TF B est visible en automne ( $P_4$ ) avec un effet négatif. Le TF b a un effet positif en  $P_1$  et le TF C négatif en  $P_2$  et sur la production annuelle. L'effet des TF est moins significatif dans les modèles tenant compte du stade moyen et de la teneur en MS ( $H_3$ ) que dans les modèles correspondant à  $H_1$ . En effet, le TF b n'a plus d'effet en fin de printemps et sur la production annuelle. De même, le TF C n'a plus d'effet en début de printemps, en automne et sur la croissance d'herbe (Tableau 30).



**Tableau 30. Résultat des régressions multiples entre la production d'herbe (en t de MS/ha) et la composition fonctionnelle (proportion de légumineuses et diverses, types fonctionnels (TF) B, b et C, le stade moyen de végétation, la teneur en matière sèche (MS) pour les trois hypothèses (H1, H2, H3) et pour les prélèvements de printemps (début (P1) et fin (P2)), d'été (P3), d'automne (P4), pour la production annuelle et pour la croissance entre P1 et P2.**

	P1	P2	croissance P1P2	P3	P4	production annuelle
<b>Modèles H1</b>						
R <sup>2</sup>	0.2	0.25	0.21	0.12	0.11	0.18
RMSE	1.03	1.68	2.09	0.88	0.77	2.32
Signification des effets	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>
Légumineuses	*, -	***, -	ns	ns	** , -	***, -
Diverses	ns	***, -	** , -	ns	ns	***, -
TF B	ns	ns	ns	ns	* , -	ns
TF b	* , +	* , -	ns	ns	ns	* , -
TF C	** , -	***, -	* , +	ns	* , -	** , -
ST	***, +	.	***, -	.	ns	** , -
Année	ns	ns	* , +/+	** , +/+	ns	ns
TF C*Année	ns	ns	* , +/+	ns	ns	ns
<b>Modèles H2</b>						
R <sup>2</sup>	0.24	0.11	0.09	0.13	0.09	0.11
RMSE	0.99	1.80	2.18	0.84	0.74	2.43
Signification des effets	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>
Stade moyen	* , +	** , +	ns	ns	.	***, +
Teneur en MS	** , -	ns	ns	** , -	***, -	** , -
ST	***, +	ns	ns	.	.	ns
Année	* , +/-	ns	ns	ns	ns	ns
ST*Année	ns	** , +/+	** , +/+	.	.	ns
Stade moyen*Année	ns	* , -/+	ns	.	.	ns
<b>Modèle H3</b>						
R <sup>2</sup>	0.31	0.29	0.21	0.16	0.17	0.23
RMSE	0.96	1.63	2.07	0.87	0.75	2.29
Signification des effets	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>
Légumineuses	* , -	***, -	* , -	ns	** , -	***, -
Diverses	ns	***, -	***, -	ns	ns	***, -
TF B	ns	ns	ns	ns	* , -	ns
TF b	** , +	ns	ns	ns	ns	ns
TF C	ns	** , -	ns	ns	ns	* , -
Stade moyen	***, +	***, +	ns	.	.	** , +
Teneur en MS	***, -	ns	ns	** , -	* , -	***, -
ST	***, +	ns	* , -	.	.	ns
Année	* , -/+	ns	ns	ns	* , +/+	ns
Teneur en MS*Année	ns	ns	ns	ns	* , -/+	ns
Stade moyen*Année	ns	** , -/+	ns	.	.	* , -/+
TF B*Année	ns	ns	ns	ns	* , +/+	ns

P : p-value ; s : signe ; RMSE : écart type résiduel du modèle ; Année : effet année ; \* : <0.05 ; \*\* : <0.01 ; \*\*\* : <0.001 ; ns : non significatif



**Figure 31. Graphique des observés selon les prédits pour la production d'herbe au prélèvement 1 (P<sub>1</sub>) (en t MS/ha).**

#### *Digestibilité de la matière organique (dMO)*

La variance expliquée par les modèles varie de 0.22 à 0.33 (Tableau 31). La ST contribue très significativement à expliquer les variables printanières. Dans les modèles de prévision basés sur H<sub>1</sub>, les légumineuses et les diverses ont un effet très significatif et positif tout au long de l'année (Tableau 31). L'effet des TF est variable, avec un effet positif du TF b sur l'évolution de la dMO et un effet négatif marqué et très significatif du TF C sur la digestibilité en début de printemps, en été et automne, et qui ralentit sa diminution au printemps. De plus, l'effet de la proportion de légumineuses et du TF C varie selon les années respectivement pour P<sub>1</sub> et l'évolution de dMO.

La variance expliquée par les modèles de H<sub>2</sub> varie de 0.15 à 0.39 (Tableau 31). La ST contribue à expliquer les variables printanières. Les modèles de prédiction basés sur H<sub>2</sub> montrent un effet de la teneur en MS très significatif et négatif tout au long de l'année, sauf sur l'évolution au printemps pour laquelle l'effet de la teneur en matière sèche varie selon l'année (Tableau 31). En P<sub>1</sub> et P<sub>3</sub>, l'effet de la teneur en MS est plus ou moins marqué selon l'année. De même l'effet du stade de développement reste très élevé et négatif en P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub>

ainsi que sur la variable d'évolution. En P<sub>2</sub>, l'effet du stade moyen est variable selon l'année pour la variable d'évolution.

Enfin les modèles basés sur H<sub>3</sub> contribuent à expliquer de façon plus importante la variance (R<sup>2</sup> de 0.34 à 0.49) (Tableau 31). La proportion de légumineuses a un effet très significatif et positif toute l'année, ainsi que sur l'évolution de la digestibilité au printemps. L'effet des diverses est également très élevé et significatif en été, automne et sur l'évolution de la dMO au printemps. En revanche il n'y a pas d'effet des diverses au printemps. Parmi les effets des TF, celui du TF C est le plus marqué, avec une influence négative au début du printemps, en été et automne, et un effet positif sur l'évolution de la dMO au printemps. L'effet du TF C reste significatif dans ce modèle comme dans le modèle H<sub>1</sub>, malgré l'introduction de la teneur en MS et du stade moyen. Un effet négatif du TF b est visible en P<sub>2</sub>. De plus, la teneur en MS contribue fortement à expliquer les variations de digestibilité, en agissant négativement et tout au long de l'année. Il n'y a pas d'effet de la teneur en MS sur l'évolution de la dMO. Le stade moyen est aussi très significatif au printemps, avec une influence négative. L'effet du stade moyen en P<sub>2</sub> varie avec l'année, comme l'effet de la teneur en MS en P<sub>1</sub> et sur l'évolution de la dMO (Tableau 31).

**Tableau 31. Résultat des régressions multiples entre la digestibilité de la matière organique (dMO en %) et la composition fonctionnelle (proportion de légumineuses et diverses, types fonctionnels (TF) B, b et C, le stade moyen, et la teneur en matière sèche (MS)) pour les trois hypothèses (H1, H2, H3) et pour les prélèvements de printemps (début (P1) et fin (P2)), d'été (P3), d'automne (P4) et pour l'évolution entre P1 et P2.**

	P1	P2	Evolution dMO	P3	P4
<b>Modèles H1</b>					
R <sup>2</sup>	0.29	0.28	0.27	0.33	0.22
RMSE	4.00	3.29	0.01	4.25	5.15
Signification des effets	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>
Légumineuses	***, +	***, +	***, +	***, +	**, +
Diverses	ns	*, +	***, +	***, +	***, +
TF B	ns	ns	ns	ns	ns
TF b	ns	ns	*, +	ns	ns
TF C	***, -	ns	***, +	***, -	***, -
ST	***, +	***, -	***, +	.	.
Année	ns	ns	ns	ns	ns
Légumineuses*Année	**, +/-	ns	ns	ns	ns
TF C*Année	ns	ns	*, -/+	ns	ns
<b>Modèles H2</b>					
R <sup>2</sup>	0.39	0.33	0.15	0.32	0.23
RMSE	3.74	3.09	0.01	4.21	5.23
Signification des effets	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>
Stade moyen	***, -	***, -	***, -	.	.
Teneur en MS	***, -	***, -	ns	***, -	***, -
ST	***, -	**, -	***, +	.	.
Année	ns	ns	ns	ns	ns
ST*Année	ns	ns	*, -/+	.	.
Stade moyen*Année	ns	*, +/-	ns	.	.
Teneur en MS*Année	*, -/+	ns	*, +/-	*, +/-	ns
<b>Modèle H3</b>					
R <sup>2</sup>	0.48	0.49	0.34	0.45	0.37
RMSE	3.49	2.74	0.01	3.82	4.67
Signification des effets	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>
Légumineuses	***, +	***, +	***, +	***, +	***, +
Diverses	ns	ns	***, +	***, +	***, +
TF B	ns	ns	ns	ns	ns
TF b	ns	**, -	ns	ns	ns
TF C	***, -	ns	***, +	***, -	**, -
Stade moyen	***, -	***, -	**, -	.	.
Teneur en MS	***, -	***, -	ns	***, -	***, -
ST	**, -	ns	***, +	.	.
Année	ns	ns	ns	ns	ns
Teneur en MS*Année	**, -/+	ns	*, +/-	ns	ns
Stade moyen*Année	ns	**, +/-	ns	.	.
Légumineuses*Année	ns	*, +/-	ns	ns	ns
TF B*Année	ns	*, -/+	ns	ns	ns
TF C*Année	ns	ns	*, -/+	ns	ns

P : p-value ; s : signe ; RMSE : écart type résiduel du modèle ; Année : effet année ; \* : <0.05 ; \*\* : <0.01 ; \*\*\* : <0.001 ; ns : non significatif

*Teneur en matière azotée (MAT)*

Dans les modèles de prédiction correspondant à H<sub>1</sub>, avec des R<sup>2</sup> s'étalant de 0.12 à 0.30, l'effet de la proportion des légumineuses est significatif et positif sur la teneur en MAT à toutes les périodes de l'année et sur son l'évolution au printemps (Tableau 32). En revanche, l'effet des diverses est uniquement significatif sur l'évolution de la MAT au printemps. Les TF contribuent plus faiblement à expliquer la MAT : le TF B a un faible effet positif en P<sub>1</sub> et négatif sur l'évolution de la MAT au printemps. Le TF b explique très faiblement et positivement P<sub>1</sub> et le TF C contribue à expliquer négativement P<sub>1</sub> et P<sub>4</sub>. La ST contribue à expliquer les modèles de printemps (Tableau 32).

Les modèles de prédiction de H<sub>2</sub> sont caractérisés par des R<sup>2</sup> plus élevés que les modèles de prédiction de H<sub>1</sub> (de 0.13 à 0.45) (Tableau 32). La ST contribue à expliquer la MAT au printemps. L'effet de la teneur en MS est très significatif et négatif tout au long de l'année, sauf sur l'évolution de la MAT. L'effet du stade moyen est négatif au printemps et sur l'évolution de la MAT. Un effet année contribue à expliquer le P<sub>1</sub> et le P<sub>3</sub>. De plus, des effets peu significatifs des interactions entre la teneur en MS et l'année en P<sub>2</sub> et P<sub>3</sub> sont visibles (Tableau 32).

Les modèles basés sur H<sub>3</sub> contribuent à expliquer de façon plus importante la variance (de 0.23 à 0.50) (Tableau 32). La ST contribue à expliquer la MAT au printemps. L'effet des légumineuses reste très significatif en fin de printemps en été, en automne et sur l'évolution au printemps. Les diverses ont un effet significatif uniquement sur l'évolution au printemps. L'effet des TF reste très faible au cours de l'année : le TF B contribue à expliquer faiblement et positivement P<sub>1</sub> et négativement l'évolution de la MAT au printemps. En P<sub>1</sub>, il existe un effet du type b selon les deux années. Aucun effet du type C sur la MAT n'est visible (Tableau 32). L'effet des TF dans ces modèles incluant le stade moyen et la teneur en MS est moins significatif que dans le modèle H<sub>1</sub>. En effet, le TF b n'est plus significatif en début de printemps. De même, le TF C n'est plus significatif en début de printemps et en automne. En revanche, la teneur en MS et le stade moyen contribuent à expliquer très significativement les modèles durant l'année (printemps uniquement concerné par les stades moyens), avec un effet négatif des deux variables. En P<sub>2</sub> et sur l'évolution de la MAT au printemps, l'effet du stade moyen était variable selon les deux années mais toujours positif. L'effet année est significatif en P<sub>1</sub> et en été (Tableau 32).

**Tableau 32. Résultat des régressions multiples entre la teneur en matières azotées (MAT en g/kg) et la composition fonctionnelle (proportion de légumineuses et diverses, types fonctionnels (TF) B, b et C, stade moyen, teneur en matière sèche (MS)) pour les trois hypothèses (H1, H2, H3) et pour les prélèvements de printemps (début (P1) et fin (P2)), d'été (P3), d'automne (P4) et pour l'évolution entre P1 et P2.**

	P1	P2	Evolution MAT	P3	P4
<b>Modèles H1</b>					
R <sup>2</sup>	0.3	0.21	0.18	0.18	0.12
RMSE	27.33	20.08	0.04	26.08	30.32
Signification des effets	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>
Légumineuses	*, +	***, +	**, +	***, +	***, +
Diverses	ns	ns	***, +	ns	ns
TF B	**, +	ns	**, -	ns	ns
TF b	*, +	ns	ns	ns	ns
TF C	*, -	ns	ns	ns	*, -
ST	***, -	***, -	***, +	.	.
Année	**, +/+	ns	ns	ns	ns
TF b*Année	*, -/+	ns	ns	ns	ns
ST*Année	*, -/+	ns	ns	.	.
<b>Modèles H2</b>					
R <sup>2</sup>	0.45	0.34	0.13	0.32	0.21
RMSE	23.37	18.07	0.04	23.70	28.90
Signification des effets	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>
Stade moyen	***, -	***, -	*, -	.	.
Teneur en MS	***, -	***, -	ns	***, -	***, -
ST	***, -	**, -	***, +	.	.
Année	**, +/+	ns	ns	**, -/+	ns
ST*Année	ns	**, -/+	ns	.	.
Teneur en MS*Année	ns	ns	ns	*, +/+	ns
<b>Modèle H3</b>					
R <sup>2</sup>	0.5	0.42	0.23	0.42	0.29
RMSE	22.76	17.26	0.04	22.05	27.44
Signification des effets	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>
Légumineuses	ns	***, +	*, +	***, +	***, +
Diverses	ns	ns	***, +	ns	ns
TF B	*, +	ns	**, -	ns	ns
TF b	ns	ns	ns	ns	ns
TF C	ns	ns	ns	ns	ns
Stade moyen	***, -	***, -	*, -	.	.
Teneur en MS	***, -	***, -	ns	***, -	***, -
ST	***, -	ns	***, +	.	.
Année	**, +/+	ns	ns	**, -/+	ns
Teneur en MS*Année	ns	ns	ns	*, +/+	ns
Stade moyen*Année	ns	*, +/+	*, +/+	.	.
TF b*Année	**, -/+	ns	ns	ns	ns
ST*Année	ns	*, -/+	**, -/+	.	.

P : p-value ; s : signe ; RMSE : écart type résiduel du modèle ; Année : effet année ; \* : <0.05 ; \*\* : <0.01 ; \*\*\* : <0.001 ; ns : non significatif

## Discussion

### Variabilité des données

Les données des états de la végétation sont très variables dans le réseau de parcelles. Ce réseau, du fait de son échantillonnage, est représentatif des prairies permanentes françaises. Il y a donc une grande variabilité des valeurs de composition de la végétation et des critères fourragers dans les prairies permanentes françaises. Celles-ci restent cependant composées d'une proportion importante de graminées de TF A et B. Les légumineuses ont en moyenne sur deux années une place inférieure à 19% dans la biomasse. Les prairies permanentes peuvent présenter des valeurs très différentes en termes de production et qualité au cours de l'année.

### Critères de production

#### *Modèles*

Globalement, les modèles combinant les TF, les familles botaniques avec les états de végétation mesurés sur la biomasse prairiale (teneur en MS et stade moyen de végétation) sont meilleurs que ceux basés uniquement sur les TF et familles botaniques ou sur la teneur en MS et le stade moyen de végétation. Les  $R^2$  des modèles correspondant à l'hypothèse  $H_1$  sont faibles. Parmi les TF, l'effet du type C est celui qui est le plus significatif. En effet, les espèces classées en TF C sont caractéristiques des milieux peu fertiles : elles sont plus tardives et ont des TMS plus élevées et une digestibilité des feuilles plus faibles (Duru *et al.* 2007 ; Cruz *et al.* 2010). Les caractéristiques liées à ces espèces expliquent l'effet négatif de la proportion de TF C sur la DMO de la prairie. Ces effets ont été mis en évidence pour les TF C et D mais nous n'avons pas vérifié cela pour les TF D car nous n'avons pas d'espèces classées en D dans notre échantillon. Les modèles sont considérablement améliorés lorsque la teneur en MS et le stade moyen de végétation de la prairie sont intégrés. Les TF informent plutôt d'une précocité ou d'une tardivité des espèces présentes dans la parcelle (Cruz *et al.* 2010), alors que le stade moyen apporte des informations sur l'état de la parcelle au moment du prélèvement. Les informations sont donc différentes et peuvent être complémentaires ou partiellement redondantes. En effet, par exemple, l'effet du TF C sur la production au début du printemps n'est plus significatif lorsque l'on introduit le stade moyen de végétation mesuré sur la parcelle dans le modèle  $H_3$ . De plus, les TF apportent des informations sur la TMS potentielle de la parcelle à partir des informations sur les espèces, alors que la mesure de la

teneur en MS de la biomasse tient compte également de l'état hydrique de la parcelle, en considérant les conditions climatiques au moment du prélèvement. Le stade moyen et la teneur en MS expriment en partie des effets intrinsèques liés aux plantes mais aussi des variations liées à l'environnement. Ainsi, ces variables permettent d'améliorer la part de la variabilité expliquée par la composition en familles botanique et en types fonctionnels de graminées.

Dans tous les modèles que nous avons établis sous l'hypothèse  $H_1$ , l'effet de la proportion de dicotylédones (légumineuses ou plantes diverses et parfois les deux) s'est révélé significatif, à l'exception de la production d'herbe en  $P_3$ . Cela montre que même si les propriétés des dicotylédones présentes dans une prairie convergent vers celles des graminées présentes (Ansquer *et al.* 2009), l'utilisation des TF seuls est insuffisante pour prévoir les critères de production et de qualité. La prise en compte de la proportion de légumineuses et de diverses dans la prairie en plus de sa composition en TF de graminées est donc nécessaire pour expliquer la variabilité de la production et de la qualité.

### *Production*

Les modèles de prédiction de la production montrent une contribution importante des légumineuses et diverses. L'effet négatif des légumineuses et des diverses sur ce critère a été démontré (Butkuvienė et Buthute 2008). Il peut être expliqué par une morphologie différente pour ces deux familles comparées à la famille des graminées. Cependant, Zhu *et al.* (2010) ont montré que la proportion de légumineuses n'affectait pas la production d'herbe. L'effet de la composition en TF de graminées s'est avéré moins important que celui de la proportion de légumineuses et plantes diverses. Le TF C est celui qui a le plus d'effet sur la production de biomasse avec un effet négatif, ce qui est en accord avec les résultats obtenus par Pontes *et al.* (2007) sur une collection d'espèces pures et par Duru *et al.*, (2010a).

Jeangros *et al.* (2005) ont montré un effet important du stade moyen au printemps sur la biomasse. En effet, plus une prairie se développe et plus la production est importante. L'effet très significatif et négatif de la teneur en MS sur la production peut être expliqué par l'effet des TF C dans les prairies. En effet les plantes de Type C ont une TMS élevée, cependant leur présence dans le réseau de parcelles est globalement faible (5.75% en moyenne) (Tableau 29). L'effet négatif de la teneur en MS de la prairie sur la production peut aussi traduire des conditions de milieu séchantes. Dans ces conditions les plantes sont plus pauvres en eau et la production de la prairie est limitée.



La proportion relativement faible de la variabilité de la production expliquée par les modèles de prévision peut aussi provenir d'une certaine imprécision des mesures de production elle-même. En effet les surfaces utilisées pour ces mesures étaient faibles (3 x 0.49 m<sup>2</sup> pour une parcelle) et probablement insuffisantes pour rendre compte complètement de l'hétérogénéité d'une parcelle de prairie permanente.

#### *Digestibilité de la matière organique*

Les modèles de dMO sont expliqués en grande partie par la proportion de légumineuses et de diverses. L'effet positif de ces deux familles botaniques sur la dMO peut s'expliquer par le fait que les légumineuses et les diverses présentes dans les prairies permanentes sont principalement des plantes comme le trèfle blanc qui produisent moins de tiges au cours de temps que les graminées (Daccord *et al.* 2006 ; Baumont *et al.* 2008). La contribution des TF à l'explication de la dMO est plus faible. En effet, parmi les TF, c'est principalement le TF C qui influence significativement la dMO. L'effet négatif du type C sur la dMO s'explique par le fait que ces espèces, à stratégie de conservation de la ressource ont une teneur en MS et des proportions en parois cellulaires plus élevées, ce qui influence négativement la digestibilité (Cruz *et al.* 2010 ; Duru *et al.* 2010a). Un effet positif du TF b a été mis en évidence sur l'évolution de la dMO au printemps. Les espèces de TF b sont considérées comme tardives et productives, elles peuvent donc ralentir la diminution de digestibilité en fin de cycle du fait de leur phénologie plus tardive (Pontes *et al.* 2007 ; Cruz *et al.* 2010). Sur nos données, cet effet semble bien être lié à la phénologie, car l'effet du stade moyen de végétation est très significatif sur la diminution de digestibilité et l'effet du type b n'est plus significatif lorsque les deux variables sont combinés dans un même modèle.

Les effets du stade moyen et de la teneur en MS contribuent fortement à expliquer la variabilité de la digestibilité. Le stade moyen caractérise le développement de la parcelle : plus on avance dans le temps et plus la végétation est mature et s'enrichit en parois cellulaires. Il influence donc négativement la dMO (Jeangros *et al.* 2005 ; Baumont *et al.* 2008). La teneur en MS traduit vraisemblablement également la teneur en tiges et en parois cellulaires en liaison avec les propriétés intrinsèques des espèces, et en liaison avec les conditions plus ou moins séchantes du milieu.

### *Teneur en matière azotée*

La proportion de légumineuses influence positivement la teneur en MAT de la prairie du fait de la teneur en azote élevée des plantes de cette famille (Bruinenberg *et al.* 2002 ; Daccord *et al.* 2006 ; Baumont *et al.* 2008). En revanche, nous n'avons pas mis cela en évidence d'effet des plantes diverses sur la teneur en MAT, contrairement à Daccord (2006), mais la proportion de plantes diverses contribue à ralentir la diminution de la teneur en MAT entre le début et la fin du printemps. Dans notre étude, les TF contribuent faiblement à expliquer la teneur en MAT. Les effets des TF mis en avant sont positifs pour les TF B et b, sauf pour les variables d'évolution et négatif pour le TF C. L'effet négatif du TF C peut s'expliquer par le fait que les plantes caractéristiques des milieux peu fertiles sont plus pauvres en MAT. L'effet négatif de la teneur en MS sur la teneur en MAT pourrait traduire en partie l'effet du TF C. Le stade moyen a un effet négatif sur la teneur en MAT car plus le stade avance et plus cette teneur en MAT diminue (Baumont *et al.* 2008).

### **Conclusion**

Les modèles de prévision des variables de production et de qualité des prairies permanentes sont globalement améliorés en combinant la composition en TF de graminées, en familles botaniques avec les teneurs en MS et le stade moyen mesurés sur la prairie. Ces variables permettent vraisemblablement de prendre en compte d'autres facteurs, en particulier certaines conditions de milieu. Les mesures de stade moyen apportent des informations sur le développement de la parcelle à un moment donné et la teneur MS apporte des informations sur les conditions de milieu, et traduit également certaines propriétés des plantes comme la proportion de tiges et de parois cellulaires.

Dans l'ensemble des modèles étudiés, la contribution de la proportion de légumineuses et diverses est importante. Elle est cependant plus faible pour la proportion de diverses dans l'explication de la teneur en MAT. Les légumineuses ont un effet positif sur la dMO et la teneur en MAT et négatif sur la production. En revanche la contribution des TF à l'explication des variables de production et qualité est limitée : c'est principalement la proportion de TF C qui ressort le plus dans les modèles, avec un effet négatif sur la production, la dMO et la teneur en MAT. La mesure du stade moyen ainsi que la teneur en MS contribuent fortement à expliquer la variabilité de la production et de la qualité, avec un effet positif du stade moyen sur la production et négatif sur la qualité, et un effet négatif de la teneur en MS sur la production et qualité de la prairie. Ainsi, pour prévoir la production et la qualité d'une prairie

à partir des états de la végétation, il est important de combiner des informations sur les TF, proportion de graminées, légumineuses et diverses, stade moyen ou la teneur en MS.

## Références

- AL HAJ KHALED, R., DURU, M., THEAU, J.P., PLANTUREUX, S. et 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**, 391-398.
- ANDUEZA, D., CRUZ, P., FARRUGGIA, A., BAUMONT, R., PICARD, F. et the late of MICHALET-DOREAU B. (2010). Nutritive value of two meadows and relationships with some vegetation traits. *Grass and Forage Science* **65**, 325-334.
- ANSQUER, P. (2006) *Caractérisation agroécologique des végétations prairiales naturelles en réponse aux pratiques agricoles. Apport pour la construction d'outils de diagnostic*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France.
- ANSQUER, P., DURU, M., THEAU, J.P. et CRUZ, P. (2009). Convergence in plant traits between species within grassland communities simplifies their monitoring. *Ecological Indicators* **9**, 1020-1029.
- AUFRERE, J. et DEMARQUILLY, C. (1989). Predicting organic matter digestibility of forage by two pepsin-cellulase methods. In: *Proceedings of the XVI International Grassland Congress*, pp. 877-878. Nice, France: Association Française pour la Production Fourragère.
- BAUMONT, R., AUFRERE, J., NIDERKORN, V., ANDUEZA, D., SURAULT, F., PECCATTE, J.R., DELABY, L. et PELLETIER P. (2008). Specific diversity in forages: its consequences on the feeding value. *Fourrages* **194**, 189-206.
- BRUINENBERG, M-H., VALK, H-H., KOREVAAR, H. et STUIK, P.C. (2002). Factors affecting digestibility of temperate forages from semi-natural grassland. *Grass and Forage Science* **57**, 292-301.
- BUCKEE, G.K. (1994). Determination of Total Nitrogen in Barley, Malt and Beer by Kjeldahl Procedures and the Dumas Combustion Method - Collaborative Trial. *Journal of the Institute of Brewing* **100** (2), 57-64.
- BUTKUVIENE, E. et BUTKUTE, R. (2008). Effects of pasture improvement measures on sward productivity, botanical and chemical composition. *Zemes ukio Mokslai* **15** (2), 46-52.
- CRUZ, P., DURU, M., THEROND, O., THEAU, J.-P., DUCOURTIEUX, C., JOUANY, C., AL HAJ KHALED, R. and ANSQUER, P. (2002). Une nouvelle approche pour caractériser les prairies naturelles et leur valeur d'usage. *Fourrages* **172**, 335-354.
- CRUZ, P., THEAU, J.-P., LECLOUX, E., JOUANY, C. and DURU, M. (2010). Typologie fonctionnelle de graminées fourragères pérennes: une classification multitraits. *Fourrages* **201**, 11-17.
- DACCORD, R., WYSS, U., KESSLER, J., ARRIGO, Y., ROUEL, M., LEHMANN, J. et JEANGROS, B. (2006). Estimation de la valeur du fourrage des prairies. Suisse : Agridea.
- DEMARQUILLY, C. et ANDRIEU, J. (1988). Les fourrages. In : Alimentation des bovins, ovins et caprins, pp. 315-337. France : INRA.

- DURU, M., CRUZ, P., THEAU, J.-P., JOUANY, C., ANSQUER, P., AL HAJ KHALED, R. et THEROND, O. (2007). Typologies des prairies riches en espèces en vue d'évaluer leur valeur d'usage: bases agro-écologiques et exemple d'application. *Fourrages*, **192**, 453-475.
- DURU, M., CRUZ, P. et THEAU, J.P. (2010a). A simplified method for characterising agronomic services provided by species-rich grasslands. *Crop & Pasture Science*, **61**, 420-433.
- DURU, M., CRUZ, P., JOUANY, C. et THEAU, J.P. (2010b). Herb'type: un nouvel outil pour évaluer les services de production fournis par les prairies permanentes. *INRA Productions Animales* **23** (4), 319-332.
- FLEURY, Ph. (1994) *Le diagnostic agronomique des végétations prairiales et son utilisation dans la gestion des exploitations agricoles. Typologies fondées sur les aptitudes des prairies à remplir des fonctions. Méthode et applications dans les Alpes du Nord*. PhD thesis, Université de Lorraine, Nancy, France.
- HOPKINS, A. et HOLZ, B. (2006). Grassland for agriculture and nature conservation: production, quality and multi-functionality. *Agronomy research* **4**, 3-20.
- INRA (2007). *Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoin des animaux-valeur des aliments. Tables INRA2007*. Versailles: INRA.
- JEANGROS, B. et SCHMID, W. (1991). Production et valeur nutritive des prairies permanentes riches en espèces. *Fourrages*, **126**, 131-136.
- JEANGROS, B., SCEHOVIC, J., SCHUBIGER, F.X., LEHMANN, J., DACCORD, R. et ARRIGO, Y. (2001). Valeur nutritive des plantes de prairies. Teneurs en matière sèche, matière azotée et sucres. *Revue suisse Agric.*, **33** (2), 73-80.
- JEANGROS, B. et AMAUDRUZ, M. (2005). Dix ans d'observations sur la phénologie des prairies permanentes en Suisse Romande. *Revue suisse Agric.*, **37** (5), 201-209.
- JOUVEN, M., CARRERE P. et 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**, 112-124.
- LEROUX, X., BARBAULT, R., BAUDRY, J., BUREL, F., DOUSSAN, I., GARNIER, E., HERZOG, F., LAVOREL, S., LIFRAN, R., ROGER-ESTRADE, J., SARTHOU, J.-P. et TROMMETER, M. (2008). Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies. pp. 1-175. France: INRA Expertise scientifique collective.
- LOUAULT, F., PILLAR, V.D., AUFRERE, J., GARNIER, E. et SOUSSANA, J.-F. (2005). Plant traits and functional types in response to reduced disturbance in a semi-natural grassland. *Journal of Vegetation Science* **16**, 151-160.
- MCINTYRE, S. (2008). The role of plant leaf attributes in linking land use to ecosystem function in temperate grassy vegetation. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **128**, 251-258.
- MOORE, K.J., MOSER, L.E., VOGEL, K.P., WALLER, S.S, JOHNSON, B.E. et FEDERSEN, J.F. (1991). Describing and quantifying growth stages of perennial forage grasses. *Agron*, **83**, 1073-1077.
- NERUSIL, P., KOHOUTEK, A., KOMAREK, P. et ODSTRCILOVA, V. (2008). Effects of utilisation intensity and fertilization level on forage production and quality of permanent grassland on a fluvisoil. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* **56** (5), 153-162.

- PONTES, L., SOUSSANA, J-F., LOUAULT, F., ANDUEZA, D. et CARRERE, P. (2007). Leaf traits affect the above-ground productivity and quality of pasture grasses. *Functional Ecology* **21** (5), 844-853.
- ROCHE, P., AZ-BURLINSON, N. et GACHET, S. (2004). Congruency analysis of species ranking based on leaf traits: which traits are the more reliable? *Plant Ecology*, **174**, 37-48.
- RODRIGUES, A., ANDUEZA, D., PICARD, F., CECATO, U., FARRUGGIA, A. et BAUMONT, R. (2008). Nutritive value and floristic composition of permanent meadows: first results of a study conducted in the Massif Central. In: 14 ° *Rencontres Recherches Ruminants*, pp. 241-244. Paris, France.
- SHENK, J.S. et WESTERHAUS, M.O. (1991). New Standardization and Calibration Procedures for Nirs Analytical Systems. *Crop Science*, **31**, 1694-1696.
- SOUSSANA, J-F. et LÜSCHER, A. (2007). Temperate grassland and global atmospheric change: a review. *Grass and Forage Science* **62**, 127-134.
- STYBNAROVA, M., SVOZILOVA, M., HAKL, J., KARABCOVA, H., POZDISEK, J. et OTRHALKOVA, P. (2010). Effect of different management on the yields, forage quality and botanical composition of permanent grassland. In: *Proceedings of the 23rd General Meeting of the European Grassland Federation*, pp. 741-743. Kiel, Germany: Grassland in a changing world.
- TALLOWIN, J.R.B. et JEFFERSON, R.G. (1999). Hay production from lowland semi-natural grasslands: a review of implications for ruminant livestock systems. *Grass and Forage Science* **54** (2), 99-115.
- THEAU, J-P. et ZEROUROU, A. (2008). Herb'âge, une méthode de calcul des sommes de température pour la gestion des prairies. In : *Les cahiers d'Orphée. Outils pour la gestion des prairies permanentes Volume 1*, pp.91-102. France : INRA.
- VIOLLE, C., NAVAS, M.L., VILE, D., KAZAKOU, E., FORTUNEL, C., HUMMEL, I. and GARNIER, E. (2007). Let the concept be functional! *OIKOS* **116**, 882-892.
- ZHU, S.X., GE, H.L., GE, Y., CAO, H.Q., LIU, D., CHANG, J., ZHANG, C.B., GU, B.J. et CHANG, S.X. (2010). Effects of plant diversity on biomass production and substrate nitrogen in a subsurface vertical flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, **36**, 1307-1313.

