HAL
open science

Prédiction de propriétés agroécologiques de prairies permanentes et de leurs compromis : l'exemple du massif vosgien

Geoffrey Mesbahi

▶ **To cite this version:**

Geoffrey Mesbahi. Prédiction de propriétés agroécologiques de prairies permanentes et de leurs compromis : l'exemple du massif vosgien. Agronomie. Université de Lorraine, 2020. Français. NNT : 2020LORR0086 . tel-02958612

HAL Id: tel-02958612

https://hal.inrae.fr/tel-02958612v1

Submitted on 6 Oct 2020

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.

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

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

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.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

THESE

Présentée pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Université de Lorraine

en sciences agronomiques

par

Geoffrey MESBAHI

Prédiction de propriétés agroécologiques de prairies permanentes et de leurs compromis : l'exemple du massif vosgien

Thèse soutenue le 7 juillet 2020 devant un jury composé de :

Mme **Anne BONIS**, HDR, Chargée de Recherche, CNRS Clermont-Ferrand	Rapportrice
M. **François GILLET**, Professeur, Université de Franche-Comté	Rapporteur
Mme **Danièle MAGDA**, Directrice de recherche, INRAe Toulouse	Examinatrice
Mme **Audrey MICHAUD**, Maître de conférences, VetAgroSup Clermont-Ferrand	Examinatrice
M. **Sylvain DIQUELOU**, HDR, Maître de conférences, Université de Caen	Examinateur
M. **Sylvain PLANTUREUX**, Professeur, Université de Lorraine	Directeur de thèse

Et les membres invités :

Mme **Cécile BAYEUR**, Chargée mission, SYCOPARC

M. **Jean-Sébastien LAUMOND**, Chargé de mission, CC Vallée de la Bruche

REMERCIEMENTS

Cette thèse n'aurait pu être réalisée sans le soutien de nombreuses personnes : je souhaite remercier tous les cerveaux et toutes les mains qui m'ont aidé, de près ou de loin, tout au long de ces trois ans et demi.

Tout d'abord, un