### 3. Conclusion générale

Dans cette partie, nous avons pu établir des liens entre la composition fonctionnelle et les critères d'aptitude fourragers retenus, que ce soit à travers les dispositifs "*Prairies Marcenat*" ou "*réseau national*" (Tableau 33).

Dans le dispositif "*réseau national*", nous avons vu que les critères d'aptitude présentaient une grande variabilité et notamment le critère de production. Nous pouvons cependant nous interroger sur la mesure de la production sur le terrain : en effet l'estimation de la production est effectuée sur des petites surfaces, ce qui peut engendrer des problèmes d'estimation.

A travers ces deux études, nous avons pu quantifier les effets des TF sur les critères de production et valeur nutritive des prairies. L'étude des TF sur un même milieu, avec trois prairies très différentes quant à leur composition en TF valident les hypothèses mises en avant (Cruz *et al.* 2002 ; Duru *et al.* 2007, 2008 ; Cruz *et al.* 2010) au premier cycle de végétation. De plus nous avons pu mettre en évidence l'effet de la composition en TF sur la production et la qualité aux deuxième et troisième cycles de végétation et quantifié ces liens pour les trois cycles. Il apparaît clairement que les prairies caractérisées par une forte proportion de graminées de type C sont moins productives. Elles présentent également un potentiel de digestibilité plus faible mais qui diminue plus lentement du fait d'une phénologie plus tardive et d'une production plus faible. L'étude de ces liens sur le "*réseau national*" et à quelques périodes de l'année confirme l'effet de la proportion de graminées de type C sur la production et la qualité. Toutefois, les TF à eux seuls ont une capacité limitée à expliquer la variabilité de la production et de la valeur nutritive des prairies permanentes à l'échelle d'un réseau national. En effet, la proportion de légumineuses et de diverses contribuent également fortement à expliquer la variabilité de la production et de la qualité.

Notre étude révèle également l'intérêt de critères globaux mesurés à l'échelle de la prairie comme le stade moyen de végétation et la teneur en MS pour expliquer les variations de production et de qualité. Enfin, cette étude nous a permis de montrer que la somme de température, avec la connaissance des états de végétation, contribue significativement à prévoir la production et la qualité des prairies au printemps.

Dans ce chapitre, nous n'avons pas étudié les liens entre les états de la végétation et les critères d'aptitude des services environnementaux. Ces critères sont très liés à la composition botanique et fonctionnelle des prairies permanentes. Par exemple, le critère de nombre

d'espèces à statut de protection est très lié à la présence en espèces répertoriées sur des listes de protection. Ces critères d'aptitude peuvent être calculés directement par des outils comme e-FLORA-sys. Les critères d'aptitude identifiés pour estimer la diversité ordinaire sont la diversité en espèces et leur abondance relative. Ces deux critères sont complémentaires : nous les étudierons donc tous les deux par la suite. Pour l'étude de la diversité patrimoniale, nous travaillerons uniquement sur le nombre d'espèces oligotrophes. Nous n'étudierons pas le nombre d'espèces à statut de protection car nous n'avons pas recensé d'espèces sur liste rouge ou faisant l'objet d'une protection régionale sur notre réseau de parcelles. Le seul critère identifié pour l'évaluation de la pollinisation est la quantité de nectar disponible. Nous conserverons donc ce critère d'aptitude. Enfin le dernier service environnemental étudié est l'aspect esthétique de la parcelle dans le paysage. Nous avons identifié deux critères, la variété et l'intensité des couleurs et la variété du couvert, que nous conserverons. L'outil mis en place par Pa. Fleury (1995) les prend en compte.

**Tableau 33. Récapitulatif des liens mis en évidence entre la composition fonctionnelle (types fonctionnels (TF) B, b et C, proportion de graminées légumineuses et diverses, teneur en matière sèche (MS) et stade moyen) et les critères d'aptitude fourragers (production, digestibilité (dMO) et teneur en matière azotée totale MAT)).**

		Production			dMO			MAT			
		Potentiel de production (P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub> et production annuelle)	Repousses	Croissance	Potentiel (P <sub>1</sub> , P <sub>3</sub> et P <sub>4</sub> )	P <sub>2</sub>	Stabilité (P <sub>2</sub> -P <sub>1</sub> )	Potentiel (P <sub>1</sub> , P <sub>3</sub> et P <sub>4</sub> )	P <sub>2</sub>	Stabilité (P <sub>2</sub> -P <sub>1</sub> )	
<i>Prairies Marcenat</i>	TF A	+++	++	.	---	---	.	---	---	.	
	TF Bb	+++	++	.	---	---	.	---	---	.	
	TF C	+	+	.	--	--	.	--	--	.	
<i>Réseau national</i>	H <sub>1</sub>	Proportion de légumineuses	---	-	0	+++	+++	+++	++	+++	++
		Proportion de diverses	--	0	--	++	+	+++	0	0	+++
		TF B	0	0	0	0	0	0	0/+	0	--
		TF b	-/+	0	0	0	0	+	0	0	0
		TF C	--	0	+	---	0	+++	0/-	0	0
	H <sub>2</sub>	stade moyen	++	.	0	---	---	---	---	---	-
		teneur en MS	--	--	0	---	---	0	---	---	0
	H <sub>3</sub>	Proportion de légumineuses	--	-	-	+++	+++	+++	++	+++	+
		Proportion de diverses	--	0	---	++	0	+++	0	0	+++
		TF B	0	0	0	0	0	0	0	0	--
		TF b	+/0	0	0	0	--	0	0	0	0
		TF C	-	0	0	---	0	+++	0	0	0
		stade moyen	+++	.	0	---	---	--	---	---	-
teneur en MS	--	--	0	---	---	0	---	---	0		

+++ : effet positif très important ; ++ : effet positif important ; + : effet positif ; --- : effet négatif très important ; -- : effet négatif important ; - : effet négatif ; 0 : pas d'effet. Le TF A n'est pas mentionné car il est corrélé aux autres TF. La proportion de graminées n'est pas mentionnée car elle est corrélée à la proportion de légumineuses et de diverses. La production est répartie selon son potentiel au printemps, les repousses et la croissance de printemps. La dMO et la MAT sont réparties selon leur potentiel incluant le printemps, l'été et l'automne, selon les valeurs de P<sub>2</sub> qui représentent un stade la prairie avancé et selon leur stabilité au printemps.



# **Chapitre 4**

**Une méthode pour lier les critères  
d'aptitude aux services fourragers  
et environnementaux des prairies  
permanentes**



Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux **liens entre d'une part les services fourragers et environnementaux et d'autre part les critères d'aptitude** des prairies permanentes à rendre ces services (Figure 32). Rappelons que l'objectif de la thèse est de développer une méthode permettant de prédire, à partir de la végétation, des conditions du milieu et des pratiques de gestion, **l'aptitude** des prairies permanentes à rendre des services fourragers et environnementaux. Nous nous sommes donc fixés pour ambition d'aller des descripteurs (climat, sol, pratiques) jusqu'aux critères d'aptitude. Sur la question du passage des critères aux services, le temps imparti pour le travail de thèse ne permettait pas d'envisager de construire des modèles ou des indicateurs complets, et de valider ces approches. L'ambition du présent chapitre est donc de proposer une méthode permettant ultérieurement d'atteindre cet objectif, et de l'illustrer par quelques exemples. Nous proposons d'utiliser une méthode d'analyse multicritère (DEXi<sup>®</sup>) pour montrer comment et dans quelle mesure les résultats de notre travail peuvent être mobilisés pour construire des règles de décision. Cette démarche sera appliquée à l'évaluation des services rendus par 4 types de prairie pour 7 services fourragers et environnementaux. A ces 7 services étudiés dans la thèse, nous proposons également d'ajouter des propositions sur l'évaluation d'un service supplémentaire mais dont l'évaluation n'a pu être conduite sur le terrain dans le travail de thèse : la valeur esthétique des prairies.

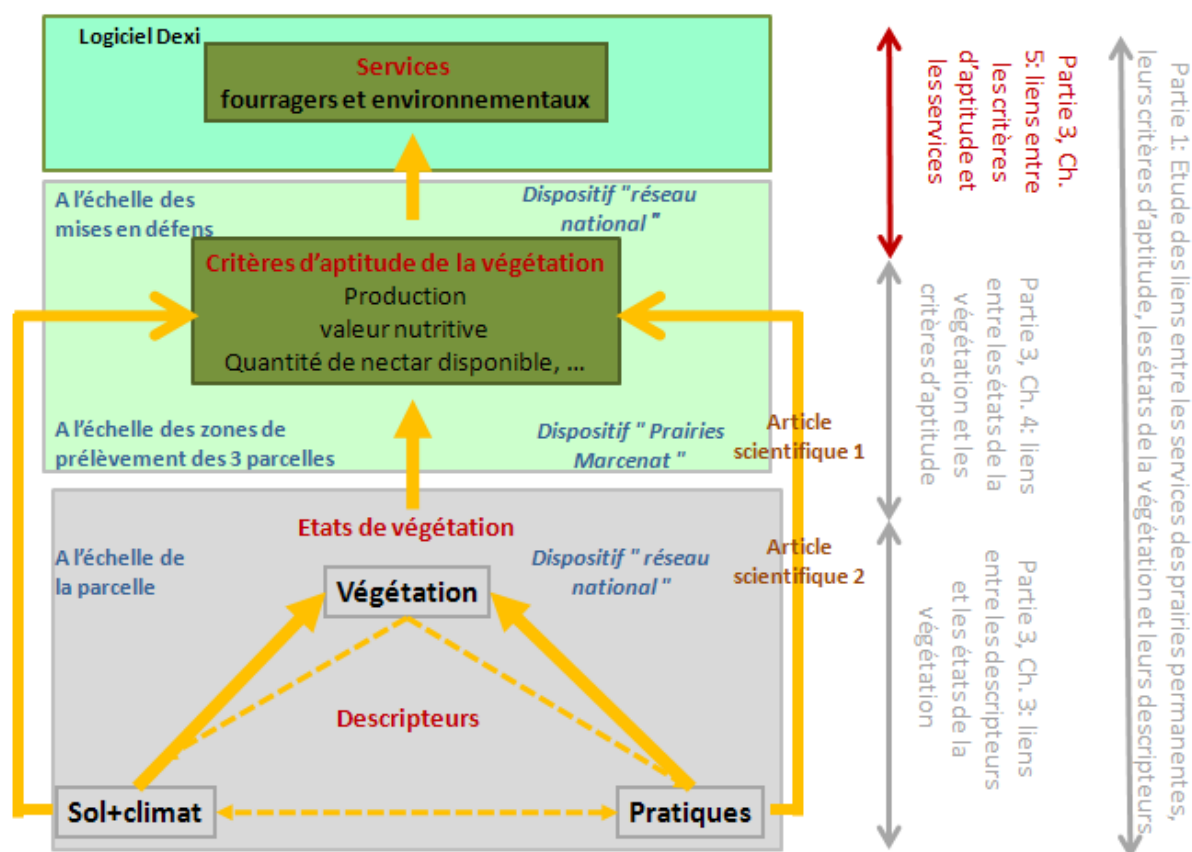


Figure 32. Démarche du travail de thèse illustrée par les dispositifs mis en place et les articles scientifiques rédigés.

### 1. Le choix d'une méthode d'analyse multicritères

Les chapitres précédents ont montré que les services fourragers ou environnementaux assurés par les prairies permanentes étaient généralement déterminés par plusieurs critères. Certains de ces critères (ou des liens entre critères et services) sont quantifiables et ont été formalisés sous forme de modèles. Pour d'autres critères (ex portance du sol, type d'habitat, ...) cette quantification n'a pas été réalisée ou est difficilement réalisable. Nous avons donc recherché des méthodes permettant d'évaluer le niveau d'accomplissement des services en prenant en compte plusieurs critères de nature différente (qualitatif/quantitatif).

Les méthodes d'analyse multicritères ont pour but de choisir, de classer ou de trier des options ou stratégies sur des critères (ou attributs) multiples et parfois contradictoires. Depuis 30 ans, ces méthodes dites de MCDA (Multi-Criteria Decision Analysis) ont connu un fort développement (Figueira *et al.* 2005). Il existe deux familles de méthodes (Hwang et Yoon 1981): les Multi-Objective Decision Making (MODM) et les Multi-Attribute Decision

Making (MADM). Les MADM sont les méthodes les plus fréquentes et elles présentent l'intérêt de pouvoir comparer des situations d'un nombre fini d'options (dans notre cas des types de prairies) avec de nombreux critères (dont une partie contradictoires). Les MADM sont basées sur l'agrégation de jugements pour chaque critère et pour chaque alternative ainsi que sur le classement des alternatives selon des règles d'agrégation.

Parmi les MADM, la méthode DEXi<sup>®</sup> développée par une équipe de mathématiciens slovènes (Bohanec et Rajkovic, 1990) a retenu notre attention car DEXi<sup>®</sup> :

- est une méthode d'analyse multicritère ;
- permet de gérer des critères qualitatifs ;
- ne nécessite pas d'avoir quantifié ou modélisé tous les liens entre les critères et les résultats des règles de décisions (les services dans notre cas). Ces résultats sont exprimés sous forme d'une évaluation qualitative (ex : service pas, peu, bien ou très bien rendu) ;
- est basé sur des règles de décision qui sont explicites et peuvent être comprises et critiquées par des experts du domaine. Ces règles prennent la forme "*si ... et si ... alors*". Par exemple, *si* la valeur nutritive du fourrage est bonne *alors* le service "stock exclusif de bonne qualité au printemps" est bien réalisé ;
- comparé à d'autres méthodes MCDA, utilise des "fonctions d'utilité" (ou règles de décision) qui permettent de donner des poids différents à différents critères.

En outre, les auteurs de DEXi<sup>®</sup> ont développé une application informatique libre et conviviale (Bohanec 2009) qui permet de développer simplement des arbres de décision multicritère. DEXi<sup>®</sup> a été utilisé avec succès pour l'évaluation multicritère de la durabilité de systèmes de culture (Sadok *et al.* 2009) ou de la durabilité de systèmes d'élevage bovins laitiers herbagers (Gerber *et al.* 2009). DEXi<sup>®</sup> combine des informations issues de systèmes experts et du domaine de l'apprentissage automatique (Sadok *et al.* 2009)

L'arbre d'évaluation multicritère mis en place dans DEXi<sup>®</sup> peut être comparé à un arbre dont les feuilles seraient les critères de base ou attributs (ex : digestibilité du fourrage, diversité des espèces floristiques, ...), les branches fines les critères agrégés (ex : en associant les critères "diversité des espèces floristiques" et "type d'habitat" on obtient la "niveau de conservation de la diversité ordinaire") et les branches principales les grands domaines d'évaluation (ex : services fourragers et services environnementaux). Le tronc représente l'évaluation finale

entièrement agrégée (si elle est pertinente et souhaitée). Il est possible de s'intéresser aux différents niveaux d'agrégation de l'arbre, par exemple pour se demander si une prairie rend de manière satisfaisante des services fourragers, ou si elle rend bien tel ou tel service.

Les attributs sont définis en classes sous forme de variable qualitative (ex : production d'herbe en P2 faible, forte, moyenne, ...). Les classes sont affectées de seuils (ex : production en P2 faible = inférieure ou égale à 3 tMS/ha). Pour agréger  $n$  critères, on combine toutes leurs modalités et on définit des règles de décision, comme illustré dans l'exemple ci-dessous (2 critères avec 3 modalités par critère).

**Tableau 34. Exemple d'agrégation entre deux critères ou attributs et résultats de la règle de décision.**

Critère 1 (attribut 1) : digestibilité du fourrage	Critère 2 (attribut 2) : teneur en matières azotées totale (MAT)	Résultat de la règle de décision : valeur nutritive
Faible	Faible	Faible
Faible	Moyen	Faible
Faible	Fort	Moyen
Moyen	Faible	Faible
Moyen	Moyen	Moyen
Moyen	Fort	Fort
Fort	Faible	Moyen
Fort	Moyen	Fort
Fort	Fort	Fort

Dans DEXI®, le nombre de critères et de modalités par critères est libre. Le résultat de la règle de décision peut être soit entièrement décidée par expertise, soit calculée par DEXI® en tenant compte si souhaité d'une pondération des critères. On peut ainsi décider pour l'exemple ci-dessus que la digestibilité intervient pour 80% dans le résultat de la règle de décision et la MAT pour 20%.

## 2. Evaluation des services fourragers et environnementaux par une approche multicritères

Cette partie vise à décrire et expliquer d'une part les choix opérés pour la construction de notre arbre d'évaluation multicritère DEXi<sup>®</sup> des différents services et d'autre part dans quelle mesure les services fourragers et environnementaux peuvent être conciliés. Trois services environnementaux ainsi que quatre services fourragers sont étudiés afin d'explicitier la méthode de construction de l'évaluation des services ainsi que la méthode d'évaluation conjointe des services fourragers et environnementaux pour une prairie. Cette démarche est illustrée pour quatre types de prairies mis en évidence dans le cadre de la construction de la typologie nationale des prairies à partir de l'étude du "*réseau national*" (Annexe 5). Ces quatre types de prairies constituent des types de prairies d'altitude extensives (PA1), de plaines et collines très fertilisées (PSC5), de l'ouest humides et intensifiées (PO1) et atlantiques très humides et peu fertilisées (PL1).

### *Construction des arbres de décision, agrégation des critères*

Pour construire l'arbre de décision, nous avons d'abord repris les différents critères d'aptitude identifiés dans la partie 1 du travail de thèse pour chaque service. Ces critères sont résumés dans le tableau 35.

**Tableau 35. Critères d'aptitude à prendre en compte dans la démarche multicritères d'évaluation des services fourragers et environnementaux des prairies permanentes.**

<b>SERVICES ENVIRONNEMENTAUX</b>	<b>CRITERES D'APTITUDE</b>
<b>Pollinisation</b>	Quantité de nectar disponible, date de floraison
<b>Maintien de la diversité ordinaire</b>	Diversité des espèces floristiques, type d'habitat
<b>Maintien de la diversité patrimoniale</b>	Nombre d'espèces à statut de protection, nombre d'espèces oligotrophes
<b>SERVICES FOURRAGERS</b>	
<b>Stock de bonne qualité au printemps et pâturage de bonne qualité pour les animaux exigeants</b>	P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub> , P <sub>3</sub> , P <sub>4</sub> , dMO (fauche) P <sub>1</sub> , dMO (fauche) P <sub>2</sub> , dMO (pâturage) P <sub>3</sub> , dMO (pâturage) P <sub>4</sub> , portance du sol, aptitude au séchage
<b>Stock exclusif de bonne qualité au printemps et en été</b>	P <sub>2</sub> , P <sub>3</sub> , dMO (fauche) P <sub>2</sub> , dMO (fauche) P <sub>3</sub> , aptitude au séchage
<b>Stock sans attente de qualité au printemps et pâturage des repousses en été automne des animaux à faibles besoins</b>	P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub> , P <sub>3</sub> , P <sub>4</sub> , dMO (fauche) P <sub>1</sub> , dMO (fauche) P <sub>2</sub> , dMO (pâturage) P <sub>3</sub> , dMO (pâturage) P <sub>4</sub> , portance du sol, aptitude au séchage
<b>Stock exclusif de printemps sans attente de qualité</b>	P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub> , dMO (fauche) P <sub>1</sub> , dMO (fauche) P <sub>2</sub> , aptitude au séchage
<b>Pâturage de qualité toute l'année (sauf l'hiver) des animaux exigeants, avec forte contribution à la ration</b>	P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub> , P <sub>3</sub> , P <sub>4</sub> , dMO (pâturage) P <sub>1</sub> , dMO (pâturage) P <sub>2</sub> , dMO (pâturage) P <sub>3</sub> , dMO (pâturage) P <sub>4</sub> , portance du sol
<b>Nourrir les animaux à besoins exigeants à l'herbe de la fin de printemps à l'automne avec un apport extérieur possible</b>	P <sub>2</sub> , P <sub>3</sub> , P <sub>4</sub> , dMO (pâturage) P <sub>2</sub> , dMO (pâturage) P <sub>3</sub> , dMO (pâturage) P <sub>4</sub> , portance du sol
<b>Finition à l'herbe au printemps avec utilisation possible en été et automne</b>	P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub> , P <sub>3</sub> , P <sub>4</sub> , dMO (pâturage) P <sub>1</sub> , dMO (pâturage) P <sub>2</sub> , dMO (pâturage) P <sub>3</sub> , dMO (pâturage) P <sub>4</sub> , portance du sol
<b>Faire pâturer les animaux l'hiver et poursuivre l'utilisation au printemps</b>	P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub> , P <sub>4</sub> , dMO (pâturage) P <sub>1</sub> , dMO (pâturage) P <sub>2</sub> , dMO (pâturage) P <sub>4</sub> , portance du sol
<b>Pâturage d'ajustement sans attente de qualité et sans catégorie d'animaux préférentielle</b>	P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub> , P <sub>3</sub> , P <sub>4</sub> , dMO (pâturage) P <sub>1</sub> , dMO (pâturage) P <sub>2</sub> , dMO (pâturage) P <sub>3</sub> , dMO (pâturage) P <sub>4</sub> , portance du sol
<b>Nourrir des animaux à faibles besoins à l'herbe du printemps à l'automne sans apport extérieurs et sans attente de qualité</b>	P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub> , P <sub>3</sub> , P <sub>4</sub> , dMO (pâturage) P <sub>1</sub> , dMO (pâturage) P <sub>2</sub> , dMO (pâturage) P <sub>3</sub> , dMO (pâturage) P <sub>4</sub> , portance du sol

Pour les 7 services retenus en tant qu'exemple, nous avons ensuite construit un arbre (Figure 33).



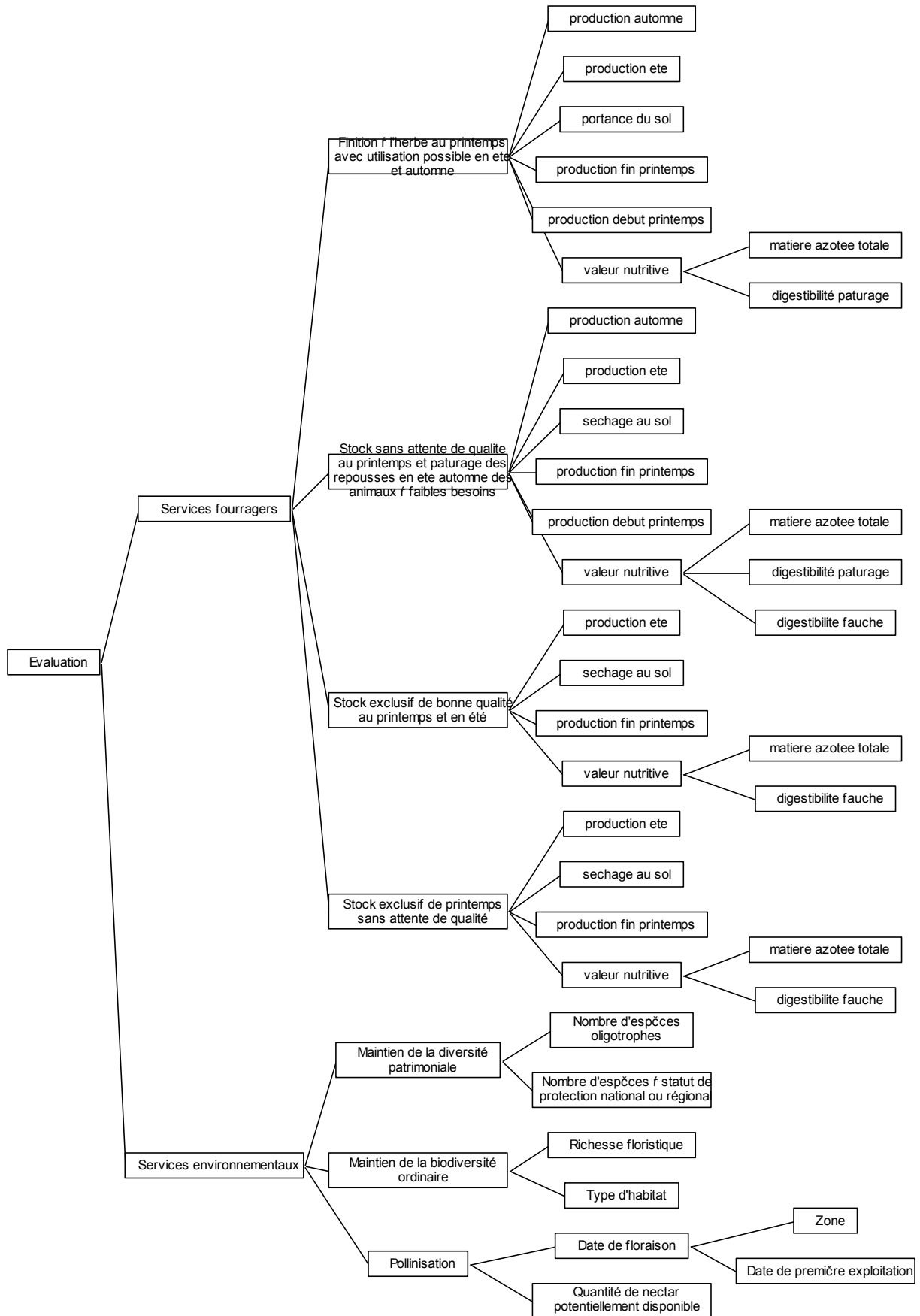


Figure 33. Proposition d'arbre DEXI pour 7 services fourragers et environnementaux.

La mise en place des seuils pour chaque critère, a été effectuée par un travail d'expertise. Nous avons utilisé les deux méthodes de construction possibles dans DEXi<sup>®</sup> : i) manuellement, en décidant pour chaque combinaison de critères le résultat des règles de décision (ex : dMO faible et MAT moyenne => valeur nutritive moyenne), et ii) automatiquement, en attribuant un poids à chaque critère (ex : poids de la MAT : 60% ; poids de la dMO : 40%) et en renseignant les deux combinaisons extrêmes, c'est-à-dire la pire et la meilleure des propositions (ex : MAT faible et dMO faible => valeur nutritive faible, MAT forte et dMO forte => valeur nutritive forte).

Pour les services fourragers, nous avons choisi d'illustrer la méthode avec 4 services, deux plutôt orientés vers la production de stock de fourrage, un orienté vers l'utilisation en pâturage, et un en utilisation mixte. Pour chacun de ces services nous avons considéré que le résultat de la règle de décision serait "faible", "moyen" ou "fort", ce qui sera ensuite représenté sur un diagramme radar de résultat respectivement par les valeurs 1, 2, 3 (échelle de notation arbitraire). Pour chaque attribut ou chaque critère agrégé, nous avons défini des seuils qui sont détaillés dans la figure 34. L'attribution des seuils est le résultat d'une expertise, tenant notamment compte de la distribution des valeurs trouvées dans l'échantillon des 190 parcelles étudiées. Nous avons utilisé les critères d'aptitude de production (aux dates de prélèvement P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub> et P<sub>4</sub>), de qualité (valeur nutritive : dMO en P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub> et P<sub>4</sub> ; MAT en P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub> et P<sub>4</sub>) ainsi qu'un critère de portance du sol pour les services liés au pâturage (portance ou non), et un critère d'aptitude au séchage au sol pour les services liés à la fauche (pourcentage de talles en épis et plus). Ces deux derniers critères n'avaient pas été intégrés aux modèles des chapitres précédents mais doivent l'être pour ce passage des critères d'aptitude au service. En effet, nous avons souhaité évaluer la valeur alimentaire et la production des prairies indépendamment du fait que le fourrage puisse être récolté (fauche ou pâture). A ce stade du passage des critères d'aptitude au service, il s'avère par contre important d'intégrer le fait que la parcelle soit portante ou non. Une très bonne qualité et quantité de fourrage est en effet inutile pour l'éleveur si il n'est pas en mesure de l'utiliser.

**Valeur nutritive**

1. faible
2. moyen
3. fort

**Digestibilité fauche P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub> et P<sub>4</sub>** (dMO fauche uniquement (%))

1. faible  $\leq 65$  %
2. moyen entre 66 et 74 %
3. fort  $\geq 75$  %

**Digestibilité pâturage** (dMO pâturage uniquement)

1. faible  $\leq 68$ %
2. moyen entre 69 et 79%
3. fort  $\geq 80$ %

**Matière azotée totale** (mat (g/kg MS))

1. faible  $\leq 90$  g/kg MS
2. moyen entre 91 et 179 g/kg MS
3. fort  $\geq 180$  g/kg MS

**Séchage au sol P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>** (pourcentage talles épiés et suite (epiaison, floraison, maturation) (%))

1. faible  $\geq 60$  %
2. moyen entre 41 et 59 %
3. fort  $\leq 40$  %

**Portance du sol** (enfouissement des animaux)

1. problème de portance
2. pas de problème de portance

**Production**

1. faible
2. moyen
3. fort

**Production début printemps** (production P<sub>1</sub> (t MS/ha))

1. faible  $\leq 0.5$  t MS/ha
2. moyen entre 0.5 et 1.9 t MS/ha
3. fort  $\geq 2$  t MS/ha

**Production fin printemps** (production P<sub>2</sub> (t MS/ha))

1. faible  $\leq 3$  t MS/ha
2. moyen entre 3.1 et 4.9 t MS/ha
3. fort  $\geq 5$  t MS/ha

**Production été** (production P<sub>3</sub> (t MS/ha))

1. faible  $\leq 0.5$  t MS/ha
2. moyen entre 0.6 et 1.4 t MS/ha
3. fort  $\geq 1.5$  t MS/ha

**Production automne** (production P<sub>4</sub> (t MS/ha))

1. faible  $\leq 0.4$  t MS/ha
2. moyen entre 0.5 et 1.1 t MS/ha
3. fort  $\geq 1.2$  t MS/ha

**Figure 34. Attribution des seuils pour les services fourragers.**

En ce qui concerne les services environnementaux, nous avons retenu trois services (Tableau 35) : la pollinisation, le maintien de la biodiversité ordinaire, et le maintien de la biodiversité patrimoniale. Un quatrième service, lié à la valeur esthétique des prairies, n'a pu être pris en compte à ce niveau, car il nécessiterait, pour passer des critères d'aptitude (aspect des

prairies) au service, d'intégrer la perception par différents acteurs de cette qualité esthétique. Nous apporterons à la fin de ce chapitre des éléments sur ce service particulier. Pour le service de pollinisation, c'est-à-dire la capacité des prairies à maintenir des populations d'insectes pollinisateurs, nous avons considéré que la quantité de nectar disponible était le facteur principal, et qu'il pouvait être estimé par la proportion d'espèces entomogames. Il s'agit ici bien entendu d'une simplification importante et donc d'une première approximation à des fins opérationnelles, la valeur d'une prairie pour les pollinisateurs ne pouvant être réduite à un seul critère. Ce potentiel a été croisé avec la précocité de floraison afin de tenir compte du fait qu'une prairie, même riche en espèces entomogames, n'a pas d'intérêt pour les insectes si elle est exploitée avant la floraison des espèces intéressantes pour ces insectes. Cette date est à moduler selon les zones (l'état de la végétation n'est pas le même le 1<sup>er</sup> avril au bord de l'atlantique ou sur les sommets jurassiens), ce qui explique que la précocité de floraison soit issue de règles de décision associant date de première exploitation et le type de zone (Figure 35). L'évaluation du service de maintien de la diversité ordinaire est basée sur la richesse floristique qui est modulée selon le type d'habitat. Ceci permet de prendre en compte que les prairies sur sol acide ont généralement une richesse floristique plus faible que les prairies sur sols calcaires, de même que pour les prairies pâturées en comparaison des prairies de fauche. L'abondance relative n'a pas été considérée car la richesse spécifique suffit à évaluer ce service. La diversité patrimoniale s'appuie sur le nombre d'espèces à statut de protection national ou régional, sur le nombre d'espèces menacées inscrites sur la liste rouge de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN), ainsi que sur le nombre d'espèces oligotrophes. Contrairement aux services fourragers, nous avons retenu des échelles qualitatives d'évaluation des services allant de 4 (pollinisation, maintien de la diversité patrimoniale) à 5 (maintien de la biodiversité ordinaire) niveaux. Dans un souci d'harmonisation en vue de la représentation graphique, ces échelles sont toutes ramenées sur une échelle à 4 niveaux de 0 à 3.

**Pollinisation**

1. Nulle ou faible
2. Moyenne
3. Elevée
4. Très élevée

**Quantité de nectar potentiellement disponible** (dominance des espèces à reproduction partiellement ou totalement entomogames)

1. faible <10%
2. moyenne 10-25%
3. Elevée >25%

**Date de floraison** (date de première exploitation en fonction de la situation géographique)

1. Précoce
2. Moyen
3. Tardif

**Date de première exploitation**

1. avant le 1er avril
2. 1-30 avril
3. 1-31 mai
4. 1-30 juin
5. après le 1er juillet

**Zone**

1. Littoral atlantique - altitude <30m
2. Conditions océaniques - altitude 30-250m
3. Conditions semicontinentales - altitude 150-600 m
4. Altitude 600-1500m
5. Altitude > 1500m

**Maintien de la biodiversité ordinaire**

1. Très peu diversifié
2. Peu diversifié
3. Moyennement diversifié
4. Diversifié
5. Très diversifié

**Type d'habitat**

1. Prairies de fauche d'altitude
2. Prairies pâturées d'altitude
3. Prairies acides des plaines et collines pH < 5
4. Prairies neutres des plaines et collines pH entre 5 et 7
5. Prairies calcaires des plaines et collines pH >7

**Richesse floristique**

Nombre total d'espèces (station ou faciès)

1. <10
2. 10-20
3. 20-30
4. 30-40
5. 40-60
6. >60

**Maintien de la diversité patrimoniale**

1. Nul
2. Faible
3. Moyen
4. Elevé

**Nombre d'espèces à statut de protection national ou régional**

1. Aucune espèce à statut patrimonial
2. Au mini 1 espèce à statut de protection régionale ou nationale
3. Au mini 1 espèce sur liste rouge UICN

**Nombre d'espèces oligotrophes**

1. <5
2. 5-15
3. 15-25
4. >25

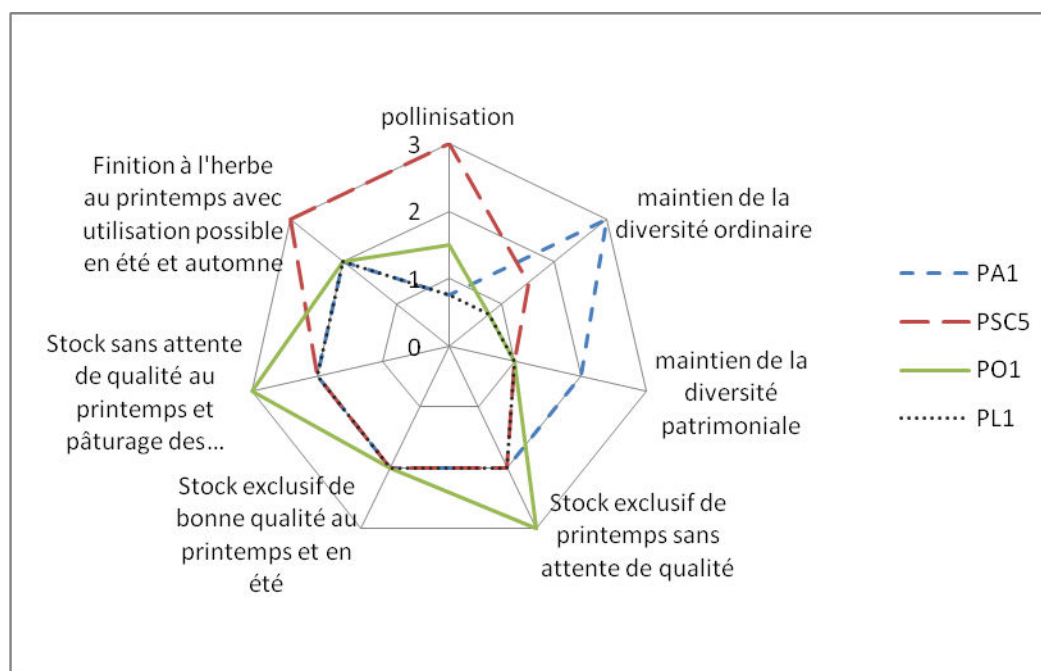
**Figure 35. Attribution des seuils pour les services environnementaux.**

*Exemple d'utilisation pour la prédiction des services rendus par les prairies*

Une fois l'outil d'évaluation multicritère élaboré, plusieurs utilisations sont envisageables :

- i) la comparaison, pour un service donné, des performances de différentes prairies ou de différents types de prairie ;
- ii) la comparaison, pour une prairie ou un type de prairie, de la manière dont elle rend plus ou moins bien chacun des services fourragers et environnementaux ;
- iii) la comparaison globale des "profils de service" rendus par un ensemble de prairies ou type de prairie. Nous avons illustré cette démarche à l'aide des 7 services étudiés et des quatre types de prairies (Figure 36).

Les résultats de cet exemple doivent être considérés comme une illustration de la méthode, en l'absence d'une discussion approfondie sur les critères, les seuils, les pondérations, et en l'absence d'une validation. Cette réserve posée, nous pourrions dire que des profils de service assez différents apparaissent d'un type de prairie à l'autre. Ces profils n'opposent pas systématiquement des services fourragers et des services environnementaux. Le profil PA1 apparaît ainsi comme très favorable au maintien de la biodiversité ordinaire et dans une moindre mesure au maintien de la diversité patrimoniale mais il n'est pas favorable à la pollinisation. Si le type PO1 est plus orienté vers les services fourragers, le type PSC5 associe la bonne réalisation de services fourragers et environnementaux. Le type PL1 apparaît enfin comme assurant difficilement les 7 services considérés dans cet exemple, ce qui ne présage en rien d'autres services assurés par ce type de prairie.



**Figure 36. Exemple d'évaluation de quatre services fourragers et trois services environnementaux pour quatre types de prairies : des prairies d'altitude extensives (PA1), de plaines et collines très fertilisées (PSC5), de l'ouest humides et intensifiées (PO1) et atlantiques très humides et peu fertilisées (PL1).**

Cette démarche permet donc d'évaluer un service donné pour une prairie ou un type de prairie, à partir des critères d'aptitude mais aussi de montrer dans quelle mesure une prairie ou un type de prairie peut concilier des services fourragers et environnementaux. Cette méthode nécessite de bien affiner les attributs et leurs seuils afin de faciliter la compréhension par les autres utilisateurs et la réalisation de cette étape.

### 3. Evaluation de l'aspect esthétique d'une prairie permanente

#### *Préambule*

Comme indiqué précédemment, ce service pose la question de la subjectivité dans l'appréciation du côté esthétique des prairies. L'aspect visuel et esthétique de la prairie est porteur de sensations, d'émotions, mais aussi de représentations de l'agriculture, des modes de production et de la qualité des produits agricoles, mais la perception diffère selon les acteurs "spectateurs" (randonneurs ou agriculteurs, citadins ou ruraux ...) (Guisepelli et Fleury 2003). Dans sa thèse, Pascale Fleury (1995) avait clairement montré qu'en présence des mêmes caractéristiques visuelles, l'appréciation esthétique d'une prairie pouvait

sensiblement différer entre des catégories de personnes (touristes, agriculteurs, élus locaux, ruraux non agricoles, ....), ainsi qu'entre des individus au sein d'une même catégorie de personne. En outre, la valeur esthétique de la prairie n'est pas identique selon que l'on en est proche (vision de détails de floraison ou de forme de végétation, présence d'insectes, ...) ou éloigné (rôle dans l'ouverture du paysage, jeux de couleurs dominantes, ...). A terme, la démarche DEXI<sup>®</sup> devrait permettre de passer, pour ce service, des critères d'aptitude (variété des couleurs et intensité globale de floraison, variété du couvert ou type de grain) au service (qualité esthétique pour chaque catégorie ou profil de personne). L'approche que nous proposons, et qui est décrite ci-dessous, se situe à mi-chemin entre les critères et les services, en proposant de constituer des groupes de prairies selon leur aspect visuel. La formalisation de ce service sous forme d'arbre DEXi<sup>®</sup> nécessite encore un travail sur la perception de ces états visuels, qu'il n'était pas envisageable d'aborder dans le temps imparti pour la thèse.

#### *Evaluation de l'aspect esthétique des prairies : description de la méthode Fleury*

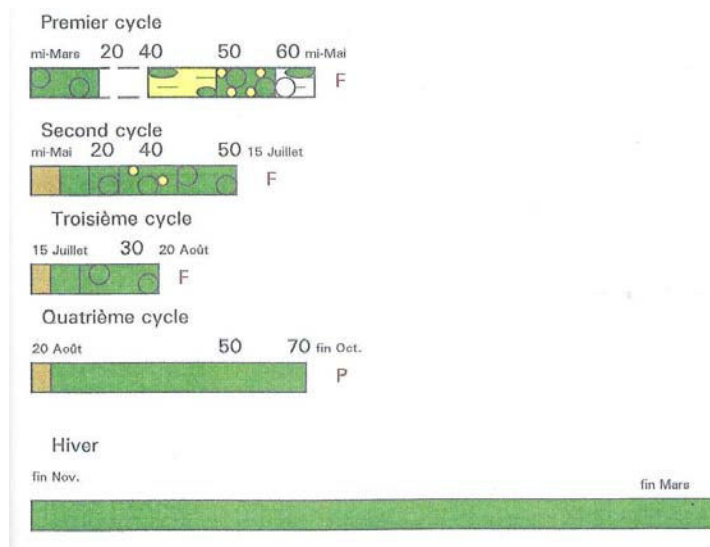
L'outil mis en place par Pa. Fleury (1995) repose sur une notation de l'aspect esthétique de la parcelle à un instant  $t$ , en tenant compte de deux critères d'aptitude (variété et intensité des couleurs, variété du couvert) et des états de la végétation. La construction de cet outil est basée sur un suivi pointu des états visuels de la végétation (dominance en espèces, stade de la végétation, hauteur, ...), des teneurs en azote dans le sol et de la production agricole. Les caractéristiques de production agricole ont été récoltées sur deux années de suivi et les données liées à la végétation et aux teneurs en azote sur une année de suivie. L'acquisition des données de végétation s'est appuyée sur un suivi hebdomadaire au premier cycle de végétation et au début du deuxième cycle de végétation, sur un suivi bimensuel en été et sur un suivi mensuel le reste de l'année. Au total, 180 observations ont été faites sur 20 à 25 parcelles suivies (Pa Fleury, 1995). Cet outil intègre donc, par rapport à notre démarche de travail, les liens entre les descripteurs et les états de la végétation ainsi que les liens entre les états de la végétation et les critères d'aptitude. A partir de ces données, Pa. Fleury (1995) a construit une classification des états visuels en 13 classes. Celle-ci s'appuie sur des états de la végétation, avec des repères visuels (dominance, couleur, ...) et des repères phénologiques (stade de développement, durée de repousse, ...) (Figure 18 et 37). Chaque classe est représentée par un pictogramme caractérisant la couleur dominante (abondance des floraisons et les couleurs de floraison) et le type de grain (régulier, moyen à grossier ou grossier). Des repères phénologiques et de hauteur de végétation sont également ajoutés dans la



caractérisation de la classe. Ainsi l'utilisation de cette grille de notation sur une prairie permet de construire un calendrier des états visuels dans le temps, en considérant les différents cycles de végétation (exemple Figure 38). Ces calendriers des états visuels contribuent à évaluer l'aspect esthétique d'une prairie. En effet, la prairie permanente est caractérisée par une évolution des couleurs et du type de grain au cours de l'année. Notre démarche s'arrêtera au niveau des calendriers des états visuels.



**Figure 37. Illustration photographique des pictogrammes représentant les 13 classes d'états visuels (Pa. Fleury 1995).**



**Figure 38. Exemple d'un calendrier des états visuels pour une parcelle suivie une année (Pa. Fleury 1995).**

*Evaluation de l'aspect esthétique des prairies permanentes : application au "réseau national"*

















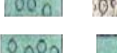













Nous avons utilisé cette démarche mise en place pour les prairies de fauche dans les Alpes du Nord, sur le dispositif "réseau national". Nous avons donc travaillé sur 190 prairies permanentes, avec pour objectif d'étudier dans quelle mesure cet outil peut être utilisé au niveau national pour prédire l'aspect esthétique d'une parcelle. La notation de l'aspect esthétique des prairies permanentes a été effectuée sur le "réseau national" en 2010 uniquement et aux quatre prélèvements, soit deux mesures au printemps (1<sup>o</sup> cycle de végétation), une en été (2<sup>o</sup> cycle de végétation) et une en automne (3<sup>o</sup> cycle de végétation). La méthode de traitement a consisté à regrouper les prairies selon leur similitude quant aux calendriers des états visuels, à partir des pictogrammes identifiés à chaque prélèvement. Ce regroupement a été effectué visuellement. Nous avons regroupé uniquement les parcelles dont au moins deux notations sur quatre étaient disponibles, en effectuant un premier regroupement sur les parcelles dont les quatre informations étaient disponibles. Ainsi 137 parcelles ont été conservées. Les prairies ont ainsi été regroupées en 10 groupes correspondant à 10 calendriers des états visuels différents (Tableau 36). Le nombre de parcelles par groupe est variable (de 2 à 57) mais trois groupes ressortent du fait de leur effectif important. La classe 3 est caractérisée par des prairies qui mûrissent en fin de printemps mais qui restent riches en couleurs. La classe 4 présente une couleur verte toute l'année avec un type de grain variable ; la fin de printemps est cependant caractérisée par une couleur verte et très fleurie. La classe 9 est la plus présente dans le réseau de parcelles. Ce sont les parcelles de couleur verte toute l'année avec une apparition possible de coloris jaunes et pour tout type de grain.

Cet outil nous a permis de montrer que les prairies permanentes présentent une grande diversité de couleurs, liée à la diversité des espèces spontanées et sauvages retrouvées dans les prairies permanentes. Cependant certaines classes sont présentes de façon plus importante, ce qui peut caractériser une tendance à l'homogénéisation des pratiques de gestion. En effet, la classe 9 caractérise des parcelles utilisées en usage mixte dont le couvert reste toujours vert, avec la présence de jaune au printemps, et un type de grain changeant dans le temps. Les mesures que nous avons effectuées ont été faites avec quatre répétitions seulement, ce qui nécessite de prendre avec précaution les résultats. De plus, beaucoup de parcelles n'avaient que deux notations dans l'année. Les classifications de parcelles ont donc parfois été faites sur peu de parcelles avec des données complètes. Par ailleurs, cette classification a posé quelques soucis dans la notation. En effet, les données de hauteur de végétation et de phénologie

n'étaient pas toujours en adéquation avec les descriptifs de couleurs et de type de grain. Par exemple, une prairie aurait du être notée en classe 7 pour ses caractéristiques de couleurs de grains mais la hauteur de végétation ne correspondait pas. Dès le premier prélèvement, nous avons donc donné la consigne d'effectuer la notation uniquement sur les caractéristiques de couleur et de grain.

Cet outil d'évaluation est donc intéressant si les mesures sont effectuées avec un grand nombre de répétitions, afin d'avoir un calendrier des états visuels précis. Il est aussi nécessaire de l'adapter pour une utilisation nationale, notamment en ce qui concerne les hauteurs de végétation et la phénologie. Le travail réalisé ici permet toutefois de montrer que les prairies continuent d'offrir une diversité visuelle et une hétérogénéité à l'échelle de la parcelle. De même, l'observation au niveau de la parcelle nécessiterait d'être accompagnée d'un changement d'échelle pour mieux intégrer l'environnement et montrer l'intérêt de la prairie dans la construction d'une mosaïque paysagère

**Tableau 36. Classification des parcelles selon leur aspect visuel au cours du temps et calendriers des états visuels pour chaque classe.**

Classe	Effectif	Caractéristiques de la classe	Calendrier des états visuels		
			1° cycle	2° cycle	3° cycle
Classe 1	5	Marron en été, avec des possibilités de jaune dispersé au printemps			
Classe 2	5	Marron en été et grain régulier et vert clair le reste du temps (herbe rase)			
Classe 3	25	Marron en fin de printemps avec diverses couleurs et variable le reste du temps (grain grossier, jaune dispersé)			
Classe 4	20	Printemps ou été très vert et très fleuri et couleur verte le reste du temps (tout type de grain)			
Classe 5	7	Marron en fin de printemps et automne sans couleurs et vert le reste du temps (tout type de grains, jaune dispersé)			
Classe 6	2	Marron avec peu de fleurs en fin de printemps, et vert le reste du temps (tout type de grains, jaune dispersé)			
Classe 7	2	Marron en été ou automne et présence à un moment donné de tons très jaunes			
Classe 8	6	Marron en fin de printemps et été (automne possible) avec beaucoup de fleurs et variable le reste du temps (tout type de grains, jaune dispersé)			
Classe 9	57	Couleur verte toute année, tout type de grains et jaune à très jaune possibles			
Classe 10	8	Couleur verte toute l'année avec un grain régulier ou grossier et des périodes très rases			



# **Partie 3**

## **Discussion générale**



**L'objectif général de ma thèse est d'identifier des descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion ainsi que des états de la végétation permettant de prédire l'aptitude des prairies permanentes à rendre des services fourragers et environnementaux.** Il s'agit de développer une méthode de prédiction de ces services, à partir des descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion ainsi que des états de la végétation.

Nous avons travaillé dans une première phase (chapitre 3) sur l'étude des liens entre les descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion et les états de la végétation (Figure 40). Pour traiter cette question, nous avons mis en place le dispositif "*réseau national*" qui nous a permis d'identifier, à l'échelle de la prairie, les descripteurs pertinents pour prédire la composition fonctionnelle et botanique et de quantifier ces liens.

Dans un deuxième temps (chapitre 4), nous avons étudié les liens entre les états de la végétation et les critères d'aptitude des services fourragers (Figure 40). Pour cela, nous avons d'abord utilisé le dispositif "*Prairie Marcenat*" pour étudier ces liens dans un même milieu et en conditions expérimentales contrôlées. Cela nous a permis de mettre en avant et de quantifier les liens entre la composition fonctionnelle et particulièrement les types fonctionnels (TF) avec la production et valeur nutritive des prairies. La somme de températures (ST) a été utilisée comme repère pour étudier la dynamique de végétation lors du 1<sup>er</sup> cycle de végétation au printemps et les jours de repousse ont été utilisés pour les cycles suivants. Nous avons ensuite utilisé le dispositif "*réseau national*" pour étudier les liens entre la composition fonctionnelle de la végétation et les critères d'aptitudes fourragers sur un large gradient de conditions. Nous avons ainsi quantifié la part de la variabilité de la production et de la valeur nutritive, qui peut être expliquée par la composition fonctionnelle de la prairie. Nous avons fait le choix de centrer cette partie de notre étude sur la composition fonctionnelle, s'agissant des services fourragers. Ce choix a notamment été motivé par les nombreuses études reliant ces services à la composition fonctionnelle de la prairie (Baumont *et al.* 2008 ; Cruz *et al.* 2010). Les liens entre la composition botanique et fonctionnelle et les critères d'aptitude des services environnementaux n'ont pas été étudiés car les critères d'aptitude sont proches des états de la végétation.

Dans un troisième temps (chapitre 5), nous avons proposé une méthode qui permet de relier les critères d'aptitudes avec les services fourragers et environnementaux des prairies permanentes, et d'évaluer globalement les services rendus par ces prairies. Pour cela, nous avons utilisé un outil d'analyse multicritère (DEXi<sup>®</sup>), qui consiste à combiner les critères

d'aptitude de chaque service considéré, à leur attribuer des valeurs et des seuils, et à élaborer des règles de décision.

Après avoir présenté un bilan synthétique des principaux résultats obtenus dans chacune de ces trois étapes, nous discuterons de la pertinence du **réseau de parcelle et des méthodes mises en œuvre** pour atteindre nos objectifs (paragraphe 1). Ensuite, nous reviendrons sur les nouvelles références de composition botanique, productions et valeurs nutritives acquises dans ce travail (paragraphe 2). Puis nous nous interrogerons sur la capacité des descripteurs utilisés à prédire les états de la végétation, et de ceux-ci à prédire les critères d'aptitude à travers une analyse de la **qualité des modèles de prédiction** construits dans ce travail, (paragraphe 3). Dans une quatrième partie de cette discussion, nous reviendrons sur l'intérêt **des états de la végétation pour la prédiction des critères d'aptitude des services fourragers et environnementaux** (paragraphe 4). Nous nous analyserons ensuite si la diversité botanique des prairies permanentes influence les critères d'aptitude des services fourragers (paragraphe 5). Dans une sixième partie, nous discuterons de **l'évaluation des services** (paragraphe 6), avant de montrer, dans une dernière partie, **l'utilité des connaissances scientifiques acquises dans ce travail pour développer un outil opérationnel** de caractérisation des prairies permanentes, la typologie nationale (paragraphe 7).



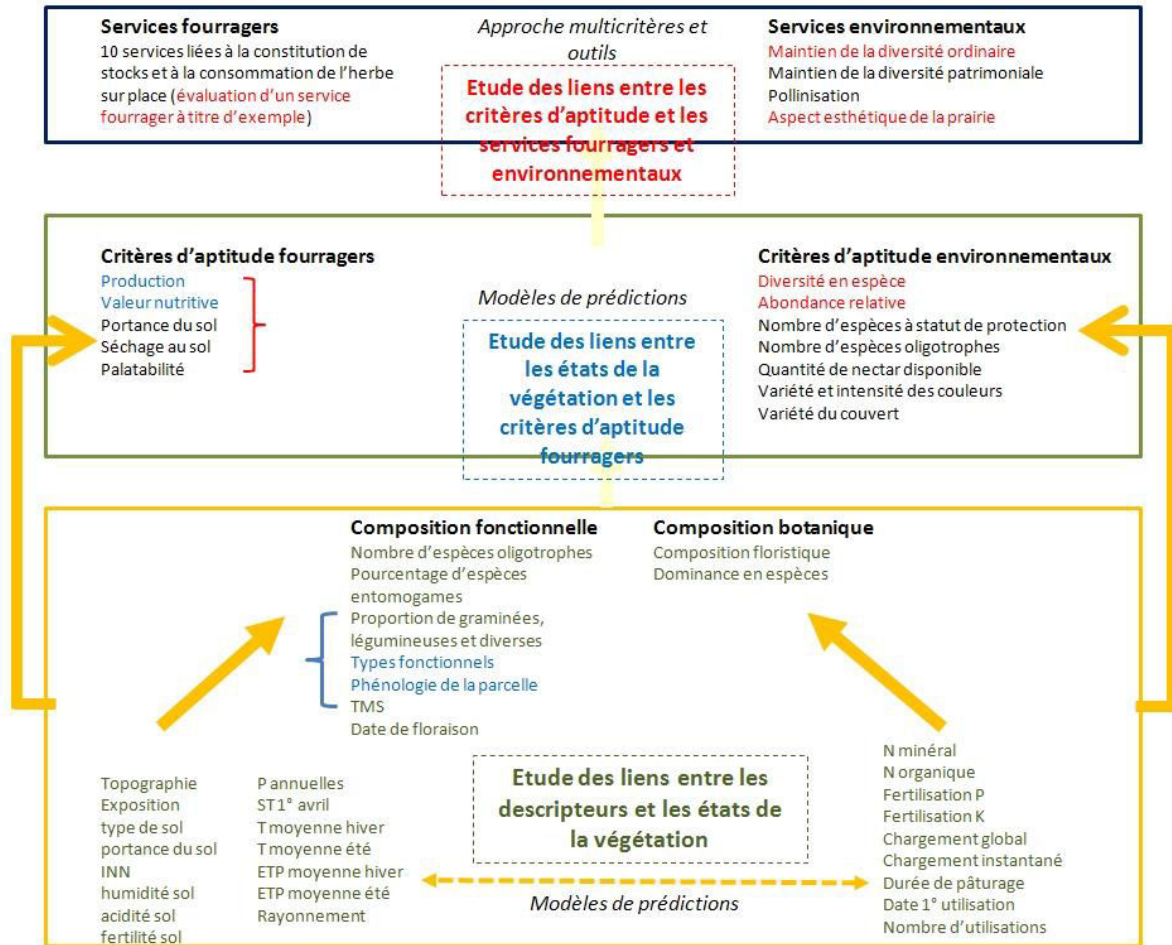


Figure 39. Schéma récapitulatif de la démarche de prédiction des services fourragers et environnementaux, avec en vert l'étude des liens entre les descripteurs et les états de la végétation (descripteur et états de la végétation étudiés), en bleu l'étude des liens entre les états de la végétation et les critères d'aptitude (états de la végétation et critères étudiés) et en rouge l'étude des liens entre les critères d'aptitude et les services fourragers et environnementaux (critères et services étudiés).

### Rappel des principaux résultats

Etude des liens entre les descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion et les états de la végétation

=> *Quels descripteurs étudier ?*

- Parmi 34 descripteurs disponibles, 25 ont été retenus. Ils concernent le sol pour 9 d'entre eux, le climat pour 7 d'entre eux et les pratiques de gestion pour 9 d'entre eux.

<b>Descripteurs du sol</b>	Topographie, exposition, type de sol, profondeur de sol, portance du sol, INN, humidité du sol, acidité du sol, fertilité du sol.
<b>Descripteurs climatiques</b>	Précipitations annuelles, ST au 1 <sup>er</sup> avril, température moyenne en hiver, température moyenne en été, ETP moyenne en hiver, ETP moyenne en été, rayonnement ;
<b>Descripteurs des pratiques de gestion</b>	Quantité d'azote minéral, quantité d'azote organique, quantité de fertilisation phosphatée, quantité de fertilisation potassique, chargement global, chargement instantané, durée de pâturage, date de 1 <sup>ère</sup> utilisation, nombre d'utilisations.

=> *Les compositions botanique et fonctionnelle sont-elles redondantes ?*

Nous avons montré que les compositions botanique et fonctionnelle ne sont pas redondantes. En particulier, nous avons mis en évidence qu'au sein des groupes de prairies homogènes sur le plan de leur composition floristique (présence ou dominance des espèces), il existait une forte variabilité des variables caractérisant la composition fonctionnelle (ex de la teneur en matière sèche)

=> *Quels descripteurs ont une influence sur les états de la végétation (expérimentation "réseau national") ?*

- Les compositions botanique et fonctionnelle ne sont pas expliquées par les mêmes descripteurs. Par ailleurs, nous avons trouvé des interactions entre des descripteurs qui contribuent à expliquer ces états de la végétation. La composition botanique est prédite par un plus grand nombre de descripteurs que la composition fonctionnelle. De plus, elle est prédite principalement par des descripteurs pédoclimatiques et la composition fonctionnelle par des descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion :

## Composition botanique :

<b>Composition floristique</b>	Température moyenne en hiver, rayonnement annuel, température moyenne en été, rayonnement*ETP moyenne en été, ETP moyenne en été, précipitations annuelles*fertilité du sol, rayonnement annuel*ETP moyenne en hiver, fertilité du sol*acidité du sol, somme de température au 1° avril*rayonnement annuel, date de 1° utilisation*humidité du sol, acidité du sol, fertilisation en K*fertilisation en P
<b>Dominance en espèces</b>	Température moyenne en été, rayonnement annuel*ETP moyenne en été, fertilité du sol*acidité du sol, fertilité du sol*rayonnement annuel, température moyenne en hiver, fertilité du sol*ETP moyenne en été, fertilité du sol, type de sol, rayonnement annuel, fertilisation en K*portance du sol, ETP moyenne en été

## Composition fonctionnelle :

<b>TMS</b>	Fertilité du sol, Chargement instantané, rayonnement annuel
<b>Date de floraison</b>	Température moyenne en hiver, nombre d'utilisations, humidité du sol, fertilité du sol, fertilisation en azote organique, température moyenne en été, précipitations annuelles
<b>Nombre d'espèces oligotrophes</b>	Fertilité du sol, acidité du sol*température moyenne en hiver, ETP moyenne en hiver
<b>Pourcentage d'espèces entomogames</b>	Humidité du sol, nombre d'utilisations, fertilisation en azote organique, fertilisation en azote minéral.
<b>Proportion de graminées</b>	Nombre d'exploitation, fertilisation azotée minérale, humidité du sol
<b>Proportion de légumineuses</b>	Fertilisation potassique, nombre d'exploitations
<b>Proportion de diverses</b>	Précipitations annuelles, durée de pâturage

Etude des liens entre la composition fonctionnelle et les critères d'aptitude des services fourragers

=> Dans quelle mesure les TF permettent-ils de prédire les critères d'aptitude des services fourragers (dispositif "Prairies Marcenat") ?

- L'étude de trois prairies contrastées en termes de composition en TF a montré des différences de production et valeur nutritive entre les parcelles. La prairie de TF C est caractérisée une production plus faible au printemps (environ 4t MS/ha) et une dMO

plus faible en début de printemps, mais qui diminue plus lentement dans le temps (de 71 à 64%) que les prairies de TF A ou Bb. Ces dernières sont caractérisées par une production élevée au printemps (5 à 6 t MS/ha) et une digestibilité qui diminue vite au cours du temps (de 75 % à 55%) ;

- On observe les mêmes tendances pour les repousses, avec une phénologie moins avancée (stade végétatif à début montaison), des valeurs de production plus faible (de 1 à 4t MS/ha pour la prairie de TFA et de 0.5 à 1.5 tMS/ha pour la prairie de TFC) et un dMO plus faible pour la prairie de type C ;
- Ces liens ont été quantifiés pour les trois cycles de végétation en prenant comme base de temps les sommes de température au 1<sup>er</sup> cycle et les jours de repousse pour les cycles de végétation suivants. Les modèles de prédiction sont précis au premier cycle de végétation ( $R^2$  de 0.51 à 0.83) et moins pour les repousses ( $R^2$  de 0.01 à 0.85).

=> *Dans quelle mesure la composition fonctionnelle permet-elle de prédire les critères d'aptitude des services fourragers (dispositif "réseau national") ?*

- Les modèles de prédiction des variables de production combinant les TF, les familles botaniques et les propriétés des espèces (nombre d'espèces oligotrophes, pourcentage d'espèces entomogames, ...) sont meilleurs que ceux basés sur les propriétés des espèces, sur les TF ou sur les familles botaniques, avec des prévisions tout de même faibles ( $R^2$  de 0.16 à 0.50) ;
- La contribution des TF dans l'explication des critères de production reste faible : elle est principalement liée à la proportion des graminées de TF C ;
- La contribution de la proportion de légumineuses et de diverses est importante dans la prédiction des critères d'aptitude des services fourragers.

#### Etude des liens entre les critères d'aptitude et les services fourragers et environnementaux des prairies permanentes

=> *Evaluation de l'aspect esthétique d'une prairie*

L'outil mis en place par Pa. Fleury (1995) a permis de construire des calendriers des états visuels pour chaque prairie : 10 groupes ont été construits selon ces calendriers des états visuels. Trois types de calendriers des états visuels sont bien marqués sur notre réseau de parcelles. Cette étude nous a permis de mettre en évidence une large gamme de couleurs et de

grains présents sur les prairies permanentes. Cependant, la présence d'un groupe avec un grand nombre de parcelles montre que l'état visuel des prairies s'homogénéise sous l'influence des pratiques de gestion. En revanche, les états de la végétation ne permettent pas de quantifier le service car la préférence d'un type de calendrier varie selon les ressentis des différents acteurs (randonneurs, chasseurs, ...). Pour cela, une étude sociologique aurait été nécessaire.

=> *Résultats de l'analyse multicritères*

Pour faire le lien entre les critères d'aptitude et les services fourragers et environnementaux des prairies permanentes, nous avons utilisé une démarche multicritère à l'aide du logiciel DEXi®. Nous avons mis en place une méthode d'évaluation d'un service à partir des critères d'aptitude étudiés. Cette méthode a été illustrée par trois services environnementaux et quatre services fourragers. Nous avons également construit une méthode d'évaluation de l'ensemble des services considérés pour une prairie ou un type de prairie donné. Ainsi, il est possible d'estimer dans quelle mesure une prairie peut concilier des services fourragers et environnementaux.

## 1. Retour sur l'échantillon et les méthodes de travail

### 1.1. Etude sur un réseau national de parcelles

#### *Un réseau représentatif des prairies permanentes françaises*

Le réseau de parcelles, nommé "*réseau national*", sur lequel nous avons travaillé est constitué de 190 prairies permanentes, dont 180 proviennent d'exploitations agricoles et 10 de sites expérimentaux (INRA ou Institut de l'Élevage). Ces prairies ont été sélectionnées au sein d'une population de 1500 parcelles, utilisée pour évaluer les attentes des éleveurs vis-à-vis de leurs prairies. Les partenaires du programme CASDAR sont issus des grandes zones herbagères françaises riches en prairies permanentes. Certaines régions ont été exclues (Alpes, pourtour méditerranéen, Bretagne, ...) principalement parce que le nombre de partenaires du programme CASDAR était limité, mais aussi parce que le travail ne concernait pas les parcours et landes associant couvert herbager et arbustif. Dans le cas des Alpes qui constituent une vaste zone herbagère, il a été considéré que les travaux antérieurs apportaient déjà de nombreuses informations sur la valeur des prairies (Fleury *et al.* 1996). Les prairies permanentes du réseau sont issues d'exploitations agricoles constituées d'au moins 50% de

prairies permanentes dans la SFP. Lors du choix des parcelles du réseau, nous nous sommes assurés que les prairies permanentes retenues avaient un rôle important dans le système fourrager et que leur conduite était stable depuis dix ans au moins. Les prairies recensées sont fertilisées en moyenne à 20 UN/ha, certaines pouvant être non fertilisées et d'autres jusqu'à 200 UN/ha. Le chargement moyen des exploitations enquêtées est de 1 UGB/ha. Dans la population des 1500 parcelles recensées, 58% des prairies sont utilisées en pâturage exclusif (PE), 13% en fauche exclusive (FE) et 29% en utilisation mixte (M). Si on compare cette population de 1500 parcelles avec les résultats d'une enquête effectuée en 1998 (Agreste 2000), on constate que notre échantillon présente du point de vue de l'utilisation des surfaces une grande proximité avec la "moyenne" des prairies françaises : 56% des prairies étaient utilisées en PE, 8% en FE et 36% en M. Ainsi, nous avons échantillonné des surfaces représentatives des prairies permanentes françaises. Lors de l'échantillonnage final (passage de 1500 parcelles à 190 parcelles), nous avons tenu compte des pratiques de gestion effectuées. Dans ce réseau national de 190 parcelles, 43% des prairies sont utilisées en PE, 11% en FE et 46% en M. La proportion plus importante de prairies mixtes dans notre échantillon s'explique par les changements effectués avec les techniciens des chambres d'agriculture lors de la validation du choix des parcelles. Néanmoins, nous pouvons dire que le réseau que nous avons constitué est représentatif des usages principaux des prairies en France et qu'il couvre en outre un large gradient de situations pédoclimatiques.

#### *Un protocole pour mesurer le potentiel fourrager des prairies permanentes*

Ce réseau de parcelles nous a permis de mesurer le potentiel de production et la valeur alimentaire du fourrage des prairies permanentes au cours de l'année. Pour cela, nous avons travaillé dans trois mises en défens placées au sein des parcelles étudiées. Cela constituait la seule possibilité pour construire un jeu de données suffisamment homogène, ainsi qu'une base de données commune, facilitant la comparaison des parcelles. Nous nous sommes donc affranchis des pratiques de gestion spécifiques de chaque parcelle liées au pâturage et à la fauche. Nous n'avons ainsi pas pu obtenir de données représentatives de l'usage de chaque parcelle au cours de la saison en particulier pour les parcelles utilisées en pâturage exclusif. Il aurait été trop difficile de mettre en place un protocole adapté aux dates de fauche ou aux pratiques de pâturage sur une zone et un nombre de parcelles aussi importants. Nous avons cependant ciblé les mesures selon des périodes clés de l'utilisation des prairies (fauche précoce ou pâturage de printemps pour la date de prélèvement P<sub>1</sub>, fauche tardive pour la date

de prélèvement P<sub>2</sub>, fauche ou pâturage des repousses d'été pour la date de prélèvement P<sub>3</sub> et pâturage d'automne pour la date de prélèvement P<sub>4</sub>). Nous avons fait l'hypothèse que la mise en place des mises en défens ne modifierait pas la composition botanique de la végétation au cours des deux années.

Durant ces deux années de suivi, nous avons été tributaires des spécificités climatiques observées dans les différentes régions, en particulier avec un été et/ou automne sec dans l'est et l'ouest ou avec un printemps sec en Vendée. Cela a entraîné des problèmes au niveau de la réalisation des mesures surtout en été et en automne, et nous avons donc du adapter le protocole, en allongeant la période de prélèvement en automne par exemple. Néanmoins, nous n'avons pas connu d'année extrême comme 1976 ou 2003 par exemple pour la sécheresse, ou bien 2007 pour le printemps particulièrement pluvieux dans le centre de la France.

Ce protocole nous a permis d'acquérir des références importantes sur les productions et valeurs nutritives des prairies permanentes, avec une diversité notable de situations pédoclimatiques et de pratiques de gestion, ce qui à notre connaissance n'avait jamais été fait à une telle échelle auparavant, en France ou en Europe. Cependant, nous n'avons pas été en mesure de réaliser des analyses de sol et nous ne disposons que de données à dire d'éleveurs. Nous nous sommes donc principalement basés sur les relevés de végétation qui nous ont permis de calculer des indices d'humidité, d'acidité et de fertilité du sol, avec les indices d'Ellenberg (Schaffers et Sykora 2000 ; Duru *et al.* 2010b). Des analyses de sol nous auraient permis de quantifier de manière précise les types de sol étudiés. Bien qu'envisagé, cela n'a malheureusement pas été possible en raison d'un protocole lourd et des coûts élevés.

#### *Un protocole pour évaluer la valeur environnementale des prairies permanentes*

Nous avons également étudié la valeur environnementale des prairies permanentes du réseau de parcelle. Le principal aspect étudié a été celui de la biodiversité floristique, mais également celui de la contribution des prairies au maintien d'insectes pollinisateurs. Nous nous sommes intéressés à la composition botanique (composition floristique et abondance en espèces) et fonctionnelle (traits de vie et propriétés des espèces). Ce protocole nous a permis d'acquérir des références sur la composition botanique des prairies permanentes, en considérant une diversité de conditions climatiques et de pratiques de gestion. En revanche, nous n'avons pas étudié la valeur environnementale des prairies par exemple sous l'angle de sa valeur habitat pour la faune. Les services environnementaux liés à la présence de la faune n'ont donc pas été considérés ou estimés à partir des états de la végétation. Ainsi, pour mesurer la pollinisation,

nous nous sommes appuyés sur la composition fonctionnelle et notamment le pourcentage d'espèces entomogames.

### *Intérêt d'une démarche réseau*

Notre dispositif principal est basé sur la construction d'un réseau national de prairies permanentes, en provenance d'exploitations agricoles pour la grande majorité. Un tel réseau nous a permis de travailler sur un large gradient de conditions pédoclimatiques et de pratiques de gestion. Nous avons ainsi été confrontés à une large palette de situations. En revanche, la mise en place d'un réseau, son animation et son suivi nécessite du temps. Dans une telle démarche, il est nécessaire de s'assurer de l'assimilation des consignes et notamment de la réalisation du protocole. Pour cela, différents éléments ont été mis en œuvre comme la mise en place d'un séminaire de formation au protocole durant deux jours en automne 2008 ou la réalisation d'un film explicitant le protocole de mesures. Afin de vérifier les données récoltées et de s'assurer de leur validité, une démarche de vérification de celles-ci a été effectuée (vérification systématique des données aberrantes, ...). La démarche "réseau" est donc intéressante dans des études à grande échelle mais nécessite de prendre en compte les possibilités pratiques de réalisation des mesures en ferme et donc d'en tenir compte dans le type de mesures réalisées et leur fréquence. Enfin, ce type de démarche est très enrichissant du fait d'un partenariat important.

#### 1.2. L'adéquation des méthodes mises en œuvre à l'hétérogénéité de la végétation

Les prairies permanentes sont des couverts hétérogènes que ce soit d'un point de vue spatial, en considérant la composition de la végétation dans l'espace ou temporel, en considérant l'évolution de la végétation dans le temps. Les méthodes de mesures doivent donc être adaptées à ce type de couvert. Dans notre étude, nous avons travaillé sur le faciès dominant de la prairie afin de limiter les effets liés à cette hétérogénéité.

#### *L'hétérogénéité spatiale*

Pour prendre en compte cette hétérogénéité spatiale, les relevés botaniques complets ont été effectués dans 8 quadrats répartis sur l'ensemble du faciès dominant ce qui constitue un minimum pour être représentatif. En revanche, les prélèvements d'herbe pour les mesures de production, valeur nutritive et composition botanique simplifiée n'ont été effectués qu'au



niveau des trois mises en défens. Nous sommes donc tributaires de la représentativité de ces trois zones mises en défens. En effet, nous avons effectué des mesures de production dans des quadrats de 70\*70 cm, avec trois répétitions par parcelle. La surface de coupe reste cependant petite. Bien que les trois mises en défens aient été placées sur le faciès homogène pour être représentatives de la végétation de la parcelle, ces faibles surfaces de coupe peuvent parfois engendrer une surévaluation ou sous-évaluation de la production des prairies. D'autres protocoles de mesures de la production de l'herbe basés sur une plus grande surface de coupe et sur l'utilisation de la motofaucheuse (Corral et Fenlon 1977 ; Mosimman 2001) ou sur un nombre plus important de prélèvements (Farruggia *et al.* 2010) auraient certainement été préférables. Ce type de protocole permet de diminuer les imprécisions liées aux mesures de production, notamment sur des couverts hétérogènes. Cependant cela aurait été difficilement envisageable dans notre dispositif basé sur un réseau faisant intervenir une trentaine de personnes. Les relevés botaniques, ont été réalisés dans les zones de mises en défens et sur cinq autres zones. Ils ont donc été effectués sur une surface plus large et prennent en compte une plus grande diversité. En confrontant les données des relevés botaniques complets avec les mesures de composition botanique simplifiée effectuées dans les mises en défens, nous avons observé une surévaluation des graminées dans l'échantillon en provenance des mises en défens par rapport au relevé botanique (équation : pourcentage de graminées estimées au laboratoire =  $0.76 \text{ pourcentage de graminées mesurées dans les relevés botaniques complets} + 22.7$ ). Cet écart n'a globalement pas modifié le classement des prairies les unes par rapport aux autres, et a donc eu un effet limité sur l'interprétation des résultats. Cet écart peut être expliqué par plusieurs éléments : la représentativité des mises en défens par rapport à l'ensemble de la parcelle, les méthodes d'estimation qui sont différentes, l'échantillonnage de la végétation prélevée dans les mises en défens, où des légumineuses comme le trèfle peuvent être sous-représentées du fait de leur faible taille.

Enfin, pour mesurer la phénologie d'une prairie permanente, nous avons testé une méthode de mesure du stade moyen de la végétation, adaptée des travaux de Moore *et al.* (1991), qui permet de tenir compte de l'hétérogénéité de la végétation. Cette méthode, en déterminant les stades sur des talles tirées au hasard dans l'échantillon, permet de bien prendre en compte l'hétérogénéité de la végétation. D'autres méthodes de mesure du stade moyen, basées sur une estimation visuelle sur la prairie (Jeangros et Amaudruz 2005 ; INRA 2007 ; GNIS 2009), peuvent être plus facilement entachées d'erreur du fait du choix visuel des talles examinées.

### *L'hétérogénéité temporelle*

Les caractéristiques de la végétation des prairies (composition botanique et fonctionnelle, biomasse, valeur alimentaire) sont soumises à trois types d'évolution :

- une évolution intra-annuelle, avec notamment une proportion relativement plus importante de graminées au printemps et de dicotylédones (légumineuses et diverses) en été, une dégradation de la valeur alimentaire au fil du temps, une production printanière généralement majoritaire dans la production annuelle. Notre étude, en prévoyant 4 dates de prélèvements, répétées pendant deux années consécutives, a permis de prendre en compte de manière relativement complète cette source de fluctuation de la végétation. Ceci s'applique sur l'ensemble des caractéristiques mesurées sur ces 4 dates, à l'exception du relevé botanique complet qui n'a été réalisé que lors du printemps de la première année ;
- une évolution intra et inter-annuelle (à court terme), essentiellement liée à la fluctuation des conditions climatiques (Jarolimek *et al.* 2000 ; (Peco *et al.* 2009). Notre dispositif a permis de prendre en charge cette hétérogénéité temporelle, mais de manière partielle. En comparaison avec d'autres suivis agronomiques, il apparaît que des suivis de plus longue durée (5 ans minimum) seraient de nature à mieux évaluer cette variabilité liée au climat. Nos résultats doivent donc être analysés en prenant en considération les conditions climatiques des deux années 2009 et 2010.
- une évolution inter-annuelle à moyen et long terme, qui dépend de l'évolution des conditions pédoclimatiques ou des changements importants de mode d'utilisation ou d'intensification des pratiques (Peter *et al.* 2008). Nous avons pris le soin de vérifier que les parcelles étudiées n'avaient pas fait l'objet d'un changement important de mode d'utilisation (reconversion de fauches en pâtures ou l'inverse), d'intensification (variations récentes et importantes du niveau de chargement, des dates d'exploitation, des apports d'engrais minéraux et organiques) ou de condition du sol (drainage, chaulage, ...). De ce fait cette source d'hétérogénéité ne constitue pas un problème pour l'interprétation de nos résultats.

## 2. De nouvelles références de composition botanique, productions et valeurs nutritives

*Composition botanique*

Les études précédemment effectuées sur les prairies permanentes ont montré que leur diversité variait selon l'intensité d'utilisation de celle-ci : actuellement on peut trouver en Europe de 15 à 100 espèces par prairie permanente (Plantureux *et al.* 1993 ; Diquelou *et al.* 2003 ; Stybnarova *et al.* 2010 ; Tornambe *et al.* 2010) avec des moyennes pouvant atteindre 30 à 60 espèces (Jeangros et Schmid 1991). Dans notre réseau de parcelles, le nombre d'espèces recensées s'étend entre 8 et 69 espèces par prairie permanente. Les 25% de parcelles les moins riches ont moins de 18 espèces alors que les 25% de parcelles les plus riches ont plus de 28 espèces. Nous avons travaillé sur des prairies représentatives des surfaces herbagères des zones étudiées : les prairies très diversifiées telles les estives ont donc été peu rencontrées. Globalement, le nombre d'espèces rencontrées dans notre réseau est plus faible que les valeurs recensées dans la base de 4500 relevés sur prairies permanentes françaises enregistrées dans e-FLORA-sys (<http://eflorasys.inpl-nancy.fr>) (Figure 40) bien qu'en moyenne notre échantillon ne contienne que 24 espèces.

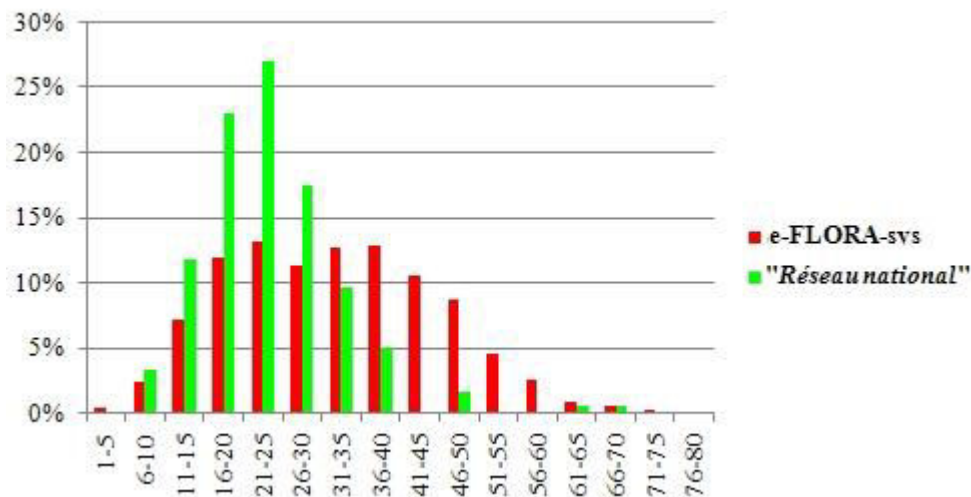


Figure 40. Nombre d'espèces rencontrées dans le réseau de 190 prairies ("réseau national") en comparaison avec les espèces recensées dans la base de données e-FLORA-sys.

### Production d'herbe

Les études précédemment effectuées ont montré que la production des prairies permanentes était variable selon le type de prairie : en effet, les productions annuelles peuvent être très faible (1 tonne) mais peuvent atteindre 8.31 t MS/ha/an (Jeangros et Schmid 1991 ; Nerusil *et al.* 2008 ; Stybnarova *et al.* 2010). Les quantités récoltées à la première coupe sont comprises entre 2 et 5 t MS/ha (Jeangros et Schmid 1991). Dans notre étude, les productions annuelles sont (Figure 41) en moyenne de 6.24 t MS/hectare. Le quart inférieur de l'échantillon est caractérisé par des productions de 4.22 t MS/ha et le quart supérieur par des productions de 8.07 t MS/ha. Les quantités récoltées à la première coupe ( $P_2$ ) constituent la plus grosse partie de la production annuelle de ces parcelles (en moyenne 68% de cette production) : la médiane des productions était d'environ 5t MS/ha avec 80% des données comprises entre 2.2 et 7.5 t MS/ha.

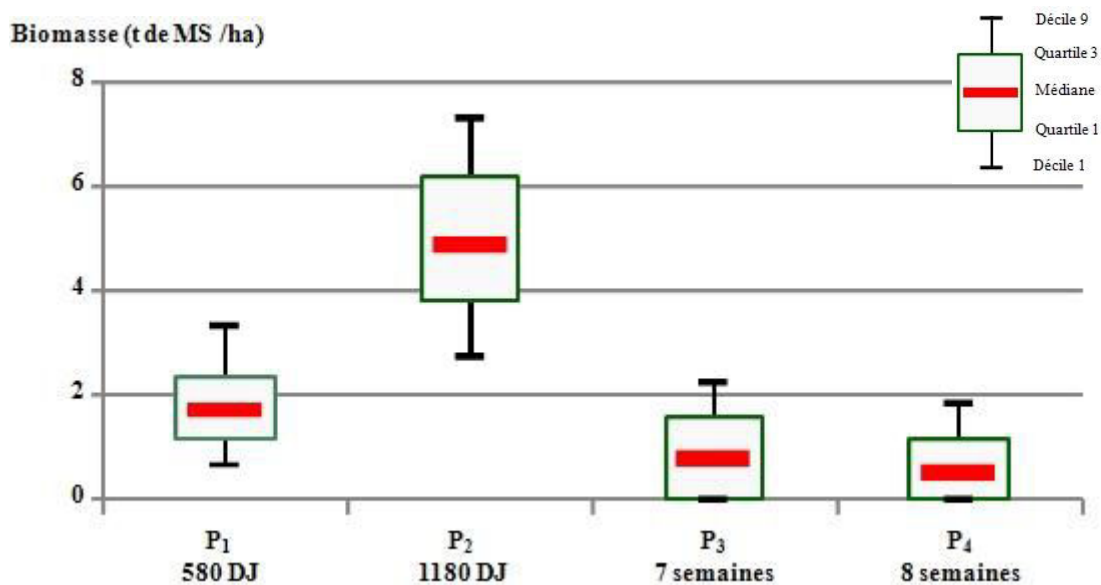


Figure 41. Représentation des productions d'herbe des prairies permanentes (en t MS/ha) du dispositif "réseau national" en début de printemps ( $P_1$  en degré jours (DJ)), en fin de printemps ( $P_2$  en degré jours (DJ)), en été ( $P_3$  en semaines) et en automne ( $P_4$  en semaine) en considérant les deux années de suivi sous forme de boîtes à moustache.

### Valeur nutritive

Nous avons vu que la digestibilité d'une prairie au premier cycle de végétation qui est voisine de 82-83% au stade végétatif, diminue jusqu'à 60-75% à la date de première coupe (Daccord *et al.* 2006 ; Jouven *et al.* 2007 ; Andueza *et al.* 2010) et à 55% au stade floraison (Demarquilly et Andrieu 1988). Les résultats du suivi des parcelles du réseau montrent que la

médiane correspondant à la digestibilité au premier prélèvement (stade début montaison) est de 77 % avec 80% des données réparties entre 71 et 83% (Figure 42). Au deuxième prélèvement qui correspond à une exploitation tardive de la prairie, avec un stade moyen entre la fin montaison et le début épiaison, la médiane de la digestibilité est de 64% avec 80% des données comprises entre 60 et 69%. Les valeurs médianes observées dans notre étude au premier cycle sont très proches des valeurs données dans les tables INRA (2007) pour les prairies de plaine et les prairies de demi-montagne. La digestibilité des repousses mesurée dans les travaux précédents est comprise entre 89 et 69 % (INRA 2007). Les résultats de nos travaux montrent une digestibilité médiane pour les repousses d'été et d'automne de 72-74% avec 80% des données comprises entre 65 et 78%. Ces résultats sont donc proches des valeurs de références, légèrement plus faibles toutefois.

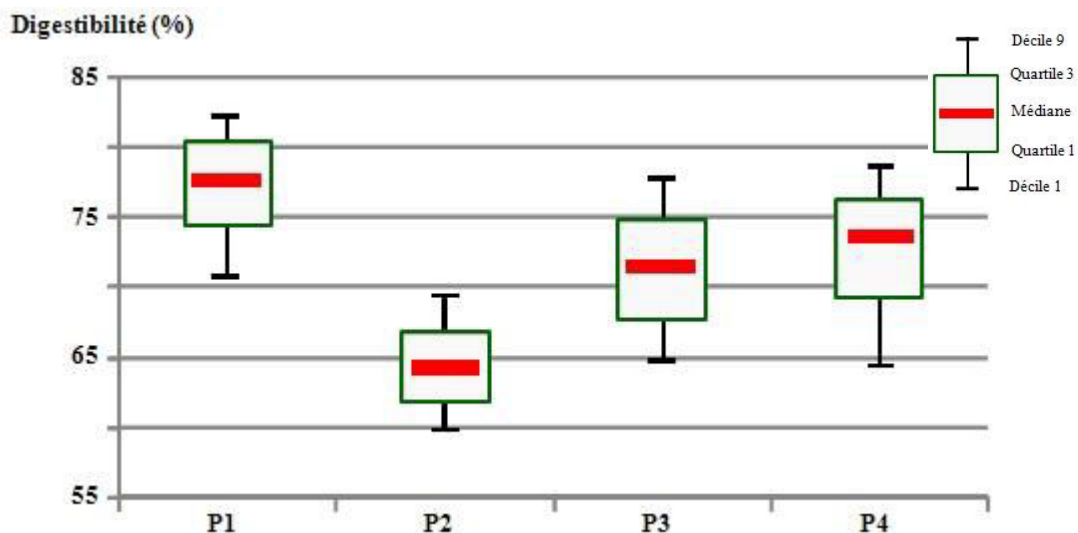


Figure 42. Représentation de la digestibilité des prairies permanentes (en %) du dispositif "réseau national" en début de printemps (P<sub>1</sub>), en fin de printemps (P<sub>2</sub>), en été (P<sub>3</sub>) et en automne (P<sub>4</sub>) en considérant les deux années de suivi sous forme de boîtes à moustache.

### 3. Qualité des modèles de prédiction des états de la végétation et des critères d'aptitude fourrager

La qualité des modèles de prédiction varie de manière importante. En effet, les modèles de prédiction des états de la végétation, à partir des descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion, sont caractérisés par une grande variabilité de la qualité des modèles. Celle-ci peut être expliquée par le dispositif mis en œuvre. Les pratiques de gestion ont été obtenues pour

une année de suivi et bien que considérées comme stables depuis plusieurs années, elles peuvent être source d'une variation importante des modèles de prédiction. Les pratiques de gestion peuvent aussi avoir un effet indirect sur les états de la végétation et ainsi être à l'origine d'imprécisions dans la qualité des modèles. C'est notamment le cas de la fertilisation, qui ne constitue qu'un élément de la nutrition des plantes, d'autres mécanismes intervenant comme la minéralisation de la matière organique, les dépôts atmosphériques ou la fixation symbiotique pour l'azote. De plus, les états de la végétation et ainsi les variables de qualification du sol, sont basés sur un seul relevé effectué au printemps 2009. La répétition de ces mesures aurait pu améliorer les modèles de prédiction. Les données météorologiques sont issues de données moyennées sur les 15 dernières années. Nous avons travaillé sur des données extrapolées à une maille de 4000 points sur la France. L'extrapolation des données climatiques à 4000 points peut également être source d'imprécision et avoir une influence sur la qualité des modèles. Dans les modèles de prédiction des états de la végétation à partir des descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion, la composition botanique est la mieux prédite. La composition botanique fait appel à un plus grand nombre de descripteurs que la composition fonctionnelle. Parmi les caractéristiques de la composition botanique, la composition floristique ( $R^2$  de 0.51) est mieux prédite que la dominance en espèces ( $R^2$  de 0.31), en considérant les descripteurs principaux. Cela est sans doute lié au fait que la présence des espèces est beaucoup moins influencée que leur dominance par les conditions climatiques d'une année. Parmi la composition fonctionnelle, certaines variables faisant appel à peu de descripteurs sont mieux prédites que d'autres. Le nombre d'espèces oligotrophe ( $R^2$  de 0.73) est ainsi mieux expliqué que la proportion de légumineuses ( $R^2$  de 0.09).

Les modèles de prédiction des critères d'aptitude des services fourragers à partir des états de la végétation montrent également une fluctuation de leur qualité. Ces modèles sont basés sur des données issues de deux années de suivi, qui tiennent compte des conditions climatiques. Cette courte période peut jouer sur la qualité des modèles de prédiction. De plus, les dispositifs expérimentaux mis en œuvre peuvent avoir une influence sur ces modèles, notamment au niveau des méthodes de mesures de la production, effectuées sur une faible surface. Dans ces modèles de prédiction, on cherche à prédire des variables qui évoluent dans le temps, ce qui explique l'importance de considérer les ST. Globalement, les modèles basés sur le premier cycle de végétation sont les mieux expliqués. De plus, dans les modèles basés sur les TF, le classement des espèces dans les TF masque des différences entre espèces à l'intérieur d'un même TF qui peuvent être importantes. Le calcul des traits de vie à l'échelle de la communauté à partir des traits moyens des espèces disponibles dans des bases de

données pourrait améliorer la qualité de la prédiction. Nous avons pour ambition de construire des modèles de prédiction avec des variables facilement accessibles. Les variables utilisées dans nos modèles sont généralement facilement mesurables. En effet, les descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion retenus sont accessibles en consultant l'éleveur ou par simples calculs. Pour les variables climatiques, il est peut cependant être plus difficile de récolter des informations pour quelques variables comme le rayonnement annuel. De même, l'estimation de la composition en TF d'une prairie, du stade moyen ou de la proportion de graminées, légumineuses et diverses peuvent être difficilement accessibles pour un non connaisseur en botanique, bien que des méthodes de mesures simplifiées aient été mises en place (GNIS 2010 ; Theau *et al.* 2010).

#### 4. Intérêt de la composition fonctionnelle pour prédire les critères d'aptitude des services fourragers et environnementaux des prairies permanentes

Nous avons travaillé sur la prédiction des critères d'aptitude fourragers (production et valeur nutritive), à partir de la composition fonctionnelle et particulièrement des TF. Selon Cruz *et al.* (2010), la prédiction de la production et de la valeur nutritive des prairies permanentes est possible par les TF. Au moyen du dispositif "*Prairies Marcenat*" et en étudiant le comportement dans le temps de trois prairies très différentes en termes de composition en types fonctionnels, nous avons quantifié les liens entre les TF et la production et qualité de la prairie pour le premier cycle de végétation. Nous avons une prairie composée de 75% d'espèces de TF A, avec une proportion de graminées de 86%, une prairie composée de 36% d'espèces de TF B et de 24% d'espèces de TF b, avec une proportion de graminées de 65% et une dernière composée de 23% d'espèces de TF C, avec une proportion de graminées de 42%. Nos conclusions rejoignent celles de Duru *et al.* (2007) et Cruz *et al.* (2010) pour le 1<sup>er</sup> cycle de végétation, et nous avons pu montrer que les différences liées aux TF se retrouvent sur les cycles de repousses.

Cependant le pouvoir de prédiction de la composition en TF s'est avéré limité sur le dispositif "*réseau national*". En effet, si nous retrouvons bien l'influence de la proportion en TFC, nous avons montré que les proportions de légumineuses et de diverses sont également des critères importants à prendre en compte pour expliquer les variations de la production et de la valeur nutritive. Même si une convergence entre des traits de vie des diverses et les graminées a été démontrée (Ansquer *et al.* 2009 ; Duru *et al.* 2010a), notre étude montre qu'il

est nécessaire de tenir compte de la proportion de dicotylédones dans les modèles de prédiction. Parmi les TF, seul l'effet du TF C sur la production et la valeur nutritive est important. Les prairies de notre réseau n'étaient composées en moyenne que d'une faible proportion de TF C: 5.75% en P<sub>1</sub> et 8.35% en P<sub>2</sub>. Les TF dominants dans le réseau de parcelles sont les TF A, avec 49.97% de TF A en P<sub>1</sub> et 39.16% en P<sub>2</sub> et les TF b, avec 29.54% de TF b en P<sub>1</sub> et 41.44% en P<sub>2</sub>. Cela peut expliquer les faibles effets des TF sur la production et qualité des prairies permanentes. En effet, peu de différences en terme de productivité et de digestibilité ont pu être montrées entre les plantes de ces deux TF qui se distinguent surtout par une phénologie plus tardive pour le TF b (Duru *et al.* 2007 ; Cruz *et al.* 2010). De plus dans notre échantillon, peu de parcelles sont composées d'un seul TF, elles sont plutôt composées de plusieurs TF avec une part importante de TF A et b. L'effet des TF sur les critères d'aptitude fourragers est donc marqué sur des prairies très contrastées en termes de composition en TF mais beaucoup moins sur des prairies plus diversifiées en composition en TF. Nous avons également mis en évidence que des critères mesurés directement sur la végétation comme la teneur en MS et le stade moyen de végétation améliorent le pouvoir des TF à prédire la production et la qualité de la prairie, alors que les types fonctionnels sont sensés intégrer les différences entre espèces sur ces critères. Pour approfondir ces analyses, il serait intéressant de tester le pouvoir de prévision des traits de vie moyens recalculés à l'échelle de la communauté à partir de la composition botanique des prairies.

Par ailleurs, dans notre travail, nous avons montré que les compositions botanique et fonctionnelle ne sont pas redondantes. En effet, elles ne déterminent pas l'aptitude aux mêmes services, elles ne sont pas expliquées par les mêmes descripteurs pédoclimatiques ou des pratiques, et le classement des prairies en fonction de leur composition botanique ou fonctionnelle n'est pas le même. C'est ainsi que la composition fonctionnelle permet de prédire la grande majorité des services fourragers (Duru *et al.* 2007 ; Baumont *et al.* 2008 ; Cruz *et al.* 2010) et quelques services environnementaux (Potts *et al.* 2009). La composition botanique permet plutôt de prédire des services environnementaux comme le maintien de la diversité ordinaire et patrimoniale ou la séquestration du carbone, que nous n'avons pas étudiée ici. Ces deux états de la végétation sont donc complémentaires dans la prédiction des services fourragers et environnementaux.



## 5. La diversité botanique des prairies permanentes influence-t-elle les critères d'aptitude des services fourragers ?

Les prairies du réseau national sont composées en moyenne de 24 espèces. Dans notre étude, nous avons montré des variations de productions annuelles importantes, avec une moyenne de 6.24 t MS/hectare. Cette variation de production n'est pas liée à la diversité floristique (Figure 43). En effet, pour 20 espèces par prairie, la production peut s'étaler de 2 à 8 t MS/ha/an. Une augmentation de la production avec l'augmentation de la diversité botanique ou fonctionnelle a été mise en évidence par Hector *et al.* (1999). Il faut noter que ces travaux, comme d'autres démontrant un effet comparable ont été conduits sur des peuplements reconstitués, en comparant des nombres croissant d'espèces. Nos résultats ne vont pas dans ce sens, et rejoignent plutôt les travaux comme ceux de Mariott *et al.* (2004).

De même, l'étude de la dMO selon la composition floristique montre que pour un même nombre d'espèces, par exemple 20 espèces, la dMO peut varier de 57% à 74% (Figure 44). On n'observe pas non plus de liaison nette entre la diversité floristique et la digestibilité.

Cependant, les prairies à très forte biodiversité floristique sont très peu représentées dans notre échantillon, ce qui limite l'interprétation de ce résultat au domaine de validité concerné. Il faut également nuancer les informations apportées par le nombre d'espèces. En effet, le nombre d'espèces présentes dans une parcelle des Vosges peut être équivalent à une parcelle des marais de l'Ouest par exemple mais avec une composition floristique différente. Cette composition floristique peut être à l'origine des variations de production et de valeur nutritive (Jeangros *et al.* 1994 ; Baumont *et al.* 2008 ; Merbirouk-Boudechiche *et al.* 2010). Pour vérifier cette hypothèse, il pourrait être envisagé de confronter les classes de dominance et présence en espèces construites dans le cadre du chapitre 3, avec les critères d'aptitude des services fourragers (production et valeur nutritive).

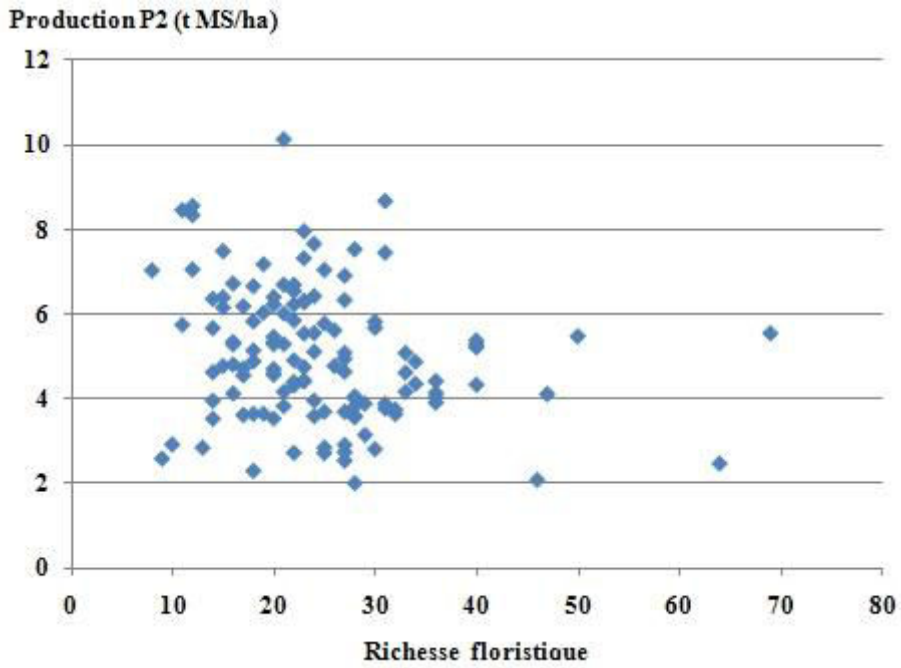


Figure 43. Etude du lien entre la production en P<sub>2</sub> (en t MS/ha) et la richesse floristique des prairies du réseau.

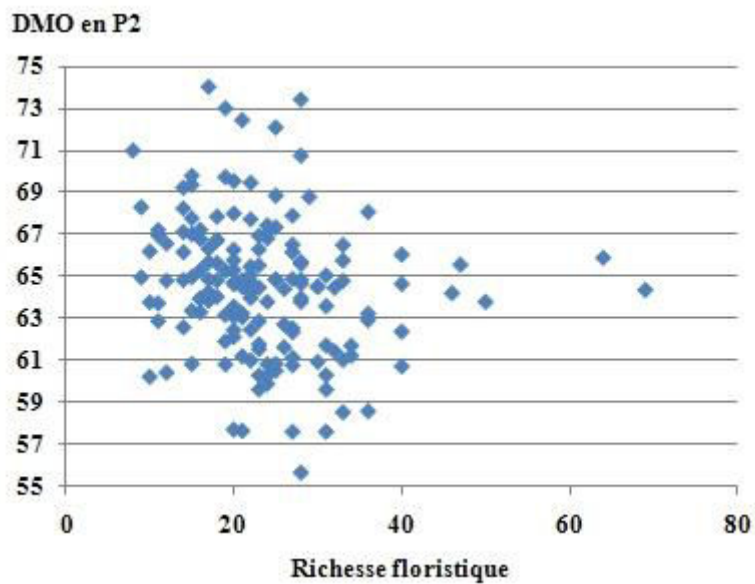


Figure 44. Etude du lien entre la dMO en P<sub>2</sub> (en % MS) et la richesse floristique des prairies du réseau.

## 6. Evaluation des services fourragers et environnementaux des prairies permanentes

Une méthode d'évaluation des services fourragers et environnementaux a été mise en place dans le chapitre 5 de la partie 3. Cette analyse multicritères a notamment pour objectif de comparer les "profils de services" rendus par une prairie ou par un ensemble de prairies. Une telle démarche permettra de mettre en évidence dans quelle mesure une prairie peut concilier des services fourragers et environnementaux. Cela présente un enjeu important pour l'agriculture, qui aujourd'hui doit répondre à des attentes environnementales et sociétales en plus des attentes fourragères. Cette démarche doit cependant être validée. En effet, il est nécessaire de valider les seuils donnés aux attributs avec des experts, ainsi que le choix des agrégations. Les choix des critères pourraient même être approfondis, en travaillant par exemple avec les critères de qualité utilisés dans le rationnement des animaux, tels que les UF, les PDI et les UE plutôt que les variables dMO et MAT. Cette méthode pourrait ensuite être adoptée pour l'ensemble des services considérés dans notre travail pour ensuite être testée dans la typologie nationale. Cela permettrait de montrer dans quelle mesure les services fourragers et environnementaux sont conciliés dans les différents types mais aussi de confronter les services fourragers rendus potentiellement par les prairies et ceux recensés par les éleveurs. Pour aller plus loin, cette méthode peut être utilisée sur la population des 1500 parcelles recensées dans le cadre des enquêtes réalisées dans l'action 1 du programme CASDAR Prairies Permanentes.

## 7. Des connaissances scientifiques à des outils techniques

Dans une démarche de recherche finalisée, les connaissances scientifiques ont vocation à permettre de construire des outils (Jouven *et al.* 2006 ; Wan Liqiang *et al.* 2009 ; Bezac et Halada 2010 ; Duru *et al.* 2010c) applicables sur le terrain. Ces outils peuvent être par exemple des modèles de gestion de l'herbe (Delaby *et al.* 2001 ; Cruz *et al.* 2010) ou des typologies (Fleury *et al.* 1996). La méthode de prédiction des services fourragers et environnementaux, à partir des descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion ainsi qu'à partir des états de la végétation nous a permis de construire un outil technique, une typologie nationale des prairies permanentes, qui contient et décrit 19 types de prairies à partir des données acquises sur le réseau national (Annexe 5). En effet, nous avons distingué différents types de prairies dans notre réseau de parcelles. Par exemple, nous avons mis en évidence des prairies d'altitude, à faible production mais caractérisées par une proportion

élevée de graminées de TF C. Nous avons donc construit des types de prairies selon leurs caractéristiques de végétation.

Plusieurs typologies ont été construites en Europe et en France (Daccord *et al.* 2006 ; Plantureux et Thorion 2005 ; Petit *et al.* 2004 ; Fleury *et al.* 1996). Ces outils sont basés sur une approche par la végétation. Certaines typologies ont été construites selon la physionomie des graminées (Fleury *et al.* 1996 ; Petit *et al.* 2004), d'autre sont basées sur une approche phytosociologique (CASDAR Prairies AOP Massif Central) ou sur la composition botanique (Plantureux et Thorion 2005). La végétation peut constituer la clé d'entrée de la typologie (Fleury *et al.* 1996 ; Petit *et al.* 2004) mais pour faciliter l'utilisation sur le terrain, il est préférable de favoriser une entrée sur le milieu et les pratiques de gestion (Plantureux et Thorion 2005 ; Daccord *et al.* 2006). Ces typologies regroupent des informations plus ou moins étoffées sur les critères de production et de qualité des prairies (Fleury *et al.* 1996 ; Petit *et al.* 2004 ; Plantureux et Thorion 2005). Certaines apportent des informations sur les intérêts environnementaux (Masson *et al.* 2000 ; Plantureux et Thorion 2005). Elles sont un support de terrain destiné à apporter des références quantitatives sur les valeurs des prairies. Les typologies sont des outils utilisables à l'échelle de la prairie (Petit *et al.* 2004 ; Fleury *et al.* 1996) et parfois accompagnées d'outils de diagnostic à l'échelle du système fourrager (Plantureux et Thorion 2005 ; CASDAR Prairies AOP Massif Central). De plus, certaines typologies ont simulé des évolutions entre les types de prairies, selon les pratiques de gestion (Petit *et al.* 2004), ce qui permet aux utilisateurs d'engager une réflexion sur la conduite du système fourrager.

La typologie nationale des prairies permanentes, que nous avons construite est basée sur la végétation (composition botanique et fonctionnelle), avec une entrée par le milieu et les pratiques de gestion. Avec pour objectif est de mettre en avant les services fourragers et environnementaux des prairies permanentes, des informations sur les critères d'aptitude des services fourragers (production et valeur alimentaire) à différentes périodes de l'année, sont disponibles. De même, des informations sur les services environnementaux, à partir des états de la végétation sont mises à disposition. Cet outil permet donc de montrer dans quelle mesure une prairie permanente peut concilier les services fourragers et environnementaux et permet d'apporter des références sur les valeurs fourragères des prairies permanentes françaises. Les tables INRA (2007) n'apportaient jusqu'à présent que quelques références de valeur alimentaire sur trois types de prairies (à partir de deux études anciennes conduites par l'INRA en Normandie et en Auvergne, et pour les Alpes des données acquises par Fleury).

Les variabilités des valeurs des prairies permanentes n'étaient donc pas répertoriées et aucun lien ne pouvait être fait, ni avec les caractéristiques de milieu et les pratiques, ni avec la composition de la végétation. Cet outil ne permet pas de raisonner à l'échelle de l'exploitation agricole. Cependant, quelques recommandations en termes de pratiques de gestion sur la parcelle sont données. Il est important de noter que cet outil national ne peut représenter toute la diversité des prairies à l'échelle d'une région et notamment en montagne. Pour cela, les outils mis en place à une échelle régionale pourront apporter des informations complémentaires et les liens entre la typologie nationale et les typologies régionales seront à construire dans le futur. En effet, construire une typologie nationale nécessite travailler sur une maille plus large et les précisions sont donc plus faibles. Cet outil permet donc d'apporter des références fourragères et environnementales sur les grands types de prairies utilisés en France.



## Conclusions et perspectives

A l'issue de ce travail de thèse, nous avons acquis une meilleure connaissance des descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion qui déterminent la composition botanique et fonctionnelle des prairies permanentes, et des relations entre la composition de la végétation des prairies et leur aptitude à procurer des services fourragers et des services environnementaux. Nous avons hiérarchisé notre travail en plusieurs étapes, en construisant des modèles de prédiction et en travaillant sur une démarche multicritères.

Ma thèse a permis de construire des modèles de prédiction des états de la végétation à partir des descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion. Nous avons montré que la composition botanique est essentiellement influencée par des descripteurs pédoclimatiques alors que la composition fonctionnelle dépend à la fois des descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion. Ce travail nous a permis d'identifier pour chaque variable de la composition botanique ou fonctionnelle, un nombre restreint de descripteurs contribuant à la prédiction de ces variables. Les modèles de prédiction sont plus précis pour la composition botanique que pour la composition fonctionnelle.

Dans ce travail nous avons également étudié les liens entre la composition fonctionnelle et les critères d'aptitude des services fourragers (production et valeur nutritive) des prairies permanentes. Dans le cadre de l'étude d'un dispositif expérimental portant sur trois prairies de composition contrastée en types fonctionnels, nous avons confirmé les différences de production et de qualité qui peuvent être prévues au premier cycle de végétation par la composition en types fonctionnels. Nous avons montré que ces différences se maintiennent au cours des cycles de végétation suivants, et nous avons quantifié la dynamique de production et de qualité de la prairie au cours de la saison selon son type fonctionnel. Toutefois, sur le dispositif "*réseau national*" caractérisé par un large gradient de milieux et de pratiques, la caractérisation de la végétation par la composition en types fonctionnels n'explique qu'une faible part de la variabilité de la production et de la qualité des prairies. La prise en compte d'autres composantes de la composition fonctionnelle comme la proportion de légumineuses et de diverses permet d'expliquer une part plus importante de la variabilité observée. D'autres caractéristiques de la végétation comme la teneur en MS et le stade moyen de végétation contribuent également à expliquer les variations de production et de qualité. Trente à 50% de la variabilité observée sur les critères de production et de qualité a pu être expliquée en

combinant ces différentes variables caractérisant la végétation des prairies permanentes du "réseau national".

Enfin, nous avons mis en place une démarche multicritères permettant de lier les critères d'aptitude aux services fourragers et environnementaux. Cette méthode a pour ambition de montrer dans quelle mesure une prairie ou un groupe de prairies peut concilier des services fourragers et environnementaux. Cependant cette démarche nécessite d'être validée par des experts, afin de pouvoir prédire l'ensemble des services considérés.

Ma thèse a donc permis de construire les bases d'une méthode de prédiction des services fourragers et environnementaux des prairies permanentes à partir de la connaissance du milieu, des pratiques de gestion et de quelques critères simples caractérisant la végétation. Cependant il est nécessaire dans une étape suivante de valider cette démarche. En effet, ce travail n'avait pas pour ambition d'aller jusqu'à la validation des modèles. De plus, certains services d'intérêt identifiés dans la bibliographie n'ont pas pu être étudiés, comme la valeur aromatique des prairies ou la séquestration du carbone, en raison des difficultés d'évaluation. Des travaux complémentaires pourraient permettre de construire des outils d'évaluation de ces services, ce qui permettrait d'enrichir la palette de services fourragers et environnementaux déjà étudiés. L'étude d'autres services liés à la santé animale et à d'autres approches de la qualité nutritive de l'herbe (micronutriments, composés secondaires...) pourraient aussi être envisagés. De plus, ce travail effectué sur une large gamme de milieux et pratiques de gestion pourrait être élargi à d'autres zones françaises voire européennes.

En plus des connaissances scientifiques acquises, ce travail de thèse a également eu un intérêt technique. L'ensemble des données collectées sur le réseau national et les relations établies ont permis de construire un outil de terrain (typologie nationale des prairies permanentes) destiné à apporter des références fourragères et environnementales sur les prairies permanentes. Cette typologie permet d'apporter de nouvelles références techniques sur les prairies permanentes dans le but de promouvoir leur utilisation et de montrer dans quelles mesures les prairies permanentes peuvent concilier services fourragers et environnementaux. Cet outil pourra par la suite être enrichi et complété notamment pour permettre un diagnostic à l'échelle du système fourrager.

Ce travail de thèse a été à l'interface de plusieurs disciplines : l'écologie, l'agronomie et la zootechnie. Durant ces trois années, les conceptions de l'agro-écologie et de l'agronome-



zootechnicien se sont donc croisées, dans une démarche commune. La mise en commun de ces deux conceptions a pu générer quelques difficultés, par exemple pour l'étude des liens entre les états de la végétation et les critères d'aptitudes fourragers et environnementaux. En effet, si les critères d'aptitude aux services environnementaux peuvent être directement déduits de la composition de la végétation, il n'en est pas de même pour les critères d'aptitude aux services fourragers, qui doivent traduire l'utilisation de la prairie par l'herbivore. Ces démarches faisant appel à plusieurs disciplines sont certes plus difficiles à gérer mais sont très enrichissantes et nécessaires pour répondre aux enjeux agricoles actuels.

Enfin ce travail sur les prairies permanentes a permis de réunir de nombreux "fourragers", que ce soient des techniciens, des ingénieurs ou des chercheurs, pour échanger sur une thématique commune : la prairie permanente. Ma thèse aura donc été à l'origine d'une avancée scientifique, technique et sociale, avec pour enjeu de revaloriser les prairies permanentes dans les systèmes fourragers. Ces surfaces y ont une place légitime, d'autant plus qu'elles sont économes en intrants et permettent de concilier des enjeux environnementaux et fourragers.



# **Références bibliographiques**



- AGRESTE, (2000). Les prairies en 1998. *Agreste Chiffres et Données Agriculture* 128, 1-73.
- AGRESTE, (2011). Prairies non permanentes et surfaces toujours en herbe. *Bureau des Statistiques sur les Productions et les Comptabilités Agricoles 2008-2009 semi-définitive*. 1-2.
- AL HAJ KHALED, R., CRUZ, P., DURU, M. et THEAU, J. (2004). Stability of leaf traits and species ranking across seasons and nitrogen availability. In: *Proceedings of the 20th General Meeting of the European Grassland Federation*, pp. 781-783. Lucerne, Suisse: Land use systems in grassland dominated regions.
- AL HAJ KHALED, R., DURU, M., THEAU, J.P., PLANTUREUX, S. et 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**, 391-398.
- AL HAJ KHALED, R., DURU, M., DECRUYENAERE, V., JOUANY, C. et CRUZ, P. (2006). Using leaf traits to rank native grasses according to their nutritive value. *Rangeland Ecology & Management* **59**, 648-654.
- AMBROISE, R., BONNEAUD, F. et BRUNET-VINCK, V., (2000) *Agriculteurs et paysages: dix exemples de projet de paysage en agriculture*, pp. 207. Quétigny : Educagri.
- AMBROISE, R., MAAPAR/DERF et HUBERT, D. (2002). L'agriculture et la forêt dans le paysage, pp.1-104. La Ferté-Macé, France : Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et des Affaires rurales.
- AMMANN, C., FLECHARD, C.R., LEIFELD, J., NEFTEL, A. et FUHRER, J. (2007). The carbon budget of newly established temperate grassland depends on management intensity. *Agriculture Ecosystem & Environment* **121** (1-2), 5-20.
- ANDUEZA, D., CRUZ, P., FARRUGGIA, A., BAUMONT, R., PICARD, F. et the late of MICHALET-DOREAU B. (2010). Nutritive value of two meadows and relationships with some vegetation traits. *Grass and Forage Science* **65**, 325-334.
- ANSQUER, P., THEAU, J-P., CRUZ, P., VIEGAS, J., AL HAJ KHALED, R. et DURU, M. (2004). Caractérisation de la diversité fonctionnelle des prairies à flore complexe : vers la confection d'outils de gestion. *Fourrages* **179**, 353-368.
- ANSQUER P. (2006) *Caractérisation agroécologique des végétations prairiales naturelles en réponse aux pratiques agricoles. Apport pour la construction d'outils de diagnostic*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France.

- ANSQUER, P., DURU, M., THEAU, J-P. et CRUZ, P. (2009). Convergence in plant traits between species within grassland communities simplifies their monitoring. *Ecological Indicators* **9**, 1020-1029.
- AUFRERE, J. (1982). Prediction of forage digestibility by means of an enzymatic procedure. *Annales de zootechnie* **31 (2)**, 111-130.
- AUFRERE, J. et DEMARQUILLY, C. (1989). Predicting organic matter digestibility of forage by two pepsin-cellulase methods. In: *Proceedings of the XVI International Grassland Congress*, pp. 877-878. Nice, France: Association Française pour la Production Fourragère.
- AUFRERE, J., BAUMONT, R., DELABY, L., PECCATTE, J-R., ANDRIEU, J, ANDRIEU, J-P. et DULPHY, J-P. (2007). Laboratory prediction of forage digestibility by the pepsin-cellulase method. The renewed equations. *Productions Animales* **20 (2)**, 129-135.
- BALENT, G. et DURU, M. (1984). Influence of Management on the Characteristics and Development of Permanent Grasslands in the Central Pyrenees. *Agronomie* **4 (2)**, 113-124.
- BALVANERA, P, PFISTERER, A.B., BUCHMANN, N., HE, J.-S., NAKASHIZUKA, T., RAFFAELLI, D. et SCHMID, B. (2006). Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecology Letters*, **9**, 1-1.
- BATARY, P., BALDI, A., SAROPATAKI, M., KOHLER, F., VERHULST, J., KNOP, E., HERZOG, F. et KLEIJN, D. (2010). Effect of conservation management on bees and insect-pollinated grassland plant communities in three European countries. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **136**, 35-39.
- BAUMONT, R., AUFRERE, J., NIDERKORN, V., ANDUEZA, D., SURAULT, F., PECCATTE, J-R., DELABY, L. et PELLETIER, P. (2008). Specific diversity in forages: its consequences on the feeding value. *Fourrages*, **194**, 189-206.
- BEZAC, P. et HALADA, L. (2010). Sustainable Management Recommendations to Reduce the Loss of Agricultural Biodiversity in the Mountain Regions of NE Slovakia. *Mountain Research and Development* **30 (3)**, 192-204.
- BERANGER, C. (2002). La multifonctionnalité des prairies: les acquis et les interrogations du 19<sup>e</sup> Congrès européen des herbagers. *Fourrages* **171**, 227-237.
- BEROUKOUTOU, M. (1986). *Influence de quelques facteurs climatiques sur le développement, la composition et la valeur nutritive de deux graminées en vert*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, Montpellier, France.

- BIRELL, H.A. et THOMPSON, R.L. (2006). Effect of environmental factors on the growth of grazed pasture in south-western Victoria. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, **46**, 545-554.
- BJÖRKLUND, J., LIMBURG, K.E. et RYDBERG, T. (1999). Impact of production intensity on the ability of the agricultural landscape to generate ecosystem services: an example from Sweden. *Ecological Economics* **29**, 269-291.
- BOHANEK, M. et RAJKOVIC, V. (1990). DEXi: An Expert System Shell for Decision Support. *Sistemica* **1(1)**, 145-157.
- BOHANEK, M., MESSEAN, A., SCATASTA, S., ANGEVIN, F., GRIFFITHS, B., KROGH, P.H., ZNIDARSIC, M. et DZEROSKI, S. (2008) A qualitative multi-attribute model for economic and ecological assessment of genetically modified crops. *Ecological Modelling* **215**, 247-261.
- BOHANEK, M. DEXi, [DEXi: program for multi-attribute decision making, Version 3.02. Jozef Stefan Institute, Ljubljana.]. <http://www-ai.ijs.si/MarkoBohanec/dexi.html> (20 avril 2011).
- BOYD, J. et BANSHAF, S. (2007). What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*, **63**, 616-626.
- BROYER, J. et PRUDHOMME, J. (1995). Effect of fertilizers on floristic diversity of flooded meadows in the Saone Valley. *Ecologie*, **26**, 45-58.
- BRUINENBERG, M-H., VALK, H-H., KOREVAAR, H. et STUIK, P.C. (2002). Factors affecting digestibility of temperate forages from semi-natural grassland. *Grass and Forage Science* **57**, 292-301.
- BRUM, O., LOPEZ, S., GARCIA, R., ANDRES, S. et CALLEJA, A. (2009). Influence of harvest season, cutting frequency and nitrogen fertilization of mountain meadows on yield, floristic composition and protein content of herbage. *Revista Brasileira de Zootecnia*, **38**, 596-604.
- BRUNIAS, M. (2009). *Contribution à l'évaluation de la valeur organoleptique des prairies permanentes: réflexion sur le développement d'un indicateur*. Rapport de stage, Nancy-Université, Nancy, France.

- BUCKEE, G.K. (1994). Determination of Total Nitrogen in Barley, Malt and Beer by Kjeldahl Procedures and the Dumas Combustion Method - Collaborative Trial. *Journal of the Institute of Brewing* **100** (2), 57-64.
- BUTKUVIENE, E. et BUTKUTE, R. (2008). Effects of pasture improvement measures on sward productivity, botanical and chemical composition. *Zemes ukio Mokslai*, **15** (2), 46-52.
- CINGOLANI, A.M., POSSE, G. et COLLANTES, M.B. (2005). Plant functional traits, herbivore selectivity and response to sheep grazing in Patagonian steppe grassland. *Journal of Applied Ecology* **42**, 50-59.
- COP, J., VIDRIH, M. et HACIN, J. (2009). Influence of cutting regime and fertilizer application on the botanical composition, yield and nutritive value of herbage of wet grasslands in Central Europe. *Grass and Forage Science* **64**, 454-465.
- CORRAL, A-J. et FENLON, J.S. (1977). A comparative method for describing the seasonal distribution of production from grass. *Journal of Agricultural Sciences* **91**, 61-67.
- COSTANZA, R. (2008). Ecosystem services: Multiple classification systems are needed. *Biological Conservation* **141** (2), 350-352.
- COULON, J-B., HAUWUY, A., MARTIN, B. et CHAMBA, J-F. (1997). Pratiques d'élevage, production laitière et caractéristiques des fromages dans les Alpes du Nord. *INRA Productions Animales* **10** (3), 195-205.
- COULON, J-B. et PRIOLO, A. (2002). La qualité sensorielle des produits laitiers et de la viande dépend des fourrages consommés par les animaux. *INRA Productions Animales* **15** (5), 333-342.
- CRUZ, P., DURU, M., THEROND, O., THEAU, J.-P., DUCOURTIEUX, C., JOUANY, C., AL HAJ KHALED, R. et ANSQUER, P. (2002). Une nouvelle approche pour caractériser les prairies naturelles et leur valeur d'usage. *Fourrages* **172**, 335-354.
- CRUZ, P., THEAU, J.-P., LECLOUX, E., JOUANY, C. and DURU, M. (2010). Typologie fonctionnelle de graminées fourragères pérennes: une classification multitraits. *Fourrages* **201**, 11-17.
- DACCORD, R., WYSS, U., KESSLER, J., ARRIGO, Y., ROUEL, M., LEHMANN, J. et JEANGROS, B. (2006). Estimation de la valeur du fourrage des prairies. Suisse : Agridea.



- DAGET, P. et GORDON, M. (1982). *Analyse fréquentielle de l'écologie des espèces dans les communautés*. Paris : Masson (18), Collection d'Ecologie.
- DAILY, G.C (1997). Introduction: what are ecosystem services? In: *Nature's Services*, pp.1-10. Washington DC: Daily,G.C.E.
- DEFFONTAINES, J-P. et PRINGENT, P. (1987). Lecture agronomique du paysage. *Mappemonde* (8), 34-37.
- DEFRANCE, P., DELABY, L. et SEURET, J-M. (2004). Mieux connaître la densité de l'herbe pour calculer la croissance, la biomasse d'une parcelle et le stock d'herbe disponible d'une exploitation. *Renc.Rech.Ruminants* 11, 291-294.
- DEINUM, B. et DIRVEN, J.G.P. (1975). Climate, nitrogen and grass. 4.. The influence of age on chemical composition in vitro digestibility of maize (*Zea mays* L.) and tall fescue (*Festuca arundinacae* Schreb.). *Netherlands Journal of Agricultural Science* 29, 141-150.
- DELABY, L., PEYRAUD, J-L. et FAVERDIN, P. (2001). Pâtur'IN : le pâturage des vaches laitières assisté par ordinateur. *Fourrages* 167, 385-398.
- DELATTRE, P. et GIRAUDOUX, P. (2009). *Le campagnol terrestre: prévention et contrôle des populations*, pp. 1-261. France: QUAE.
- DELPECH, R., DUME, G. et GALMICHE, P. (1985). *Typologie des stations forestières. Vocabulaire*. pp. 1-241. Paris : Institut pour le développement forestier.
- DELPECH, R. (2005). Structure of some grassland and meadow plant communities from basic substrates of Vanoise mountains (France). *Acta Botanica Gallica*, 152, 465-481.
- DEMARQUILLY, C et WEISS, Ph. (1970). *Tableaux de la valeur alimentaire des fourrages*, pp. 1-64. France : Ministère de l'Agriculture, INRA, S.E.I.
- DEMARQUILLY, C. et JARRIGE, R. (1981). Panorama des méthodes de prévision de la digestibilité et de la valeur énergétique des fourrages. In: *Prévision de la valeur nutritive des aliments des ruminants*. pp. 41-59. France : INRA Publ.
- DEMARQUILLY, C. et ANDRIEU, J. (1988). Les fourrages. In : *Alimentation des bovins, ovins et caprins*, pp. 315-337. France : INRA.
- DE MONTARD, F. (1981). L'action des facteurs climatiques sur la croissance de l'herbe. *Fourrages* 85, 39-52.

- DEVUN, J. et LEGARTO, J. (2011). Fourrages conservés, modes de récolte et systèmes d'élevage : la situation dans les grandes zones d'élevage en France. In : *Journées AFPF*, pp 3-28. Paris, France : Récolte et valorisation des fourrages conservés.
- DIAZ, S., MARCELO, C. et CASANOVES, F. (1998). Plant functional traits and environmental filters at a regional scale. *Journal of Vegetation Science* **9**, 113-122.
- DIBB, D.W., FIXEN, P.E. et MURPHY, L.S. (1990). Balanced Fertilization with Particular Reference to Phosphates - Interaction of Phosphorus with Other Inputs and Management-Practices. *Fertilizer Research*, **26**, 29-52.
- DIQUELOU, S., LECONTE, D. et SIMON, J.C. (2003). Diversité floristique des prairies permanentes de Basse Normandie. *Fourrages* **173**, 3-22.
- DROGOUL, C., GADOUD, R., JOSEPH, M-M., JUSSIAU, R., LISBERNEY, M-J., MANGEOL, B., MONTMÉRAS, L. et TARRIT, A. (2004). *Nutrition et alimentation des animaux d'élevage Tome 1*. Dijon: Quae.
- DUMONT, B., ROOK, A.J., CORAN, CH. et RÖVER, K-U. (2007). Effects of livestock breed and grazing intensity on biodiversity and production in grazing systems. 2. Diet selection. *Grass and Forage Science* **62**, 159-171.
- DUMONT, B., FARRUGGIA, A., GAREL, J-P., BACHELARD, P., BOITIER, E. et FRAIN, M. (2009). How does grazing intensity influence the diversity of plants and insects in a species-rich upland grassland on basalt soils? *Grass and Forage Science*, **64**, 92-105.
- DURU, M. (2000). Le volume d'herbe disponible par vache: un indicateur synthétique pour évaluer et conduire un pâturage tournant. *INRA Productions Animales* **13** (5), 325-336.
- DURU, M., CRUZ, P., THEAU, J-P., JOUANY, C., ANSQUER, P., AL HAJ KHALED, R. et THEROND, O. (2007). Typologies des prairies riches en espèces en vue d'évaluer leur valeur d'usage: bases agro-écologiques et exemple d'application. *Fourrages*, **192**, 453-475.
- DURU, M., CRUZ, P., AL HAJ KHALED, R., DUCOURTIEUX, C. et THEAU, J-P. (2008). Relevance of plant functional types based on leaf dry matter content for assessing digestibility of native grass species and species-rich grassland communities in spring. *Agronomy Journal* **100**, 1622-1630.
- DURU, M., AL HAJ KHALED, R., DUCOURTIEUX, C., THEAU, J-P., DE QUADROS, F.L.F. et CRUZ, P. (2009). Do plant functional types based on leaf dry matter content allow

characterizing native grass species and grasslands for herbage growth pattern? *Plant Ecol.* **201**, 421-433.

DURU, M., CRUZ, P. et THEAU, J-P. (2010a). A simplified method for characterising agronomic services provided by species-rich grasslands. *Crop & Pasture Science*, **61**, 420-433.

DURU, M., ANSQUER, P., JOUANY, C., THEAU, J-P. et CRUZ, P. (2010b). Comparison of methods for assessing the impact of different disturbances and nutrient conditions upon functional characteristics of grassland communities. *Ann. Bot.* **106 (5)**, 823-831.

DURU, M., CRUZ, P., JOUANY, C. et THEAU, J.P. (2010c). Herb'type: un nouvel outil pour évaluer les services de production fournis par les prairies permanentes. *INRA Productions Animales* **23 (4)**, 319-332.

EBELING, A., KLEIN, A.M., SCHUMACHER, J., WEISSER, W.W. et TSCHARNTKE, T. (2008). How does plant richness affect pollinator richness and temporal stability of flower visits? *OIKOS* **117**, 1808-1815.

ELISSEOU, G.C., VERESOGLOU, D.S. et MAMOLOS, A.P. (1995). Vegetation productivity and diversity of acid grasslands in Northern Greece as influenced by winter rainfall and limiting nutrients. *Acta Oecologica-International Journal of Ecology* **16**, 687-702.

ERIZHEV, K. et TAMOV, M. (2003). Role of fertilization in increasing the quality of hay from natural land. *Kormoproizvodstvo* **7**, 7-10.

ESTALRICH, E., HERNANDEZ, A. et PASTOR, J. (1992). Edaphic conditions for legume and grass species evaluation on siliceous soils in a Mediterranean environment. In: *Proceedings second congress of the European Society for Agronomy*, pp. 244-245, Warwick University.

FAOSTAT. *Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture*, [Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture: Prairies]. <http://faostat.fao.org/default.aspx> (15/01/2011).

FARRUGGIA, A., MARTIN, B., BAUMONT, R., PRACHE, S., DOREAU, M., HOSTE, H. et DURAND, D. (2008). Quels intérêts de la diversité floristique des prairies permanentes pour les ruminants et les produits animaux ? *INRA Productions Animales* **21 (2)**, 181-200.

FARRUGGIA, A., POMIES, D., BETHIER, A., TROQUIER, O., BEE, G., PACCARD, P., BAUMONT, B. et PRADEL, P. (2010). Balance between production and biodiversity in two

upland dairy grazing systems. In: *Proceeding of the 23rd General Meeting of the European Grassland Federation*, pp. 940-942. Kiel, Germany: Grassland in a changing world.

FICHET-CALVET, E., PRADIER, B., QUERE, J-P., GIRAUDOUX, P. et DELATTRE, P. (2000). Landscape composition and vole outbreaks: evidence from an eight year study of *Arvicola terrestris*. *Ecography* **23**, 659-668.

FIGUEIRA, J., GRECO, S. et EHRGOTT, M. (2005). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Boston, Dordrecht London : Springer Verlag.

FISHER, B. et TURNER, R.K. (2008). Ecosystem services: Classification for valuation. *Biological Conservation*, **141**, 1167-1169.

FISHER, B., TURNER, R.K. et MORLIN, G P. (2009). Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, **68**, 643-653.

FLEURY, Ph. (1994) *Le diagnostic agronomique des végétations prairiales et son utilisation dans la gestion des exploitations agricoles. Typologies fondées sur les aptitudes des prairies à remplir des fonctions. Méthode et applications dans les Alpes du Nord*. PhD thesis, Université de Lorraine, Nancy, France.

FLEURY, Pa. (1995) *Aptitude des couverts prairiaux à assurer des fonctions agricoles et environnementales: recherche méthodologique et application aux prairies de fauche des Alpes du Nord*. PhD thesis, Université de Lorraine, Nancy, France.

FLEURY, Ph., DUBOEUF, B. et JEANNIN, B. (1996). Forage management in dairy farms: a methodological approach. *Agricultural Systems* **52**, 199-212.

FOLTÊTE, J-C., BERTHIER, K. et COSSON, J-F. (2005). Paysage et pullulation animale: les facteurs paysagers de la vitesse de propagation des vagues de pullulation du campagnol terrestre. *Cybergeo: European Journal of Geographie*.

FONSECA, C.R., OVERTON, J.M., COLLINS, B. et WESTOBY, M. (2000). Shifts in trait-combinations along rainfall and phosphorus gradients. *Journal of Ecology*, **88**, 964-977.

FRANZEN, M et NILSSON, S.G. (2008). How can we preserve and restore species richness of pollinating insects on agricultural land? *Ecography* **31**, 698-708.

GAC, A., DOLLÉ, J-B., LE GAIL, A., KLUMPP, K., TALLEC, T., MOUSSET, J., EGLIN, T., BISPO, A., PEYRAUD, J-L. et FAVERDIN, P. (2010). Le stockage de carbone par les prairies, pp. 1-11. Paris: Institut de l'Élevage.

- GALKA, A., ZARZYCKI, J. et KOPEC, M. (2005). Effect of different fertilisation regimes on species composition and habitat in a long-term grassland experiment. In: *Proceedings of the 13th International Occasional Symposium of the European Grassland Federation*, pp. 132-135. Tartu, Estonia: Integrating efficient grassland farming and biodiversity.
- GERBER, M., ASTIGARRAGA, L., BOCKSTALLER, C., FIORELLI, J.L., HOSTIOU, N., INGRAND, S., MARIE, M., VEYSSET, P., AMBROISE, R., PEIGNE, S., PLANTUREUX, S. et COQUIL, X. (2009). Le modèle Dexi-SH\* pour une évaluation multicritère de la durabilité agroécologique des systèmes d'élevage bovins laitiers herbagers. *Innovations agronomiques* 4, 249-252.
- GNISS. Dossier collection fourragère, [Dossier collection fourragère], [http://www.gnis-pedagogie.org/pages/collections\\_fourrageres/PDF](http://www.gnis-pedagogie.org/pages/collections_fourrageres/PDF) (20 avril 2011).
- GRAGNAIRE, S. et VANHAECKE, C. (1997) *Une plante, un fromage, un goût... Quelle relation peut-on envisager entre la flore pâturée et la qualité sensorielle des fromages?* Mémoire, ENITA Clermont Ferrand, Clermont Ferrand, France.
- GRAUX, A-I (2011). *Modélisation des impacts du changement climatique sur les écosystèmes prairiaux. Voies d'adaptation des systèmes fourragers*. PhD thesis, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand II, Clermont Ferrand, France.
- GREENHALGH, J-F-D. et REID, G-W. (1971). Relative palatability to sheep of straw, hay and dried grass. *British Journal of Nutrition* **26**, 107-116.
- GRIME, J-P. (1977). Evidence for Existence of 3 Primary Strategies in Plants and Its Relevance to Ecological and Evolutionary Theory. *American Naturalist* **111 (982)**, 1169-1194.
- GRIME, J-P., HODGSON, J-G. et HUNT, R. (1979). *Comparative plant ecology: a functional approach to common British species*. London : Unwin Hyman.
- GUERIN, G. et BELLON, S. (1990). Analyse des fonctions des surfaces pastorales dans des systèmes de pâturage méditerranéens. In: Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement, In *Recherches sur les Systèmes Herbagers. Quelques propositions françaises*. pp. 147-158. Versailles: INRA.
- GUTAUSKAS, J., DAUGELIENE, N. et DAUGELIENE, P. (2005). The relationship between the weather conditions and botanical composition and dry matter yield of a long-term

pasture. In: *13th International Occasional Symposium of the European-Grassland-Federation*, pp. 605-608. Tartu, Estonia: Grassland Science in Europe.

GUISEPELLI, E. et FLEURY, Ph. (2003). *Paysages et agriculture dans les Alpes du nord. Représentations et aspirations de la société*. France : GIS Alpes du Nord.

HECTOR, A., SCHMID, B., BEIERKUHNLEIN, C., CALDEIRA, M-C., DIEMER, M., DIMITRAKOPOULOS, P.G., FINN, J.A., FREITAS, H., GILLER, P.S., GOOD, J., HARRIS, R., HOGBERG, P., HUSS-DANELL, K., JOSHI, J., JUMPPONEN, A., KORNER, C., LEADLEY, P.W., LOREAU, M., MINNS, A., MULDER, C.P.H., O'DONOVAN, G., OTWAY, S.J., PEREIRA, J.S., PRINZ, A., READ, D.J., SCHERER-LORENZEN, M., SCHULZE, E.D., SIAMANTZIOURAS, A.S.D., SPEHN, E.M., TERRY, A.C., TROUMBIS, A.Y., WOODWARD, F.I., YACHI, S. et LAWTON, J.H. (1999). Plant diversity and productivity experiments in European grasslands. *Science* **286 (5442)**, 1123-1127.

HOPKINS, A. (1986). Botanical composition of permanent grassland in England and Wales in relation to soil, environment and management factors. *Grass and Forage Science* **41**, 237-246.

HOPKINS, A. et HOLZ, B. (2006). Grassland for agriculture and nature conservation: production, quality and multi-functionality. *Agronomy research* **4**, 3-20.

HOPWOOD, J.L. (2008). The contribution of roadside grassland restorations to native bee conservation. *Biological Conservation*, **141**, 2632-2640.

HUYGUE, C. (2008). Multi-function grasslands in France: I. Production functions. *Cahiers Agricultures* **17 (5)**, 427-435.

HWANG, C.L. et YOON, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Berlin: Springer-Verlag.

INRA (2007). *Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoin des animaux-valeur des aliments. Tables INRA2007*. Versailles: INRA.

INSTITUT TECHNIQUE DE L'ELEVAGE BOVIN (1991). Le point sur le pâturage des vaches laitières. Bases de la conduite et de la complémentation. pp. 1-89. Paris: ITEB.

ISSELSTEIN, J. et RIDDER, P. (1993). Studies on drying of some grassland herbs under controlled conditions. *Wirtschaftseigene Futter* **39 (2)**, 136-145.

ISSELSTEIN, J., GRIFFITH, B.A., PRADEL, P. et VENERUS, S. (2007). Effects of livestock breed and grazing intensity on biodiversity and production in grazing systems. 1.

- Nutritive value of herbage and livestock performance. *Grass and Forage Science*, **62**, 145-158.
- JAROLIMEK, I., BANASOVA, V. et OTAHELOVA, H. (2000). Changes in alluvial grassland vegetation in relation to flood dynamics and soil moisture. *Ekologia-Bratislava* **19** (1), 39-53.
- JARRIGE, R. (1988). Ingestion et digestion des aliments. In : *Alimentation des bovins, ovins et caprins*, pp. 29-56. Paris: INRA.
- JEANGROS, B. et SCHMID, W. (1991). Production et valeur nutritive des prairies permanentes riches en espèces. *Fourrages*, **126**, 131-136.
- JEANGROS, B., BERTHER, V. et SCEHOVIC, J. (1994). Plantes herbacées dicotylédones : une contribution à la biodiversité des prairies permanentes. *Revue Suisse Agric.* **26** (3), 151-154 et 163-166.
- JEANGROS, B., SCEHOVIC, J., TROXLER, J., BACHMANN, H.J. et BOSSET, J.O. (1999). Comparaison de caractéristiques botaniques et chimiques d'herbages pâturés en plaine et en montagne. *Fourrages* **159**, 277-292.
- JEANGROS, B., SCEHOVIC, J., SCHUBIGER, F.X., LEHMANN, J., DACCORD, R. et ARRIGO, Y. (2001). Valeur nutritive des plantes des prairies. Composés phénoliques. *Revue suisse Agric.* **33** (4), 147-151.
- JEANGROS, B. et AMAUDRUZ, M. (2005). Dix ans d'observations sur la phénologie des prairies permanentes en Suisse Romande. *Revue suisse Agric.* **37** (5), 201-209.
- JEANGROS, B. et BERTOLA, C. (2002). Long-term evolution of an intensively managed meadow after cessation of fertilisation and reduction of cutting frequency. In: *Proceedings of the 19th General Meeting of the European Grassland Federation*, pp. 794-795. La Rochelle, France: Multi-function grasslands: quality forages, animal products and landscapes.
- JONES, D. et HAGGAR, R.J. (1997). Impact of nitrogen and organic manures on yield, botanical composition and herbage quality of two contrasting grassland field margins. *Biological Agriculture & Horticulture* **14**, 107-123.
- JONES, M.B. et DONNELL, Y. A. (2004). Carbon sequestration in temperate grassland ecosystems and the influence of management, climate and elevated CO<sub>2</sub>. *New Phytologist* **164**, 423-439.

- JOUVEN, M., CARRERE, P. et 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**, 112-124.
- KADZIULIENE, Z. et KADZIULIS, L. (2007). Botanical composition and stability of yield in legume/grass swards over eight years under grazing. In: *Proceedings of the 14th Symposium of the European Grassland Federation*, pp. 47-50. Ghent, Belgium: Permanent and temporary grassland: plant, environment and economy.
- KAPFER, A. (1988). Studies on the return of fertilized damp grassland to its natural condition - impoverishment and vegetation development. *Dissertationes Botanicae* **120**, 1-154.
- KEMP, D.R. et DOWLING, P.M. (1991). Species Distribution Within Improved Pastures Over Central Nsw in Relation to Rainfall and Altitude. *Australian Journal of Agricultural Research* **42**, 647-659.
- KLIMAS, E. et BALEZENTIENE, L. (2008). Fertilization impact on natural and sown grassland floristic improvement. *Zemes ukio Mokslai*, **15** (2), 41-45.
- KLIMEK, S., KEMMERMANN, A.R.G., HOFMANN, M. et ISSELSTEIN, J. (2007). Plant species richness and composition in managed grasslands: The relative importance of field management and environmental factors. *Biological Conservation* **134**, 559-570.
- KOBES, M., SUCHY, K., VOZENILKOVA, B. et FRELICH, J. (2010). The effect of different grazing systems on botanical composition, diversity and productivity of permanent pasture. In: *Proceedings of the 23rd General Meeting of the European Grassland Federation*, pp. 702-704. Kiel, Germany: Grassland in a changing world.
- KOHOUTEN, A., POZDISEK, J., SRAMEK, P., ODSTRCILOVA, V., NERUSIL, P., KOMAREK, P., GAISLER, J., FIALA, J., MICOVA, P. et SVOZILOVA, M. (2005). Effects of fertilizer level and cutting frequency on yield and forage quality of grasslands. In: *Proceeding of the 13th International Occasional Symposium of the European-Grassland-Federation*, pp. 332-335. Tartu, Estonia: Grassland Science in Europe.
- KOPEC, M., ZARZYCKI, J. et GONDEK, K. (2010). Species Diversity of Submontane Grasslands: Effects of Topographic and Soil Factors. *Polish Journal of Ecology* **58**, 285-295.
- KRAMBERGER, B. et GSELMAN, A. (2000). Changes in productivity and botanical composition of semi-natural grassland as a consequence of cutting frequency. *Rostlinna Vyroba* **46**, 325-330.



- KRAMBERGER, B. et KALIGARIC, M. (2008). Semi-natural grasslands: The effects of cutting frequency on long-term changes of floristic composition. *Polish Journal of Ecology* **56**, 33-43.
- LANTA, V., DOLEZAL, J., LANTOVA, P., KELISEK, J. et MUDRAK, O. (2009). Effects of pasture management and fertilizer regimes on botanical changes in species-rich mountain calcareous grassland in Central Europe. *Grass and Forage Science*, **64**, 443-453.
- LAROUSSE. *Larousse dictionnaires*, [fontion]. <http://www.larousse.fr/dictionnaires/français> (23 avril 2011).
- LAVOREL, S. et GARNIER, E. (2002). Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail. *Functional Ecology* **16**, 545-556.
- LAVOREL, S., GRIGULIS, K., LAMARQUE, P., COLACE, M-P., GARDEN, D., GIREL, J., PELLET, G. et DOUZET, R. (2011). Using plant functional traits to understand the landscape distribution of multiple ecosystem services. *Journal of Ecology* **99**, 135-147.
- LENZ, T.I. et FACELLI, J.M. (2006). Correlations between environmental factors, the biomass of exotic annual grasses and the frequency of native perennial grasses. *Australian Journal of Botany* **54**, 655-667.
- LEROUX, X., BARBAULT, R., BAUDRY, J., BUREL, F., DOUSSAN, I., GARNIER, E., HERZOG, F., LAVOREL, S., LIFRAN, R., ROGER-ESTRADE, J., SARTHOU, J-P. et TROMMETER, M. (2008). Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies. pp. 1-175. France: INRA Expertise scientifique collective.
- LIU, Y.B. et ZHANG, Q.B. (2010). Effect of climate on the growth of annual rings in the main roots of perennial forbs in an Inner Mongolian semi-arid grassland, China. *Journal of Vegetation Science*, **21**, 899-907.
- LOESER, M.R.R., SISK, T.D. et CREWS, T.E. (2007). Impact of grazing intensity during drought in an Arizona grassland. *Conservation Biology* **21**, 87-97.
- LOUAULT, F., PILLAR, V.D., AUFRERE, J., GARNIER, E. et SOUSSANA, J-F. (2005). Plant traits and functional types in response to reduced disturbance in a semi-natural grassland. *Journal of Vegetation Science* **16**, 151-160.

- MAIRE, V. (2009). *Des traits des graminées au fonctionnement de l'écosystème prairial: une approche de modélisation mécaniste*. PhD thesis, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand, France.
- MARIACA, R.G., BERGER, T.F.H., GAUCH, R., IMHOF, M.I., JEANGROS, B. et BOSSET, J.O. (1997). Occurrence of volatile mono- and sesquiterpenoids in highland and lowland plant species as possible precursors for flavor compounds in milk and dairy products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **45** (11), 4423-4434.
- MARIACA, R.G., GAUCH, R., BERGER, T., BOSSET, J. et SCHAR, W. (1998). Volatile compounds of Swiss processed cheeses. *Mitteilungen aus dem Gebiete der Lebensmitteluntersuchung und Hygiene*, **89** (5), 625-638.
- MARIACA, R.G., IMHOF, M.I. et BOSSET, J.O. (2001). Occurrence of volatile chiral compounds in dairy products, especially cheese - A review. *European Food Research and Technology* **212** (3), 253-261.
- MARIYAPPAN, H., NATARAJAN, S. et VIJAYARAGAVAN, M. (2009). Role of fodder legumes in livestock production. *International Journal of Agricultural Sciences*, **5** (1), 311-313.
- MARRIOTT, C.A., FOTHERGILL, M., JEANGROS, B., SCOTTON, M. et LOUAULT, F. (2004). Long-term impacts of extensification of grassland management on biodiversity and productivity in upland areas. A review. *Agronomie* **24(8)**: 447-462.
- MARTIN, B. (1993). *Influence des pratiques d'élevage et de fabrication fromagère sur les caractéristiques du lait et du fromage*. Rapport, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier, Montpellier, France.
- MARTIN, B. et COULON, J-B. (1995). Facteurs de production du lait et caractéristiques des fromages. II. Influence des caractéristiques des laits de troupeaux et des pratiques fromagères sur les caractéristiques du reblochon de Savoie fermier. *Lait* **75**, 133-149.
- MARTINI, A., BIONDI, D., BATISTA, A.C. et NATAL, C.M. (2010). Phenology of native species with landscaping potential. *Semina-Ciencias Agrarias*, **31**, 75-84.
- MASSON, N., FLEURY, P. et PLAIGE, V. (2000). *Alpages et prairies de montagne. Un patrimoine biologique et agricole*. Chambéry : France.
- MAY, F., GRIMM, V. et JELTSCH, F. (2009). Reversed effects of grazing on plant diversity: the role of belowground competition and size symmetry. *OIKOS* **118**, 1830-1843.

- MCINTYRE, S. (2008). The role of plant leaf attributes in linking land use to ecosystem function in temperate grassy vegetation. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **128**, 251-258.
- MEBIROUK-BOUDECHICHE, L., BOUDECHICHE, L., TOUATI, A., TAHAR, A. et ARABA, A. (2010). Nutritional value and floristic composition of permanent grassland multi species: results of a study conducted in North-eastern Algeria. *Livestock Research for Rural Development* **22 (8)**, 1-144.
- MEROU, T.P. et PAPANASTASIS, V.P. (2009). Factors affecting the establishment and growth of annual legumes in semi-arid mediterranean grasslands. *Plant Ecology*, **201**, 491-500.
- MICHAUD, J. (2004). *Ressources fourragères des pâturages d'altitude du Jura*. Mémoire, ENSA Rennes, Rennes, France.
- MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESMENT (2005). Ecosystems and Human Well-Being. Synthesis. In: *A report of the Millenium Ecosystem Assesment*, pp. 219. Island Press, Washington.
- MINISTERE DE L'AGRICULTURE DE L'ALIMENTATION ET DE LA PECHE, DE LA RURALITE ET DE L'AMMENAGEMENT DU TERRITOIRE. *La programmation française de développement rural*, [La programmation française de développement rural]. <http://agriculture.gouv.fr/la-programmation-francaise-de> (04/04/2011).
- MIEVILLE-OTT, V. (2002). Multi-functionality and farmers' identity. In: *Proceedings of the 19th General Meeting of the European Grassland Federation*, pp. 997-1002. La Rochelle, France: Multi-function grasslands: quality forages, animal products and landscapes.
- MOONEN, A.-C. et BARBERI, P. (2008). Functional biodiversity: an agroecosystem approach. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **127**, 7-21.
- MOORE, K.J., MOSER, L.E., VOGEL, K.P., WALLER, S.S, JOHNSON, B.E. et FEDERSEN, J.F. (1991). Describing and quantifying growth stages of perennial forage grasses. *Agron*, **83**, 1073-1077.
- MOSIMANN, E. (2001). Croissance des herbages. Méthodes de mesures et applications pratiques. *Revue Suisse d'Agriculture* **33 (4)**, 163-167.

- NDREATA-KOREN, M., LETO, J., KNEZEVIC, M., BOSNJAK, K., PERCULIJA, G. et IVANKOVIC, A. (2009). Productivity and botanical composition of pasture under grazing and fertilizing. *Mljekarstvo*, **59**, 311-318.
- NELSON, E., MENDOZA, G., REGETZ, J., POLASKY, S., TALLIS, H., CAMERON, D.R., CHAN, K.M.A., DAILY, G.C., GOLDSTEIN, J., KAREIVA, P.M., LONSDORF, E., NAIDOO, R., RICKETTS, T.H. et SHAW, M.R. (2009). Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment* **7** (1), 4-11.
- NERUSIL, P., KOHOUTEK, A., KOMAREK, P. et ODSTRCILOVA, V. (2008). Effects of utilisation intensity and fertilization level on forage production and quality of permanent grassland on a fluvisoil. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* **56** (5), 153-162.
- NICHOLS, E., SPECTOR, S., LOUZADA, J., LARSEN, T., AMEZQUITA, S., FAVILA, M.E. et The Scarabaeinae Research Network (2008). Ecological functions and ecosystem services provided by Scarabaeinae dung beetles. *Biological Conservation* **141** (6), 1461-1474.
- NIELSEN, A.L. et SOEGAARD, K (2000). Forage quality of cultivated and natural species in semi-natural grasslands. In: *Proceeding 18 th General Meeting of the European Grassland Federation*, pp. 213-215. Aalborg, Denmark: Balancing environmental and economics demands.
- NIKLAUS, P.A., WOHLFENDER, M., SIEGWOLF, R. et KÖRNER, C. (2001). Effect of six years atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on plant, soil, and soil microbial C of a calcareous grassland. *Plant and Soil* **233**, 189-202.
- NIQUEUX, M. et ARNAUD, R. (1981). Peut-on prévoir la date d'épiaison des variétés de graminées? *Fourrages*, **88**, 39-56.
- ODSTRCILOVA, V., KOHOUTEK, A., KOMAREK, P. et NERUSIL, P. (2007). Effects of intensity of fertilisation and cutting frequency on botanical composition of permanent grassland on a fluvisoil. In: *Ekologia Travneho Porastu VII*, pp. 301-305. Banska Bystrica, Slovakia.
- ORDONEZ, J.C., VAN BODEGOM, P.M., WITTE, J-P.M., WRIGHT, I.J., REICH, P.B. et AERTS, R. (2010). A global study of relationships between leaf traits, climate and soil measures of nutrient fertility. *Global Ecology and Biogeography* **18**, 137-149.

- PAKEMAN, R., LEPS, J., KLEYER, M., LAVOREL, S., GARNIER, E. et The VISTA Consortium (2009). Relative climatic, edaphic and management controls of plant functional trait signatures. *Journal of Vegetation Science* **20**, 148-159.
- PARRIS, K. (2002). Grasslands and the environment: recent European trends and future directions - an OECD perspective. In: *Proceedings of the 19th General Meeting of the European Grassland Federation*, pp. 957-985. La Rochelle, France: Multi-function grasslands: quality forages, animal products and landscapes.
- PECO, B., RICO, L. et AZCARATE, F-M. (2009). Seed size and response to rainfall patterns in annual grasslands: 16 years of permanent plot data. *Journal of Vegetation Science* **20** (1), 8-16.
- PERVANÇHON, F. (2004). *Modélisation de l'effet des pratiques agricoles sur la diversité végétale et la valeur agronomique des prairies permanentes en vue de l'élaboration d'indicateurs agri-environnementaux*. PhD thesis, Université de Lorraine, Nancy, France.
- PETER, M., EDWARDS, P-J., JEANNERET, P., KAMPMANN, D. et LUSCHER A. (2008). Changes over three decades in the floristic composition of fertile permanent grasslands in the Swiss Alps. *Agriculture Ecosystems & Environment* **125** (1-4), 204-212.
- PETER-SCHMID, M.K.I., KOLLIKER, R. et BOLLER, B. (2008). Value of permanent grassland habitats as reservoirs of *Festuca pratensis* Huds. and *Lolium multiflorum* Lam. populations for breeding and conservation. *Euphytica* **164**, 239-253.
- PETIT, S., VANSTEELANT, J-Y., PLAIGE, V. et FLEURY, Ph (2004). Les typologies de prairies : d'un outil agronomique à un objet de médiation entre agriculture et environnement. *Fourrages* **179**, 369-382.
- PISSOT, M. (2009). Relations entre les fonctions alimentaires, les conditions de milieu et les modes de conduite des prairies permanentes. Mémoire, ENITA Clermont-Ferrand, Clermont-Ferrand, France.
- PLANTUREUX, S., BONISCHOT, R. et GUCKERT, A. (1993). Classification, vegetation dynamics and forage production of permanent pastures in Lorraine. *European Journal of Agronomy* **2** (1), 11-17.
- PLANTUREUX, S. et THORION, G. (2005). Combined prediction of forage production and biodiversity of permanent pastures in Vosges Mountains (France). In: Conference of the

- FAO-CIHEAM Sub-Network of Mountain pasture "quality production and quality of the environment in the mountain pastures of an enlarged Europe, pp221-229. Udine, Italie.
- PLANTUREUX, S. et AMIAUD, B., (2010). e-FLORA-sys, a website tool to evaluate the agronomical and environmental value of grasslands. In: *Proceedings of the 23<sup>th</sup> General Meeting of the European Grassland Federation*, pp. 732-734. Kiel, Allemagne.
- PONTES, L. (2006) *Diversité fonctionnelle des graminées prairiales: conséquences pour la productivité et pour la valeur nutritive*. PhD thesis, Université Balise Pascal-Clermont II, Clermont-Ferrand, France.
- PONTES, L., SOUSSANA, J-F., LOUAULT, F., ANDUEZA, D. et CARRERE, P. (2007). Leaf traits affect the above-ground productivity and quality of pasture grasses. *Functional Ecology* **21** (5), 844-853.
- POTTS, S., WOODCOCK, B., ROBERTS, S., TSCHEULIN, T., PILGRIM, E., BROWN, V. et TALLOWIN, J. (2009). Enhancing pollinator biodiversity in intensive grasslands. *Journal of Applied Ecology*, **46** (2), 369-379.
- PYKALA, J. (2004) Cattle grazing increases plant species richness of most species trait groups in mesic semi-natural grasslands. *Plant Ecology* **175**, 217-226.
- ROCHE, P., AZ-BURLINSON, N. et GACHET, S. (2004). Congruency analysis of species ranking based on leaf traits: which traits are the more reliable? *Plant Ecology* **174**, 37-48.
- RODRIGUES, A., ANDUEZA, D., PICARD, F., CECATO, U., FARRUGGIA, A. et BAUMONT, R. (2007). Nutritive value and floristic composition of permanent meadows: first results of a study conducted in the Massif Central. In: 14 ° *Rencontres Recherches Ruminants*, pp. 241-244. Paris, France.
- ROOK, A.J. et TALLOWIN, J.R.B. (2003). Grazing and pasture management for biodiversity benefit. *Animal Research* **52**, 181-189.
- ROZIER, A. (1809). *Cours complets d'agriculture pratiques, d'économie rurale et domestique, et de médecine vétérinaire*. Tome premier. Paris, France : BUISSON, COLLIN et COLAS.
- SADOK, W., ANGEVIN, F., BERGEZ, J.E., BOCKSTALLER, C., COLOMB, B., GUICHARD, L., REAU, R., MESSEAN, A. et DORE T. (2009) MASC, a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development* **29**, 447-461.

- SCHAFFERS, A-P. et SYKORA, K-V. (2000). Reliability of Ellenberg indicator values for moisture, nitrogen and soil reaction: a comparison with field measurements. *Journal of Vegetation Science* **11**, 225-244.
- SCHTICKZELLE, N., TURLURE, C. et BAGUETTE, M. (2007). Grazing management impacts on the viability of the threatened bog fritillary butterfly *Proclossiana eunomia*. *Biological Conservation* **136**, 651-660.
- SCHUBIGER, F-X., LEHMANN, J., DACCORD, R. ARRIGO, Y., JEANGROS, B. et SCEHOVIC, J. (2001). Nutritive value of grassland plants: digestibility. *Agrarforschung* **8** (9), 354-359.
- SEGHERI, J., VESCOVO, A., PADEL, K., SOUBIE, R., ARJOUNIN, M., BOULAIN, N., DE ROSNAY, P., GALLE, S., GOSSET, M., MOUCTAR, A.H., PEUGEOT, C. et TIMOUK, F. (2009). Relationships between climate, soil moisture and phenology of the woody cover in two sites located along the West African latitudinal gradient. *Journal of Hydrology* **375**, 78-89.
- SHENK, J.S. et WESTERHAUS, M.O. (1991). New Standardization and Calibration Procedures for Nirs Analytical Systems. *Crop Science* **31**, 1694-1696.
- SJODIN, N.E., BENGTSSON, J. et EKBOM, B. (2008). The influence of grazing intensity and landscape composition on the diversity and abundance of flower-visiting insects. *Journal of Applied Ecology* **45**, 763-772.
- SMIT, H.J., METZGER, M.J. et EWERT, F. (2008). Spatial distribution of grassland productivity and land use in Europe. *Agricultural systems* **98**, 208-219.
- SOUSSANA, J-F. et LÜSCHER, A. (2007). Temperate grassland and global atmospheric change: a review. *Grass and Forage Science* **62**, 127-134.
- SPEHN, E.M., HECTOR, A., JOSHI, J., SCHERER-LORENZEN, M., SCHMID, B., BAZELEY-WHITE, E., BEIERKUHNLIN, C., CALDEIRA, M.C., DIEMER, M., DIMITRAKOPOULOS, P.G., FINN, J.A., FREITAS, H., GILLER, P.S., GOOD, J., HARRIS, R., HÖGBERG, P., HUSS-DANEL, K., JUMPPONEN, A., KORICHEVA, J., LEADLEY, P.W., LOREAU, M., MINNS, A., MULDER, C.P.H., O'DONOVAN, G., OTWAY, S.J., PALMBORG, C., PEREIRA, J.S., PFISTERER, A.B., PRINZ, A., READ, D.J., SCHULZE, E.-D., SIAMANTZIOURAS, A.-S.D., TERRY, A.C., TROUMBIS, A.Y.,

- WOODWARD, F.I., YACHI, S. et LAWTON, J.H. (2005). Ecosystem effect of biodiversity manipulations in European grasslands. *Ecological Monographs* **75** (1), 37-63.
- STILMANT, D., DECRUYENAERE, V., HERMAN, J. et GROGNA, N. (2004). Hay and silage making losses in legume-rich swards in relation to conditioning. In: Proceeding of the 20th General Meeting of the European Grassland Federation, pp. 939-941. Luzern, Switzerland: Land use systems in grassland dominated regions.
- STYBNAROVA, M., SVOZILOVA, M., HAKL, J., KARABCOVA, H., POZDISEK, J. et OTRHALKOVA, P. (2010). Effect of different management on the yields, forage quality and botanical composition of permanent grassland. In: *Proceedings of the 23rd General Meeting of the European Grassland Federation*, pp. 741-743. Kiel, Germany: Grassland in a changing world.
- SZEMAN, L. (2009). Stress effect of fertilization and precipitation on the biodiversity on the rangeland. *Cereal Research Communications* **37**, 357-360.
- TALLOWIN, J.R.B. et JEFFERSON, R.G. (1999). Hay production from lowland semi-natural grasslands: a review of implications for ruminants livestock systems. *Grass and Forage Science* **54**, 99-115.
- THEAU, J-P. et ZEROUROU, A. (2008). Herb'âge, une méthode de calcul des sommes de température pour la gestion des prairies. In : *Les cahiers d'Orphée. Outils pour la gestion des prairies permanentes Volume 1*, pp.91-102. France : INRA.
- THEAU, J-P., CRUZ, P., FALLOUR, D., JOUANY, C., LECLoux, E. et DURU, M. (2010). Une méthode simplifiée de relevé botanique pour une caractérisation agronomique des prairies permanentes. *Fourrages* **201**, 19-25.
- TORNAMBE, G., FERLAY, A., FARRUGGIA, A., CHILLIARD, Y., LOISEAU, P., PRADEL, P., GRAULET, B., CHAUVEAU-DURIOT, B. et MARTIN, B. (2010). Influence of the botanical diversity and development stage of mountain pastures on milk fatty acid composition, carotenoids, fat-soluble vitamins and sensory properties. In: *Proceedings of the 23rd General Meeting of the European Grassland Federation*, pp. 589-591. Kiel, Germany: Grassland in a changing world.
- VIOLLE, C., NAVAS, M.L., VILE, D., KAZAKOU, E., FORTUNEL, C., HUMMEL, I. et GARNIER, E. (2007). Let the concept be functional! *OIKOS* **116**, 882-892.



- VAN SOEST, P.J., ROBERTSON, J.B. et LEWIS, B.A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and non starch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science* **74**, 3583-3597.
- VUATTOUX, J. (2009). *Place des prairies permanentes dans la stratégie fourragère des éleveurs: comment la prévoir à partir des caractéristiques de la parcelle?* Mémoire, ENSAIA Nancy, Nancy, France.
- WALLACE, K.J. (2007). Classification of ecosystem services: Problems and solutions. *Biological Conservation*, **139**, 235-246.
- WAN, L., ZHANG, B., KEMP, P. et LI, X. (2009). Modelling the abundance of three key plant species in New Zealand hill-pasture using a decision tree approach. *Ecological Modelling* **220** (15), 1819-1825.
- YOSHIHARA, Y., CHIMEDDORJ, B., BUUEIBAATAR, B., LHAQUASUREN, B. et TAKATSUKI, S. (2008). Effects of livestock grazing on pollination on a steppe in eastern Mongolia. *Biological Conservation* **141**, 2376-2386.
- ZHANG, J.T. et DONG, Y.R. (2009). Effects of grazing intensity, soil variables, and topography on vegetation diversity in the subalpine meadows of the Zhongtiao Mountains, China. *Rangeland Journal* **31**, 353-360.
- ZHONG, Y-K., BAO, QH. et SUN, W. (1997). Study on hay making and improving its utilization. *Grassland of China* **3**, 49-54.



# **Liste des publications**



**Articles scientifiques :**

MICHAUD, A., PLANTUREUX, S., AMIAUD, B., CARRERE, P., CRUZ, P., DURU, M., DURY, B., FARRUGGIA, A., FIORELLI, J-L., KERNEIS, E. et BAUMONT, R. Environmental factors influencing the botanical and functional composition of permanent grasslands. *Journal of Agricultural Sciences*, accepté mi mars 2011, en presse.

MICHAUD, A., ANDUEZA, D., PICARD, F., PLANTUREUX, S. et BAUMONT, R. The seasonal dynamics of biomass production and herbage quality of three grasslands with contrasting functional compositions. *Grass and Forage Science*, 2011, en presse.

**Communications orales:**

MICHAUD, A., BAUMONT, R. et PLANTUREUX, S. (2009). Prévoir les aptitudes des prairies permanentes à remplir des services fourragers et environnementaux. In : *Conseil Scientifique de l'Unité de Recherches sur les Herbivores*. Clermont-Ferrand, France.

MICHAUD, A., BAUMONT, R. et PLANTUREUX, S. (2010). Evaluation des services fourragers et environnementaux des prairies permanentes à partir d'un réseau national de parcelles. In : *Conseil Scientifique de l'Unité de Recherches sur les Herbivores*. Clermont-Ferrand, France.

MICHAUD, A., BAUMONT, R. et PLANTUREUX, S. (2010). Evaluation des services fourragers et environnementaux des prairies permanentes. In : *Séminaire de l'Ecole doctorale RP2E*. Nancy, France.

BAUMONT, R., ANDUEZA, D., VUATTOUX, J., PICARD, F. et MICHAUD, A. (2010). Modeling the dynamic of biomass production and of herbage quality for grassland differing in their functional types. In: *Proceeding of the 23<sup>rd</sup> General Meeting of the European Grassland Federation*, pp. 913-915. Kiel, Germany: Grassland in a changing world.

MICHAUD, A., PLANTUREUX, S. et BAUMONT, R. (2011). How to classify permanent grasslands? Conclusions from a French national network. In: *Proceeding of the 24<sup>th</sup> General Meeting of the European Grassland Federation*, en cours.

MCHAUD, A., PLANTUREUX, S., POTTIER, E., FARRIE, J-P, LAUNAY, F. et BAUMONT, R. (2011). Une typologie nationale des prairies permanentes : un outil pour caractériser leur potentiel fourrager et leur intérêt environnemental. In: *Proceeding of the 18<sup>th</sup> General Meeting of the Rencontres, Recherches Ruminants*, communication orale courte acceptée.

### **Encadrement de stagiaires**

VUATTOUX, J. (2009) (Encadrement : S. Plantureux, A. Michaud, R. Baumont). Place des prairies permanentes dans la stratégie fourragère des éleveurs : comment la prévoir à partir des caractéristiques de la parcelle ? Mémoire de fin d'études, INPL ENSAIA, Nancy, France.

# **Annexes**





## Annexe 1

### Enquêtes effectuées en exploitations agricoles dans le cadre de l'action 1 du programme CASDAR « Caractérisation des Prairies Permanentes »

#### 1. Contexte d'exploitation des prairies

Nom de l'exploitation : .....

Date de l'enquête (1<sup>ère</sup> visite)

..... / ..... / .....

Dates des visites suivantes

..... / ..... / .....

..... / ..... / .....

*(Introduction à l'entretien)*

Avant de rentrer dans le détail de l'enquête, est-ce que vous pouvez dire en quelques mots, et en résumé, ce que représentent pour vous les prairies permanentes sur votre exploitation ?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

**Coordonnées de l'exploitation**

Statut juridique :  Individuel ou EARL entre époux  Collectif (GAEC, SCEA, ...)  
 « familial »  Collectif « non familial »  Autre

N° de cheptel : .....

Petite région agricole :

.....

Altitude du siège d'exploitation : ..... m

Adresse :

.....

Commune : .....

Code postal : .....

N° de téléphone : .....

<b>Main d'œuvre – Systèmes d'élevage</b>
--

Nombre total d'UMO : .....

Contrainte de main d'œuvre ou caractéristique particulière pouvant impacter l'utilisation des prairies :

.....

Libellé du système :

Autre production ou activité connexe pouvant impacter l'utilisation des prairies :

.....

**Surfaces et ressources fourragères**

SAU : ..... ha

**Surface fourragère principale**

Prairies temporaires < 5 ans :	..... ha
Prairies temporaires > 5 ans ET < 10 ans :	..... ha
<b>Prairies temporaires &gt; 10 ans :</b>	<b>..... ha</b>
<b>Prairies Permanentes :</b>	<b>..... ha</b>
Landes et parcours :	..... ha
Ensilage de maïs :	..... ha
Autres fourrages annuels :	..... ha

**Utilisation de surfaces extérieures à la SFP :**

Estives/Alpages  Autres (préciser) :

.....

Durée : .....jours Nb moyen d'UGB : .....

**Achats / Ventes de fourrages**

	Tonnages annuels indicatifs hors année exceptionnelle	
	Bas	Haut
Achats de fourrages extérieurs (incluant paille alimentaire, déshydratés [luzerne, pulpes], co-produits, etc ...)	..... T. MS	..... T. MS
Ventes de fourrages	..... T. MS	..... T. MS

**Atelier Bovin Lait (+ bœufs le cas échéant)****Type génétique dominant :**

- Prim'Holstein       Mixte (No, Montbéliarde, Salers)  
 Autre (préciser) : .....

**Orientation de la production**

Destination du lait :

- Laiterie       Transformation à la ferme       Les deux  
 Filière AOC  
 Filière Bio

Conséquence éventuelle de la destination sur l'exploitation des prairies :

Production de viande :

- Présence de bœufs à l'herbe       Présence de femelles engraisées à l'herbe  
 Présence de bœufs finis à l'herbe       Présence d'une filière lait AOC

**Dimension :**

Nombre de vaches laitières : ..... VL

Nombre total d'UGB (bœufs compris le cas échéant) : ..... UGB

**Conduite du troupeau et de l'alimentation :**

Niveau de production (Lait produit/vache/an) : ..... L/V

- Périodes de vêlage :  1 saison printemps     1 saison automne     1 saison hiver  
 2 saisons       pas de saison marquée

% de la surface en prairies permanentes accessibles au pâturage des vaches laitières : ..... %

Apport de fourrages aux vaches laitières en période de pâturage

- Au printemps (en % de la ration) :  < 1/3       entre 1/3 et 2/3       > 2/3  
 En été-automne (en % de la ration) :  < 1/3       entre 1/3 et 2/3       > 2/3

**Niveau d'apport de concentrés : ..... kg/VL**Y a-t-il apport de concentré de production pour les VL à l'herbe au printemps ?

<b>Atelier Bovin Viande</b>
-----------------------------

**Type génétique :**  Charolaise  Limousine  Blonde  Race mixte  Rustique  Autre

Nombre de vêlages : ..... Nombre total d'UGB : .....

Destination des produits

- Filière Bio  
 Filière AOC  
 Filière Label Rouge  
 Autres filières qualité Préciser :

**Profil des ventes ; destination des produits par catégorie :**

	Nb de mâles	Nb de femelles
Veaux ss la mère		
Veaux lourds		
Broutards (sevrés, alourdis, repoussés)		
Maigre « âgé » (repassés à l'herbe)		
Jeunes Bovins		
Bœufs		
Reproducteurs		

Destination dominante des vaches de réforme :

- Maigres  Finies

**Périodes de vêlage :**

- 1 saison printemps  1 saison automne  1 saison hiver  
 2 saisons  pas de saison marquée

**Complémentation des veaux avant sevrage**

- Mâles  rien  rationné  à volonté  
Femelles  rien  rationné  à volonté

<b>Atelier Ovin Viande</b>
----------------------------

**Type génétique dominant**

- race bouchère de bergerie  race bouchère d'herbe  
 race rustique  race prolifique

Préciser la race ou le type de croisement :

Effectif moyen de brebis : .....

Nombre total d'UGB : .....

**Profil des ventes ; destination des produits**

	Nb moyen / an
Agneaux lourds bergerie	
Agneaux lourds d'herbe	
Agneaux légers	

Destination des produits

- Filière Bio  
 Filière AOC  
 Filière Label Rouge  
 Autres filières qualité Préciser :

**Conduite du troupeau et de l'alimentation :**

Périodes d'agnelage :

- 1 saison automne       1 saison hiver       1 saison printemps  
 2 saisons       système accéléré       pas de saison marquée

Niveau de prolificité : ..... agneau / brebis / an

Importance de l'alimentation « non pâturée », rapportée à la brebis (niveau indicatif) :

Quantité annuelle de fourrages distribués : ..... kg MS / Brebis

Quantité annuelle de concentrés distribués : ..... kg / Brebis

**Atelier Ovin Lait****Type génétique dominant :**

- Manech TR       Manech TN       Basco-béarnaise

Effectif moyen de brebis : ..... Nombre total d'UGB : .....

Destination du lait :

- Laiterie       Transformation à la ferme       Les deux  
 Filière AOC       Filière Label Rouge  
 Filière Bio

Conséquence éventuelle de la destination sur l'exploitation des prairies :

**Conduite du troupeau et de l'alimentation :**

Niveau de production (Lait produit/brebis/an) : .....

% de la surface en prairies permanentes accessibles au pâturage des brebis laitières : .....

Part de la ration fourrages+concentré apportée aux brebis laitières :

- En hiver :       < 1/3       entre 1/3 et 2/3       > 2/3       100 % (en bergerie)  
 En printemps-été :  < 1/3       entre 1/3 et 2/3       > 2/3  
 En automne :       < 1/3       entre 1/3 et 2/3       > 2/3       100 % (en bergerie)

Niveau d'apport de concentrés : ..... kg / Brebis

<b>Système fourrager ; système d'alimentation</b>
---

**Chargement**

Apparent : ..... UGB/ha SFP

Chargement corrigé : ..... (donnée calculée après prise en compte des achats/ventes)

Chargement "herbe" : ..... (donnée calculée après prise en compte des stocks autres que herbe)

**Composition des stocks de fourrages, en tonnes de MS :**

	Herbe, selon origine		Ensil. Maïs	Autres fourrages, co-produits, ...
	P.T.	P.P.		
Fauche précoce (Ens.Herbe ou Enrubann.)	.....T. MS	.....T. MS		
Foin 1 <sup>ère</sup> Coupe	.....T. MS	.....T. MS		
Regains autres coupes	.....T. MS	.....T. MS		

<b>Total, en tonne MS</b>	.....T. MS	.....T. MS	.....T. MS	.....T. MS
---------------------------	---------------	---------------	---------------	------------

Dans le cas des systèmes mixtes uniquement, répartition approximative des stocks par atelier

<b>BL</b>	.....T. MS	.....T. MS	.....T. MS	.....T. MS
<b>BV</b>	.....T. MS	.....T. MS	.....T. MS	.....T. MS
<b>OL</b>	.....T. MS	.....T. MS	.....T. MS	.....T. MS
<b>OV</b>	.....T. MS	.....T. MS	.....T. MS	.....T. MS

## 2. Calendrier d'alimentation annuel

Catégories d'animaux		Calendrier simplifié d'alimentation par catégories d'animaux													Observations Objectifs de la complémentation, variantes interannuelles, causes, ...			
		Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars				
	Fourrages																	
	Concentrés																	
	Fourrages																	
	Concentrés																	
	Fourrages																	
	Concentrés																	
	Fourrages																	
	Concentrés																	
	Fourrages																	
	Concentrés																	
	Fourrages																	
	Concentrés																	
	Fourrages																	
	Concentrés																	
	Fourrages																	
	Concentrés																	
	Fourrages																	
	Concentrés																	

### 3. Calendrier des pratiques

Exploitation :

Page

Parcelles N° No m		Planning simplifié des opérations												Observations Particularités de conduite, variantes interanuelles, ...	Fonction						
		Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc		Janv	Group e	Désignation				
	Mode exploitation																				
	Pâturage	Catég animx																			
		Organisat°																			
		Niveau prélèvt																			
Fertilisat° , entretien	Nature																				
	Fréquence																				
	Mode exploitation																				
	Pâturage	Catég animx																			
		Organisat°																			
		Niveau prélèvt																			
Fertilisat° , entretien	Nature																				
	Fréquence																				

Mode exploitation

**E** : ensilage**Eb** :  
enrubannage**F** : Foin

Catégories de bovins

**VL** : V.lait. en prod°**VT** : V.lait taries**VA** : V.allait**Ff** : femelles en finition**Codifications**

liste non exhaustive à compléter si besoin

Catégories d'ovins

**Blac** : brebis en lactation**Blu** : brebis en lutte**Bg** : brebis gestantes

Fertilisat°, entretien

Nature

**Fu** : fumier**Co** : compost**Li** : lisier**N** : fertilis°  
azotée**P ; K ; PK** : fertilisat° de fondFréquence **(O)** : opération occasionnelle



## 4. Caractéristiques des parcelles

Numéro d'identification de la PP sur le plan (+ nom le cas échéant)	SAU ( 0,0 ha)	PP qui a été assolée "dans le temps"	Localisation				Caractéristiques physiques										Contraintes de mécanisation		Contraintes de pâturage																		
			Coordonnées Lambert	Altitude (00 m)	Topographie	Situation relative à l'exploitation	Profondeur	Régime hydrique	Exposition	Nature du sol dominante	Texture	pH	Contraintes de mécanisation	Accessibilité	Portance	Abreuvement																					
			Latitude	Longitude	zone de plateau / haut de pente	zone de pente ou coteau	zone de vallée ou bas-fond	Distance au siège d'exploitation ( 0,0km)	Attenante au siège d'exploitation	Non attenante, mais non isolée	Isolée	Profondeur < 20 cm ou affleurements rocheux	humide hiver / frais été	humide hiver / sec été	sain hiver / sec été	sain hiver / frais été	Pas d'exposition marquée	NO à NE (moins d'ensoleillement)	SE à SO (plus d'ensoleillement)	Pas de contrainte perçue	Sols légers (siliceux, graveleux, ...)	Sols lourds	Pas de contrainte perçue	Excessivement acide	Excessivement alcalin	Non labourable	Non fauchable	Entretien mécanique non envisageable	pas de contrainte	inaccessible à certaines catégories	non accessibles au pâturage	Le cas échéant : catégories ne pouvant pas pâturer	contrainte peu importante	contrainte occasionnelle	contrainte forte	Pas de point d'eau accessible	

## 5. Analyse des fonctions par groupes de prairies

Nom de l'exploitation : .....

Groupe n°      Libellé de la fonction : -----      Numéros des parcelles : -----

Fonction principale

Pâture

Stock

Mixte Pât-Stock

Ajustement

Autre

(stable d'1 année sur l'autre)

(utilisat° variable selon les années)

Dates de début des périodes	Hiver ... / ...	Début printemps ... / ...	Fin printemps ... / ...	Été ... / ...	Automne ... / ...	Observations complémentaires ...
Fonction la + importante à la période considérée (0 ; Pât ; Stock)						... sur la hiérarchie des attentes par période (réponse libre)
Le cas échéant, alternative possible (0 ; Pât ; Stock) ... ... qu'est-ce qui détermine le choix ? (réponse libre)						... sur la variabilité interannuelle des utilisations possibles, et le rôle « tampon » (réponse libre)
La production de la période est-elle destinée à une catégorie particulière d'animaux ? Si oui, laquelle (*) ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	... sur les attentes concernant la contribution à l'alimentation (réponse libre)
Contribution quantitative (**) à la ration des animaux auxquels elle est destinée (+ ; ++ ; +++)						
Commentaire sur la destination de la production (réponse libre)						
Le cas échéant, attente particulière exprimée par l'éleveur, concernant la contribution à la qualité de l'alimentation fournie (réponse libre)						
Le cas échéant, indicateurs utilisés par l'éleveur pour évaluer cette qualité (réponse libre)						
Autres remarques concernant le rôle de ces prairies dans le système d'alimentation (réponse libre)						

(\*) 1-Femelles en lact° ; 2-Adultes entretien/gestat° ; 3-Bovins<15mois ou agnelles ; 4-Bovins>15mois ; 5-Engrais/fini° ; 6-Veaux/agneaux non sevrés

(\*\*) Contribution en % de la MS apportée :    + : faible < 15 %            ++ : moyenne 15 – 50 %            +++ : forte > 50 %

## Annexe 2

# Article proposé aux 3R sur les fonctions fourragères des prairies permanentes

### L'utilisation des prairies permanentes au travers d'une enquête nationale sur leur place dans les systèmes d'alimentation

FARRIE J.P. (1), LAUNAY F. (2), POTTIER E. (3), MICHAUD A. (4), BAUMONT R. (5), PLANTUREUX S. (6)

(1) Institut de l'Élevage, 9 allée P. de Fermat, 63170 Aubière

(2) Institut de l'Élevage, 2 place Pierre Viala, 34060 Montpellier

(3) CIRPO, 87800 Saint Priest Ligoure

(4) Institut de l'Élevage, 149 rue de Bercy, 75012 Paris

(5) INRA, UR 1213 Herbivores, 63122 Saint Genès Champanelle

(6) Nancy Université-INRA, UMR Agronomie et Environnement, 2 avenue de Forêt de Haye, 54500 Vandoeuvre les Nancy

#### RESUME

Les prairies permanentes sont porteuses de nombreux enjeux agricoles (production et économie des systèmes d'élevage) et environnementaux (qualité de l'eau, biodiversité, paysages, ...). Dans le but d'améliorer les connaissances sur leurs potentialités au regard des différents enjeux, un programme de production de références visant à fournir aux techniciens des repères pour le diagnostic et la conduite de ce type de prairies a été conduit de 2008 à 2011. Le premier volet avait pour but d'identifier les fonctions des prairies permanentes dans les systèmes d'alimentation et d'en étudier les liens avec les conditions de milieu et les pratiques agricoles. Une enquête réalisée auprès de 78 exploitations représentant différents systèmes d'élevage dans les principales zones herbagères de plaine et de moyenne montagne a permis de caractériser 1500 parcelles de prairies permanentes. Leurs fonctions fourragères sont décrites par un profil des rôles alimentaires saisonniers décrit en 5 périodes. L'analyse de leurs points communs et de leurs différences a permis de définir 24 « fonctions-type ». Les fonctions des prairies permanentes, les conditions de milieu et les pratiques ne sont pas indépendantes. Mais une même fonction peut être remplie par des prairies situées dans des conditions différentes. Et une même prairie peut remplir des fonctions différentes.

Pour différents types de prairies permanentes identifiés dans un autre volet du programme de travail, une panoplie des fonctions fourragères qui paraissent les mieux adaptées à chaque situation a été proposée.

### Uses of permanent grasslands through a national survey to characterize forage services

FARRIE J.P., LAUNAY F., POTTIER E., MICHAUD A., BAUMONT R., PLANTUREUX S.

(1) Institut de l'Élevage, 9 allée P. de Fermat, 63170 Aubière

#### SUMMARY

Permanent grasslands support many agricultural (production and economy of breeding systems) and environmental (water quality, biodiversity, landscape ...) issues. In order to improve the knowledge on their potentialities towards the various stakes, a program to supply the technicians with references for the diagnosis of this type of meadows was led from 2008 to 2011. First part of the program aimed at identifying the functions of the permanent meadows in feeding systems, and studying the links with the natural conditions and agricultural practices. A survey of 78 farms representing various systems of breeding in the main grassland zones in plain and mid-mountain allowed to characterize 1500 meadows.

Their fodder functions are described by a profile of the seasonal feeding roles described in 5 periods. The analysis of their common points and their differences allowed to define 24 "standard functions". Functions of permanent meadows, conditions of environment and practices are not independent. But the same function can be performed by meadows situated in different conditions. And the same meadow may perform different functions.

For every type of permanent meadow identified in another part of the working program, an outfit of the fodder functions which seem best adapted to each situation was proposed.

#### INTRODUCTION

Les prairies permanentes ou de longue durée occupent une part très importante du territoire national qui justifie que l'on cherche à optimiser leur utilisation. L'importance de leurs différentes fonctions agricoles (production fourragère, économie des systèmes d'élevage) et environnementales (préservation de l'environnement naturel et culturel) est largement reconnue (Huyghe 2008). Cependant l'approche des prairies permanentes reste difficile quand il s'agit d'optimiser l'ensemble de ces fonctions et de proposer des modes de conduite appropriés.

Leur rôle dans les systèmes d'alimentation est souvent mal identifié, voire sous-estimé ou dévalorisé au regard d'autres ressources fourragères. Cette perception négative est associée à des caractéristiques de production fluctuantes et jugées contraignantes (Loysel et al., 1994). Un système fourrager, défini comme une combinaison programmée de

fonctions alimentaires se succédant dans le temps (Duru et al., 1988) est jugé plus difficile à gérer quand il comporte beaucoup de prairies de longue durée (Vivier, 1990).

Dans ce contexte un programme visant à mieux connaître les prairies permanentes et leurs aptitudes à rendre conjointement différents services fourragers et environnementaux a été conduit entre 2008 et 2011. Structuré en trois étapes il a consisté à :

- 1) réaliser une enquête en fermes visant à mieux comprendre la diversité des utilisations des prairies permanentes,
- 2) suivre un large échantillon de prairies selon un protocole permettant de mesurer leur production quantitative et qualitative et d'évaluer leur diversité floristique,
- et 3) élaborer un outil permettant de situer les aptitudes des prairies permanentes à rendre des services fourragers et environnementaux en fonction des conditions de production.

Le présent article restitue les résultats de la 1<sup>ère</sup> étape. Les objectifs principaux étaient :

- de réaliser un état des lieux des rôles spécifiques des prairies permanentes dans les systèmes fourragers, rôles désignés par le terme de fonctions dans la suite de cet article ;
- d'étudier les liens qui peuvent exister entre ces fonctions et les conditions de production déterminées par le milieu et les pratiques d'exploitation.

Ce travail repose sur trois hypothèses principales :

- une fonction n'est pas spécifique d'un système : on peut trouver un même type de fonction fourragère dans des systèmes de production différents ;
- une même fonction fourragère peut être remplie par des prairies placées dans des conditions de milieu différentes et soumises à des pratiques d'exploitation différentes ;
- des prairies permanentes placées dans les mêmes conditions peuvent remplir des fonctions différentes.

Sous ces hypothèses, on admet qu'une meilleure compréhension de la diversité d'utilisation des prairies permanentes, au travers de la connaissance des principales combinaisons fonction / conditions de milieu / pratiques d'exploitation constituera une aide pour porter un diagnostic sur leur conduite et leur utilisation.

## 1. MATERIEL ET METHODES

### 1.1. PRECISIONS SUR LA NOTION DE FONCTION FOURRAGERE

Le concept de fonction défini par Jeannin et al. (1991) pour caractériser les prairies de fauche des Alpes du Nord est repris ici. Mais il est étendu pour caractériser les différentes contributions au système d'alimentation que l'éleveur attend d'une (ou plusieurs) prairie(s), au fil des saisons.

Adaptées des « saisons pratiques » définies par Bellon et al. (1999), 5 périodes différant par les stades de développement de l'herbe, la régularité et la vitesse de pousse ont été distinguées : début printemps, fin printemps, été, automne, hiver. A chaque période un objectif d'utilisation peut être assigné à une prairie et caractérisé par :

- la nature de l'alimentation fournie (*Stock* ou *Pâture*),
- un indicateur de qualité attendue, avec des modalités spécifiques pour les stocks (*fourrage fibreux* ou à *forte valeur alimentaire* ou bien *intermédiaire*) et pour la pâture (5 classes définies par la *catégorie* et le *stade de production* des animaux destinataires),
- le niveau estimé de contribution à la quantité de Matière Sèche Ingérée (MSI) : *fort* (+ de 50 % de la MSI), *faible* (- de 15 % de la MSI) ou *intermédiaire*.

La fonction de la prairie est ainsi définie par un profil d'attentes saisonnières au regard de l'alimentation du troupeau.

### 1.2. ENQUETES EN FERMES

Un échantillon initial de 78 exploitations réparties dans les principales régions herbagères métropolitaines de plaine et de moyenne montagne (jusqu'à 1200 mètres d'altitude) a été constitué. La prairie permanente devait représenter au moins 40 % de la surface fourragère principale de l'exploitation. Une diversité de systèmes d'élevage a été volontairement prise en compte : bovins lait (5 000 à 10 000 litres par vache et par an), bovins viande (naisseur herbager ou avec cultures, avec ou sans finition de gros bovins à l'herbe et/ou à l'auge), ovins viande (spécialisé ou associé aux bovins viande), ovins lait associé aux bovins viande (spécifique du piémont pyrénéen). Un même système était représenté par 2 ou 3 exploitations situées dans la même zone fourragère, selon la définition des systèmes et des zonages établie par l'Institut de l'Élevage (2002).

Sur chaque exploitation les prairies permanentes ont été identifiées ; une prairie permanente étant définie comme une parcelle en herbe correspondant à une unité d'utilisation, et

qui n'a pas été ressemée depuis au moins 10 ans. Les conditions de situation (localisation, exposition, dimension) et de sol (régime hydrique, fertilité, acidité) de chacune d'entre elles ont été caractérisées à dire d'expert (enquêteur + éleveur), ainsi que les pratiques d'exploitation (modes d'utilisation et périodes, fertilisation, entretien). Le cas échéant, les variations interannuelles de ces dernières étaient recueillies.

Un regroupement des prairies jouant le même rôle aux dires de l'éleveur a ensuite été effectué. La fonction fourragère de chaque groupe a alors été caractérisée par le profil des attentes saisonnières défini précédemment (voir 1.1.), et par des commentaires ayant pour but de compléter la description des attentes et de hiérarchiser leur importance relative.

Les données exploitables portent sur 89 exploitations, 1360 parcelles et 448 fonctions élémentaires décrites par les enquêteurs.

### 1.3. RELATIONS ENTRE FONCTION DES PRAIRIES, CONDITIONS DE MILIEU ET PRATIQUES

Une première partie de l'analyse a consisté à décrire la diversité des fonctions, et à les classer en vue de constituer des groupes de prairies qui ont des profils d'attentes saisonnières similaires. Une analyse factorielle des correspondances multiples (AFCM) a été réalisée, suivie par une classification ascendante hiérarchique (CAH). Puis un « feed-back » aux enquêteurs a été organisé pour réaliser une typologie finale par un travail collectif à dire d'experts.

Dans une deuxième partie, nous avons caractérisé chaque prairie par ses « conditions de production », définies comme une combinaison singulière entre caractéristiques de milieu naturel et pratiques d'exploitation.

Enfin nous avons croisé les deux types d'informations (fonctions affectées aux prairies et conditions de production), et dénombré les parcelles dans chacune des combinaisons possibles. Ceci nous a permis d'identifier les combinaisons les plus fréquentes et de caractériser les liens entre fonctions et conditions de production.

## 2. RESULTATS

### 2.1. VARIETE DES FONCTIONS « INTRA-SYSTEME »

Au sein d'une même exploitation, le nombre de fonctions fourragères élémentaires des prairies permanentes est en moyenne de 6,3. Il varie de 2 à 12, les deux tiers des exploitations en comptant entre 5 et 8 (tableau 1).

Un petit nombre de fonctions identifiées par exploitation est généralement associé à une forte présence d'autres ressources fourragères (prairies temporaires et maïs) dans le système. Il peut s'agir aussi d'exploitations avec un système fourrager essentiellement basé sur les prairies permanentes, mais très simple : du foin réalisé sur des prairies pâturées en fin de saison, et des pâtures ayant toutes un rôle similaire.

A l'opposé les exploitations qui en comptent beaucoup (9 à 12 fonctions identifiées) sont toutes des exploitations très herbagères : soit des exploitations laitières engagées dans des filières qualité en zone de moyenne montagne, soit des exploitations d'élevage allaitant (bovin ou ovin) avec une hétérogénéité du parcellaire qui conduit à différencier l'utilisation des parcelles.

**Tableau 1.** Distribution du nombre d'exploitations selon le nombre de fonctions attribuées aux prairies permanentes.

Nb de fonctions	2 à 4	5 à 6	7 à 8	9 à 12
Nb d'exploitations	12	24	21	12

### 2.2. DIVERSITE DES FONCTIONS DES PRAIRIES PERMANENTES

Un premier type de fonction qui rassemble des parcelles servant de parcage ou de zones de passage a été identifié (39 parcelles, soit 3 % de l'effectif). Leur fonction alimentaire est négligeable.

Pour les fonctions fourragères à proprement parler, les 6 premiers axes de l'AFCM n'expliquent que 50 % de la variance totale, ce qui traduit une très grande diversité des profils d'attentes saisonnières. Ceci nous a amenés à distinguer 25 classes de fonctions dans un premier temps.

La classification permet de distinguer trois grandes familles :

1) les prairies destinées prioritairement à fournir des stocks (N= 508 ; 37 % de l'effectif) ; des distinctions peuvent être faites au sein de ce groupe, portant sur la qualité attendue du fourrage récolté et sur l'importance ou non du pâturage en 2<sup>ème</sup> partie de saison ;

2) les prairies dédiées au pâturage (N= 749 ; 55 %), avec dans ce cas de nombreuses variantes portant sur la saisonnalité des contributions alimentaires, sur la qualité et sur l'importance de la contribution dans la ration ;

3) les prairies dont le rôle, non déterminé à l'avance, est fluctuant d'une année sur l'autre (N = 84 ; 5 %).

L'hétérogénéité « intra-famille » nous a finalement conduits à déterminer **10 types principaux de fonctions fourragères**, et leurs variantes. Elles sont décrites dans le tableau 2. Après validation par les enquêteurs, 22 fonctions fourragères, 1 fonction non alimentaire et 1 fonction dite d'ajustement, soit au total **24 fonctions, ont été retenues.**

**Tableau 2. Caractéristiques des types de fonctions fourragères et de leurs variantes**

Types principaux ; attentes prioritaires		Variantes	Identifiant	
Orientation générale	Contribution au système d'alimentation			
Stocks	Priorité à la qualité	Valeur alimentaire élevée, pour l'alimentation hivernale d'animaux à forts besoins	Base quasi exclusive de la ration hivernale Associé à un autre fourrage dans la ration	1a 1b
	Priorité à la quantité	Apport de fourrage à valeur d'encombrement élevée	Base de la ration ; seuil de valeur alimentaire minimal à atteindre Fourrage fibreux en complément de fourrages à digestibilité élevée (vaches laitières)	2a 2b
Mixte Stocks ET Pâturage	Des stocks de qualité puis de l'herbe	Alimentation hivernale d'animaux à forts besoins ET Agrandissement des circuits de pâturage	Disponibilité pour le pâturage dès la fin du printemps ; animaux à forts besoins	3a
			Disponibilité pour le pâturage en fin d'été	Animaux + exigeants Animaux - exigeants
	Des stocks abondants puis de l'herbe	Base principale de l'alimentation hivernale (qualité intermédiaire) ET Agrandissement des circuits de pâturage	Pâturage fin hiver (déprimage) et automne Pâturage été/automne base de l'alimentation (génisses, vaches tarées) Pâturage été/automne complémentaire d'autres ressources (vaches laitières, brebis)	4a 4b 4c
Pâturage	Qualité continue	Base de l'alimentation au printemps, et moyennement complétée par d'autres fourrages en été/automne	Destination jeunes élèves	5a
			Destination femelles en lactation ; complémentation + élevée	5b
	Qualité au printemps	Alimentation de vaches laitières en lactation ; complétement par d'autres fourrages y compris au printemps	Démarrage + tardif ; + forte contribution à l'alimentation en été	6a
			Démarrage + précoce ; parcelles de mise à l'herbe ; peu utilisées en été	6b
	Priorité à la durée du pâturage	Alimentation d'animaux pouvant s'adapter à des fluctuations de l'herbe disponible	Pâturage très tôt au printemps ; fluctuations saisonnières de la quantité disponible	7a
			Démarrage tard au printemps ; fluctuations saisonnières de qualité de l'herbe sur pied	7b
			Situation intermédiaire	7c
Embouche	Pâturage base de l'alimentation d'animaux engraisés à l'herbe	8		
De l'herbe au printemps	Contribution effective à l'alimentation de courte durée	Utilisation tôt au début du printemps	9a	
		Utilisation plus tardive	9b	
Hiver	En complément d'apports à l'auge	Rôle alimentaire continu le reste de l'année ; à destination des ovins	10a	
		Rôle alimentaire discontinu le reste de l'année ; à destination des bovins	10b	

### 2.3 FONCTIONS DES PRAIRIES, CONDITIONS DE MILIEU ET PRATIQUES D'EXPLOITATION

Les prairies permanentes sont situées dans des conditions d'environnement très variées. A titre d'exemple, le tableau 3 permet de voir que certaines sont soumises à des conditions contraignantes, mais d'autres non, ce qui laisse des possibilités d'utilisation très ouvertes.

**Tableau 3. Répartition des prairies, en %, selon deux types de contraintes naturelles**

a) Régime hydrique		b) Contrainte d'accès	
Humide hiver ; frais été	34	Non mécanisable	49
Humide hiver ; sec été	24	Non pâturable	8
Sain hiver ; frais été	18	Pas de contrainte	43
Sain hiver ; sec été	19		
Non caractéristique	6		
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>Total</b>	<b>100</b>

De la même façon les périodes et fréquences d'exploitation, la fertilisation et les pratiques d'entretien sont très diverses.

Sur notre échantillon, nous avons retenu au final 38 situations combinant des caractéristiques de milieu et des pratiques spécifiques, correspondant à autant de conditions pouvant déterminer la production fourragère. Chaque prairie est caractérisée par l'appartenance à une de ces conditions de production.

L'analyse du tableau croisé des conditions de production et des fonctions (24 X 38, soit 884 combinaisons théoriques) montre que :

- toutes les fonctions ne sont pas possibles partout, car 88,5 % des possibilités théoriques ne comptent aucune parcelle ;

- à chacune des conditions de production identifiées il correspond toujours plusieurs fonctions possibles ;

- aux conditions qui présentent le moins de contraintes de milieu correspond un nombre plus élevé de fonctions possibles : jusqu'à 12 (sur un total de 24) ;

- aux conditions plus contraignantes correspond au contraire une gamme plus réduite de 3 à 4 fonctions.

On voit aussi qu'à une fonction donnée correspondent toujours différents types de parcelles situées dans des conditions contrastées.

Au final les parcelles se rangent dans un grand nombre de combinaisons, mais la répartition n'est pas homogène :

- 2/3 des 1360 parcelles se retrouvent dans 73 combinaisons « fonction » X « conditions de production » ;

- pour une condition de production donnée, 2 à 4 fonctions regroupent les 2/3 des parcelles.

Il existe donc une relation entre les fonctions affectées aux parcelles et les conditions de production. Mais cette relation apparaît complexe.

### 3. DISCUSSION

#### 3.1 TYPOLOGIE DES FONCTIONS FOURRAGERES

L'analyse nous a conduit à identifier 24 types différents d'attentes fourragères vis à vis des prairies permanentes. Cela est élevé au regard d'autres typologies se basant plus couramment sur une dizaine de types (Jeannin et al., 1991). C'est en partie la conséquence du choix méthodologique par lequel nous avons cherché à caractériser finement la temporalité des attentes, ce qui multiplie les critères de description. A l'issue de l'analyse il nous semble que cet aspect doit être conservé car on le retrouve comme discriminant des variantes des 10 types principaux de fonctions fourragères.

En revanche, compte tenu de l'hétérogénéité des zones climatiques, la caractérisation saisonnière des attentes non par des dates calendaires mais par un indicateur de précocité tel que des sommes de températures nous aurait peut-être permis de réduire la variabilité et de rapprocher des types d'attentes qui sont apparus différents (Theau et al., 1998).

Compte tenu de la plasticité couramment attribuée aux prairies permanentes (Vivier, 1990 ; Bellon et al., 1999) nous attendions une proportion importante de prairies n'ayant pas, aux dires de l'éleveur, un rôle déterminé à l'avance. En axant notre questionnement sur les fonctions « habituelles » des prairies, nous avons pu freiner l'expression des éleveurs sur ce point. Cependant, la diversité des fonctions que l'on retrouve pour un même type de conditions « milieu-pratiques » est une autre façon de traduire la plasticité des prairies permanentes et leur aptitude à être utilisées pour différents buts en fonction des exigences, ce qui confirme leur intérêt comme variable d'ajustement dans un système (Rapey et al., 2008).

#### 3.2 TYPES DE FONCTIONS ET SYSTEMES D'ELEVAGE

La plupart des fonctions se retrouvent dans des systèmes d'élevage différents. Les attendus sur certaines prairies sont décrits de manière très proche par des producteurs de lait ou de viande, dans des systèmes fourragers très divers. Chercher à élaborer une typologie des usages des prairies permanentes qui aurait une valeur générale pour divers systèmes d'élevage semble donc possible.

Certaines fonctions toutefois sont plus fréquemment associées à certains systèmes : elles caractérisent alors un rôle alimentaire bien particulier : fourniture de foin pour équilibrer la ration hivernale des vaches laitières (2b) ; prairies d'embouche (8) ; pâturage hivernal des ovins (10a).

#### 3.3 DETERMINANTS DES FONCTIONS DES PRAIRIES

D'après notre analyse le rôle que peut remplir une prairie ne dépend qu'en partie de ses caractéristiques naturelles. Les caractéristiques de sol, climat, topographie, localisation, ... ont plutôt pour effet d'exclure certaines fonctions. Ensuite dans la gamme des possibilités restantes, la fonction est déterminée par la nature des autres ressources fourragères présentes sur l'exploitation. Contrairement à de nombreuses études (Granger S., 1992 ; Theau et al. 1998, Brunschwig et al., 2010), le rôle déterminant de caractéristiques parcellaires sur les fonctions affectées aux parcelles (hormis l'absence de contraintes de mécanisation pour la réalisation de stocks)

n'apparaît pas ici. Une approche conduite sur une zone plus homogène que le territoire national serait plus appropriée pour obtenir plus de précision dans l'analyse des déterminants.

#### 3.4. PERSPECTIVES D'UTILISATION

La plus ou moins bonne réalisation des attentes vis à vis d'une prairie est liée en partie à son potentiel fourrager exprimé en quantité (tonnage produit et répartition saisonnière) et en qualité (valeurs alimentaires et évolutions). La 2<sup>ème</sup> étape du programme présenté en introduction a permis d'établir une typologie des prairies permanentes qui renseigne sur les valeurs de ce potentiel fourrager (Michaud et al., 2011). Connaissant le potentiel de production fourragère de chaque type identifié et les caractéristiques de milieu et pratiques qui lui sont associées, nous avons alors référencé une panoplie de fonctions fourragères compatibles avec chacun de ces types. Un guide pratique (Launay et al., 2011) permet ainsi de guider la réflexion sur le potentiel d'utilisation d'un type donné de prairie permanente.

### CONCLUSION

La diversité des fonctions fourragères des prairies permanentes, définies par leur contribution saisonnière à un système d'alimentation, est très importante à l'échelle des principales régions herbagères françaises.

Cette diversité a été résumée en une typologie des fonctions fourragères. Dix types principaux de fonctions fourragères, assortis de variantes, ont été établis. Ils se différencient par la nature – stock ou pâture – de la ressource recherchée, par la contribution quantitative et qualitative à l'alimentation des animaux, et par la répartition saisonnière de ces attentes.

Pour remplir une fonction alimentaire donnée, différents types de prairies permanentes peuvent être utilisés. Inversement une même prairie peut remplir des fonctions différentes.

Les aptitudes potentielles des principales prairies à remplir les principales fonctions fourragères ont été référencées dans un guide pratique donnant aux utilisateurs des éléments pour orienter la réflexion sur le diagnostic d'utilisation des prairies.

*Les auteurs remercient tous les éleveurs et conseillers d'élevage mobilisés dans le projet CASDAR – Prairies Permanentes, ainsi que Mathieu Pissot (Vétagro Sup Clermont-Ferrand) et Julia Vuattoux (ENSAIA Nancy) qui ont réalisé le traitement des données.*

**Bellon S., Girard N., Guerin G., 1999.** Fourrages, 158, 115-132.

**Brunschwig G., Sibra C., Agabriel C., Molenat H., Garcia-Launay F., 2010.** Renc. Rech. Ruminants, 2010, 17, 37-40.

**Duru M., Nocquet J., Bourgeois A., 1988.** Fourrages 115, 251-272.

**Granger S., 1992.** Typologie de fonctionnement des prairies permanentes pâturées. Th. Université de Bourgogne, 260 p.

**Jeannin B., Fleury P., Dorioz J.M., 1991.** Fourrages 128, 379-396.

**Huyghe C., 2008.** In C. Béranger, J. Bonnemaire. Prairies, herbivores, territoires : quels enjeux ? QUAE Ed., 13-24

**Institut de l'Élevage, 2002.** Dossier Economie de l'élevage N° 318. 67-88.

**Launay F., Baumont R., Plantureux S., Farrie J-P., Michaud A. et Pottier E., 2011.** Prairies Permanentes : des références pour valoriser leur diversité. 128 p.

**Loysel E.J., Delattre J.D., Hubert D., Küng-Benoit A., Loiseau P., Vivier M., 1994.** Fourrages 137, 107-110.

**Michaud A., Plantureux S., Pottier E., Farrie J.P., Launay F., Baumont R., 2011.** Renc. Rech. Ruminants, 18, cet ouvr.

**Rapey H., Gueringer A., Gresset F., Houdart M., Josien E., Bigot G., 2008.** Renc. Rech. Ruminants, 15, 155-158

**Theau J.P., Duru M., Coléno F.C., Rauzy Y., 1998.** Fourrages, 156, 589-601.

**Vivier M., 1990.** Fourrages 124, 337-355.

## Annexe 3

### Valeur aromatique des prairies permanentes : combinaison des listes d'espèces aromatiques existantes

Liste des espèces aromatiques identifiées, de leur teneur en terpènes et de leur préhensibilité (Mariaca *et al.* 1997 ; Brunias 2009).

Famille botanique	Espèce aromatiques (latin) (Gragnaire and Vanhoecke, 1997; Brunias et al., 2007)	Composition en terpènes (Mariaca et al., 1997) <sup>a</sup>		Niveau de préhensibilité <sup>b</sup>
		monoterpènes	sesquiterpènes	
Apiacées	<i>Carum Carvi</i>	+/-	+	2
	<i>Daucus carota</i>	.	.	.
	<i>Heracleum sphondylium</i>	++	+	2
	<i>Ligusticum mutellina</i>	++	0	3
	<i>Meum athamanticum</i>	.	.	.
	<i>Pimpinella saxifraga</i>	.	.	.
Astéracées	<i>Aposeris foetida</i>	+/-	0	1/2
	<i>Achillea millefolium</i>	.	.	.
	<i>Arnica montana</i>	.	.	.
	<i>Aster bellidiflorus</i>	+	0	1/2
	<i>Bellis perennis</i>	.	.	.
	<i>Centaurea montana</i>	.	.	.
	<i>Centaurea nigra</i>	.	.	.
	<i>Chrysanthemum leucanthemum</i>	++	+	.
	<i>Cirsium arvense</i>	.	.	.
	<i>Hypochoeris radicata</i>	.	.	.
	<i>Solidago virgaurea</i>	.	.	.
	<i>Taraxacum densleonis</i>	.	.	.
	<i>Taraxacum officinale</i>	.	.	3
Campanulacées	<i>Campanula barbata</i>	0	.	1/2
Fabacées	<i>Anthyllis vulneraria</i>	+/-	.	2
	<i>Lotus alpinus</i>	+/-	.	3
	<i>Trifolium pratense</i>	.	.	3
Brassicacée	<i>Cardamine pratensis</i>	.	.	.
	<i>Capsela bursa-pastoris</i>	.	.	.
Geraniacées	<i>Geranium sylvaticum</i>	+	+/-	1
Lamiacées	<i>Ajuga reptans</i>	+/-	0	1
	<i>Clinopodium vulgare</i>	.	.	.
	<i>Mentha longifolia</i>	++	+	0
	<i>Origanum vulgare</i>	.	.	.
	<i>Prunella vulgaris</i>	+	+/-	1/2
	<i>Stachys officinale</i>	.	.	.
	<i>Teucrium chamaedrys</i>	.	.	.

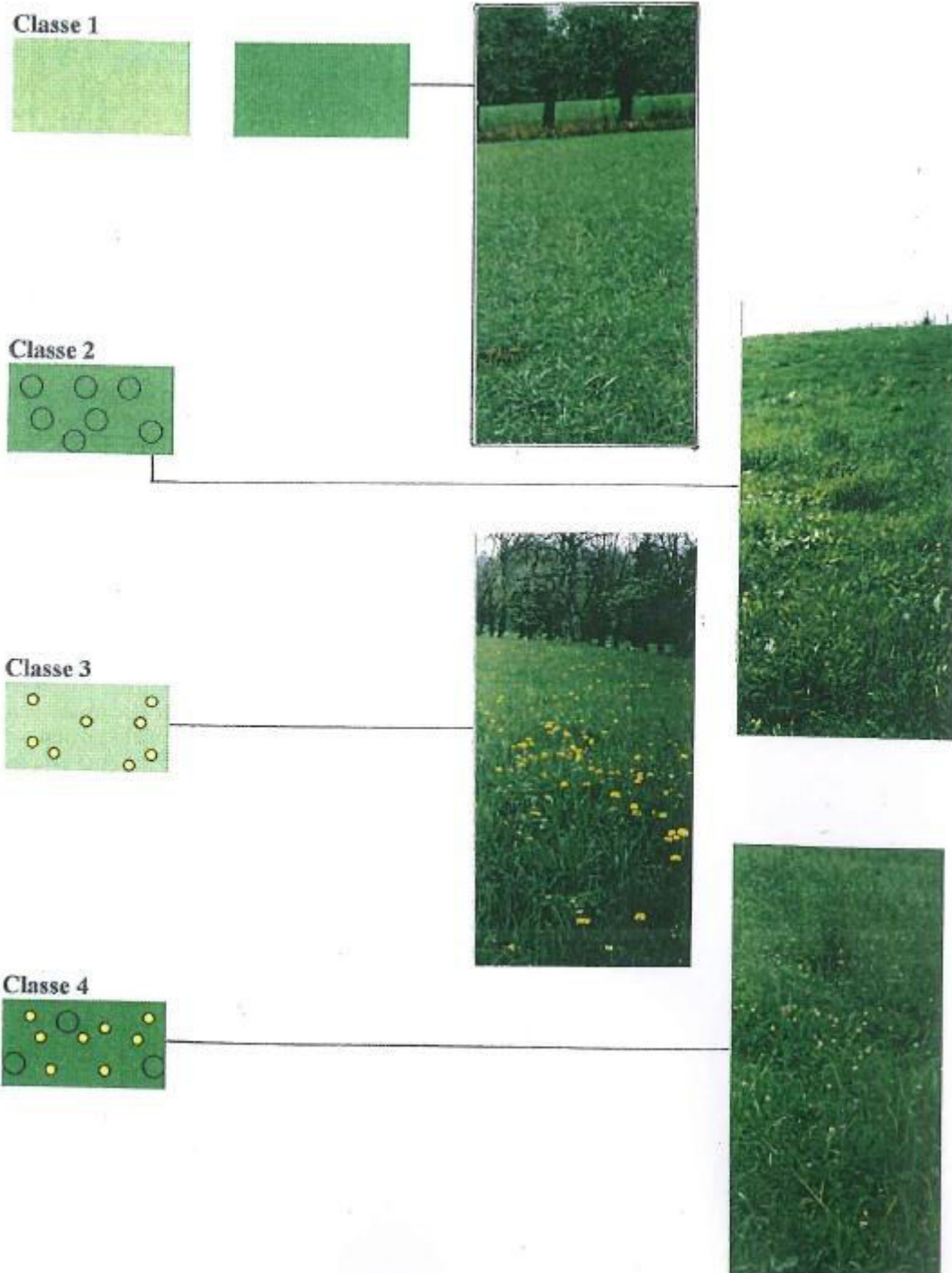
	<i>Thymus pulegioides</i>	.	.	.
<b>Plantaginacées</b>	<i>Plantago alpina</i>	0	0	3
	<i>Plantago major</i>	.	.	.
	<i>Plantago lanceolata</i>	.	.	3
<b>Polygonacées</b>	<i>Rumex alpestris</i>	0	0	2
	<i>Rumex acetosella</i>	.	.	.
	<i>Rumex acetosa</i>	.	.	.
<b>Renonculacées</b>	<i>Ranunculus aconitifolius</i>	0	0	1/2
<b>Rosacées</b>	<i>Alchemilla xanthochlora</i>	+/-	0	1
	<i>Alchemilla conjuncta</i>	+/-	0	1
	<i>Potentilla erecta</i>	+/-	0	1/2
<b>Rubiacées</b>	<i>Galium anisophyllum</i>	+/-	+/-	2
<b>Poacées</b>	<i>Dactylis glomerata</i>	+/-	0	3
	<i>Phleum pratense</i>	0	0	3
	<i>Anthoxanthum odoratum</i>	+/-	.	.
<b>Ericacées</b>	<i>Calluna vulgaris</i>	.	.	.
	<i>Vaccinium myrtillus</i>	.	.	.
<b>Hypéricacées</b>	<i>Hypericum perforatum</i>	.	.	.
<b>Violacées</b>	<i>Viola lutea</i>	.	.	.
<b>Scrofulariacées</b>	<i>Veronica officinalis</i>	.	.	.
<b>Cupressacées</b>	<i>Juniperus communis</i>	.	.	.

<sup>a</sup> . : composition en terpènes non connue ; 0 : composition en terpènes nulle ; +/- : composition en terpènes faible ; + : composition en terpènes moyenne ; ++ : composition en terpènes importante. <sup>b</sup> 0 : espèce non préhensible ; 0 : espèce moyennement préhensible ; 2 : espèce préhensible ; 3 : espèce très préhensible.

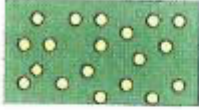


## Annexe 4

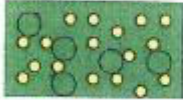
### Notation de l'aspect visuel de la parcelle selon la méthode de Fleury (1995)



Classe 5



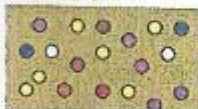
Classe 6



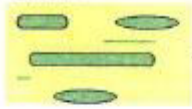
Classe 7



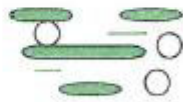
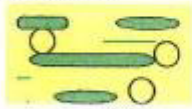
Classe 8



Classe 9



Classe 10



Classe 11



Classe 12



Classe 13



## Annexe 5

## Etude des liens entre la composition fonctionnelle et les critères d'aptitude des services fourragers : modèles de prédiction complets

### Modèles de prédiction de la production

	P1	P2	croissance P1P2	P3	P4	production annuelle
<b>Modèles H1</b>						
R <sup>2</sup>	0.2	0.25	0.21	0.12	0.11	0.18
RMSE	1.03	1.68	2.09	0.88	0.77	2.32
Signification des effets	<i>P, s</i>	<i>P, s</i>	<i>P, s</i>	<i>P, s</i>	<i>P, s</i>	<i>P, s</i>
Légumineuses	*, -	***, -	ns	ns	**, -	***, -
Diverses	ns	***, -	**, -	ns	ns	***, -
TF B	ns	ns	ns	ns	*, -	ns
TF b	*, +	*, -	ns	ns	ns	*, -
TF C	**, -	***, -	*, +	ns	*, -	**, -
ST	***, +	.	***, -	.	ns	**, -
Année	ns	ns	*, +/+	**, +/+	ns	ns
Légumineuses*Année	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Diverses*Année	ns	ns	ns	ns	ns	ns
TF B*Année	ns	ns	ns	ns	ns	ns
TF b*Année	ns	ns	ns	ns	ns	ns
TF C*Année	ns	ns	*, +/+	ns	ns	ns
ST*Année	ns	ns	ns	.	ns	ns
<b>Modèles H2</b>						
R <sup>2</sup>	0.24	0.11	0.09	0.13	0.09	0.11
RMSE	0.99	1.80	2.18	0.84	0.74	2.43
Signification des effets	<i>P, s</i>	<i>P, s</i>	<i>P, s</i>	<i>P, s</i>	<i>P, s</i>	<i>P, s</i>
Stade moyen	*, +	**, +	ns	ns	.	***, +
Teneur en MS	**, -	ns	ns	**, -	***, -	**, -
ST	***, +	ns	ns	.	.	ns
Année	*, +/-	ns	ns	ns	ns	ns
ST*Année	ns	**, +/+	**, +/+	.	.	ns
Stade moyen*Année	ns	*, -/+	ns	.	.	ns
Teneur en MS*Année	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<b>Modèle H3</b>						
R <sup>2</sup>	0.31	0.29	0.21	0.16	0.17	0.23
RMSE	0.96	1.63	2.07	0.87	0.75	2.29
Signification des effets	<i>P, s</i>	<i>P, s</i>	<i>P, s</i>	<i>P, s</i>	<i>P, s</i>	<i>P, s</i>
Légumineuses	*, -	***, -	*, -	ns	**, -	***, -
Diverses	ns	***, -	***, -	ns	ns	***, -
TF B	ns	ns	ns	ns	*, -	ns
TF b	**, +	ns	ns	ns	ns	ns
TF C	ns	**, -	ns	ns	ns	*, -
Stade moyen	***, +	***, +	ns	.	.	**, +
Teneur en MS	***, -	ns	ns	**, -	*, -	***, -
ST	***, +	ns	*, -	.	.	ns
Année	*, -/+	ns	ns	ns	*, +/+	ns
Teneur en MS*Année	ns	ns	ns	ns	*, -/+	ns
Stade moyen*Année	ns	**, -/+	ns	.	.	*, -/+
Légumineuses*Année	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Diverses*Année	ns	ns	ns	ns	ns	ns
TF B*Année	ns	ns	ns	ns	*, +/+	ns
TF b*Année	ns	ns	ns	ns	ns	ns
TF C*Année	ns	ns	ns	ns	ns	ns
ST*Année	ns	ns	ns	.	.	ns

P: p-value ; s : signe ; MSE : écart type résiduel du modèle ; moyenne : moyenne du modèle ; Année : effet année ; \* : <0.05 ; \*\* : <0.01 ; \*\*\* : <0.001 ; ns : non significatif

## Modèles de prédiction de la dMO

	P1	P2	Evolution dMO	P3	P4
<b>Modèles H1</b>					
R <sup>2</sup>	0.29	0.28	0.27	0.33	0.22
RMSE	4.00	3.29	0.01	4.25	5.15
Signification des effets	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>
Légumineuses	***, +	***, +	***, +	***, +	**, +
Diverses	ns	*, +	***, +	***, +	***, +
TF B	ns	ns	ns	ns	ns
TF b	ns	ns	*, +	ns	ns
TF C	***, -	ns	***, +	***, -	***, -
ST	***, +	***, -	***, +	.	.
Année	ns	ns	ns	ns	ns
Légumineuses*Année	**, +/+	ns	ns	ns	ns
Diverses*Année	ns	ns	ns	ns	ns
TF B*Année	ns	ns	ns	ns	ns
TF b*Année	ns	ns	ns	ns	ns
TF C*Année	ns	ns	*, -/+	ns	ns
ST*Année	ns	ns	ns	.	.
<b>Modèles H2</b>					
R <sup>2</sup>	0.39	0.33	0.15	0.32	0.23
RMSE	3.74	3.09	0.01	4.21	5.23
Signification des effets	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>
Stade moyen	***, -	***, -	***, -	.	.
Teneur en MS	***, -	***, -	ns	***, -	***, -
ST	***, -	**, -	***, +	.	.
Année	ns	ns	ns	ns	ns
ST*Année	ns	ns	*, -/+	.	.
Stade moyen*Année	ns	*, +/+	ns	.	.
Teneur en MS*Année	*, -/+	ns	*, +/+	*, +/+	ns
<b>Modèle H3</b>					
R <sup>2</sup>	0.48	0.49	0.34	0.45	0.37
RMSE	3.49	2.74	0.01	3.82	4.67
Signification des effets	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>
Légumineuses	***, +	***, +	***, +	***, +	***, +
Diverses	ns	ns	***, +	***, +	***, +
TF B	ns	ns	ns	ns	ns
TF b	ns	**, -	ns	ns	ns
TF C	***, -	ns	***, +	***, -	**, -
Stade moyen	***, -	***, -	**, -	.	.
Teneur en MS	***, -	***, -	ns	***, -	***, -
ST	**, -	ns	***, +	.	.
Année	ns	ns	ns	ns	ns
Teneur en MS*Année	**, -/+	ns	*, +/+	ns	ns
Stade moyen*Année	ns	**, +/+	ns	.	.
Légumineuses*Année	ns	*, +/+	ns	ns	ns
Diverses*Année	ns	ns	ns	ns	ns
TF B*Année	ns	*, -/+	ns	ns	ns
TF b*Année	ns	ns	ns	ns	ns
TF C*Année	ns	ns	*, -/+	ns	ns
ST*Année	ns	ns	ns	.	.

P: p-value ; s : signe ; MSE : écart type résiduel du modèle ; moyenne : moyenne du modèle ; Année : effet année ; \* : <0.05 ; \*\* : <0.01 ; \*\*\* : <0.001 ; ns : non significatif

## Modèles de prédiction de la MAT

	P1	P2	Evolution MAT	P3	P4
<b>Modèles H1</b>					
R <sup>2</sup>	0.3	0.21	0.18	0.18	0.12
RMSE	27.33	20.08	0.04	26.08	30.32
Signification des effets	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>
Légumineuses	*, +	***, +	**, +	***, +	***, +
Diverses	ns	ns	***, +	ns	ns
TF B	**, +	ns	**, -	ns	ns
TF b	*, +	ns	ns	ns	ns
TF C	*, -	ns	ns	ns	*, -
ST	***, -	***, -	***, +	.	.
Année	**, +/+	ns	ns	ns	ns
Légumineuses*Année	ns	ns	ns	ns	ns
Diverses*Année	ns	ns	ns	ns	ns
TF B*Année	ns	ns	ns	ns	ns
TF b*Année	*, -/+	ns	ns	ns	ns
TF C*Année	ns	ns	ns	ns	ns
ST*Année	*, -/+	ns	ns	.	.
<b>Modèles H2</b>					
R <sup>2</sup>	0.45	0.34	0.13	0.32	0.21
RMSE	23.37	18.07	0.04	23.70	28.90
Signification des effets	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>
Stade moyen	***, -	***, -	*, -	.	.
Teneur en MS	***, -	***, -	ns	***, -	***, -
ST	***, -	**, -	***, +	.	.
Année	**, +/+	ns	ns	**, -/+	ns
ST*Année	ns	**, -/+	ns	.	.
Stade moyen*Année	ns	ns	ns	.	.
Teneur en MS*Année	ns	ns	ns	*, +/+	ns
<b>Modèle H3</b>					
R <sup>2</sup>	0.5	0.42	0.23	0.42	0.29
RMSE	22.76	17.26	0.04	22.05	27.44
Signification des effets	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>	<b>P, s</b>
Légumineuses	ns	***, +	*, +	***, +	***, +
Diverses	ns	ns	***, +	ns	ns
TF B	*, +	ns	**, -	ns	ns
TF b	ns	ns	ns	ns	ns
TF C	ns	ns	ns	ns	ns
Stade moyen	***, -	***, -	*, -	.	.
Teneur en MS	***, -	***, -	ns	***, -	***, -
ST	***, -	ns	***, +	.	.
Année	**, +/+	ns	ns	**, -/+	ns
Teneur en MS*Année	ns	ns	ns	*, +/+	ns
Stade moyen*Année	ns	*, +/+	*, +/+	.	.
Légumineuses*Année	ns	ns	ns	ns	ns
Diverses*Année	ns	ns	ns	ns	ns
TF B*Année	ns	ns	ns	ns	ns
TF b*Année	**, -/+	ns	ns	ns	ns
TF C*Année	ns	ns	ns	ns	ns
ST*Année	ns	*, -/+	**, -/+	.	.

P : p-value ; s : signe ; RMSE : écart type résiduel du modèle ; moyenne : moyenne du modèle ; Année : effet année ; \* : <0.05 ; \*\* : <0.01 ; \*\*\* : <0.001 ; ns : non significatif

## Annexe 6

### Construction d'une typologie des prairies permanentes : document de présentation



Nancy-Université  
INPL

AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE  
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL  
POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

ofo

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

Monsieur Jean-Louis PEYRAUD, Directeur de Recherche, INRA, Saint Gilles

Monsieur Olivier HUGUENIN-ELIE, Directeur de Recherche, Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Zürich

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Madame MICHAUD Audrey

à soutenir devant un jury de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,  
une thèse intitulée :

"Evaluation des services fourragers et environnementaux à partir des conditions de  
milieu, des pratiques de gestion et de la végétation."

en vue de l'obtention du titre de :

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Spécialité : « Sciences agronomiques »

Fait à Vandœuvre, le 15 juin 2011

Le Président de l'IN.P.L.,

F. LAURENT



Institut National Polytechnique de Lorraine  
inpl@inpl-nancy.fr • www.inpl-nancy.fr

2, av. de la Poëliné-Rays BP 3  
54501 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex  
FRANCE  
Tel : +33(0)3 83 59 59 59  
Fax : +33(0)3 83 59 59 55



## **Evaluation des services fourragers et environnementaux des prairies permanentes à partir de la végétation, du milieu et des pratiques de gestion**

*Mots clés : prairies permanentes, services fourragers et environnementaux, composition botanique et fonctionnelle, descripteurs, critères d'aptitude.*

Les prairies permanentes (PP) jouent un rôle agronomique et environnemental important. Cependant, leur faible niveau de subventions, une méconnaissance de leur fonctionnement et un désintérêt de ces surfaces au profit de productions fourragères plus productives ont accéléré leur retournement. Revaloriser ces surfaces dans les systèmes fourragers en mettant notamment en avant les services rendus par les PP est donc un enjeu important. Dans ce cadre, l'objectif de notre étude était d'identifier des descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion ainsi que les états de la végétation pertinents pour prédire ces services. Notre approche s'est appuyée sur une démarche en plusieurs étapes : i) identification et caractérisation des services fourragers et environnementaux pertinents pour les PP, ii) identification des critères d'aptitude (valeur nutritive, quantité de nectar disponible...), qui permettent d'évaluer le degré d'atteinte du service, iii) prévision des valeurs de chaque critère d'aptitude à partir des états de la végétation (composition botanique et fonctionnelle) et iv) construction des liens entre les états de la végétation et des descripteurs pédoclimatiques (température, régime hydrique...) et de pratiques de gestion (fertilisation, date de première fauche...). Un travail de bibliographie, d'expertise et d'enquêtes en ferme a permis de sélectionner les services fourragers et environnementaux, les critères d'aptitude, les états de la végétation et les descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion. Au total, quatre services environnementaux et 10 services fourragers ont été étudiés, en tenant compte de 12 états de la végétation (composition botanique (présence et dominances en espèces) et fonctionnelle (traits de vie et propriétés des espèces)), de 15 descripteurs pédoclimatiques (température, humidité du sol, ...) et 19 descripteurs des pratiques de gestion (fertilisation, intensité d'utilisations de la prairie,...). L'étude d'un réseau national de 190 parcelles nous a permis de montrer que les compositions fonctionnelle et botanique sont non redondantes et influencées par des descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion différentes. La composition fonctionnelle est influencée par des descripteurs pédoclimatiques et des pratiques de gestion alors que la composition botanique, qui fait appel à un plus grand nombre de descripteurs, est majoritairement prédite par des descripteurs pédoclimatiques. Les modèles de prévisions sont meilleurs pour la composition botanique que pour la composition fonctionnelle. L'étude de ce réseau ainsi que d'un dispositif en station expérimentale nous ont permis d'évaluer la qualité de prédiction des critères d'aptitude fourragers (production et valeur nutritive) à partir de la composition fonctionnelle (types fonctionnels (TF) de graminées, proportion de graminées, légumineuses et diverses) de la végétation. L'étude, dans un même milieu de trois prairies de composition en TF contrastée confirme sur l'ensemble de la saison de végétation les différences de qualité et de production de la prairie induites par la composition en TF. En revanche, à l'échelle du réseau national de prairies, la composition en TF n'explique qu'une part limitée des variations de qualité et de production observées. D'autres états de la végétation comme les proportions de légumineuses et de plantes diverses, ainsi que le stade moyen de la végétation et la teneur en matière sèche de la prairie contribuent également à expliquer les différences de production et de qualité entre prairies. Enfin une démarche multicritères nous a permis de construire une méthode d'évaluation des services fourragers et environnementaux à partir des critères d'aptitude. Ainsi, ce travail de thèse a permis de construire les bases d'une méthode de prédiction des services fourragers et environnementaux des prairies permanentes à partir de la connaissance du milieu, des pratiques de gestion et de quelques critères simples caractérisant la végétation.

## **Evaluation of agronomic and environmental services of permanent grasslands from vegetation, environment and management**

*Keywords : permanent grasslands, agronomic and environmental services, botanical and functional composition, descriptors, criteria of aptitude.*

The contribution of permanent grasslands (PG) to agronomic and environmental services is important. However, their low level of subsidies, a lack of knowledge about their management and a disinterest of these surfaces in favour of more productive forage production have accelerated their downturn. The upgrade of these surfaces in forage systems in particular by studying services of PG is an important issue. In this context, the objective of our study was to identify pedoclimatic and management practices descriptors and characteristics of the vegetation relevant to predict these services. Our approach was based on different steps: i) identification and characterization of forage and environmental services relevant to the PG, ii) identification of aptitude criteria (herbage quality, amount of nectar available ...) which allow to assess the degree of achievement of the services, iii) prediction of values for each criterion of aptitude from characteristics of vegetation (botanical and functional composition) and iv) building links between characteristics of vegetation and pedoclimatic (temperature, soil moisture) and management practices (fertilization, date of first cut) descriptors. From the literature survey, expertise and farm surveys we selected the forage and environmental services, the criteria of aptitude, the characteristics of vegetation and pedoclimatic and management practices descriptors. In total, four environmental services and 11 feed services were studied, taking into account the 12 characteristics of the vegetation (botanical composition (presence and dominance of species) and functional composition (life traits and properties of species)), 15 pedoclimatic descriptors (temperature, soil moisture ...) and 19 management practices descriptors (fertilization, intensity of use of grassland...). The study of a national network of 190 grasslands allowed us to show that botanical and functional composition are non-redundant and influenced by different pedoclimatic and management practices descriptors. The functional composition is influenced by pedoclimatic and management practices descriptors while the botanical composition, which uses a larger number of descriptors, is mainly predicted by pedoclimatic descriptors. The model predictions are better for the botanical composition than for the functional composition. The study of this network and of an experiment in control conditions allowed us to evaluate the quality of prediction of criteria of aptitude for forage services from the functional composition (functional types (FT), proportion of grasses, legumes and forbs, middle stage and dry matter content) of the vegetation. The study in a common environment of three grasslands contrasted on FT composition confirms on the whole growth season the differences in quality and production of grassland that are linked to the FT composition. In contrast, at the scale of the national grassland network, FT composition alone is not sufficient to predict the observed differences in production and quality. Other characteristics of vegetation such as the proportion of legumes and forbs, as well as the mean stage of vegetation or the dry matter content also contribute to explain the differences in production and quality between grasslands. Finally, a multicriteria approach allowed us to build an evaluation method of forage and environmental services from the criteria of aptitude. Thus, this thesis work allowed the development of a method to predict the forage and environmental services provided by permanent grasslands from the knowledge of pedoclimatic characteristics, management practices and of simple vegetation criteria.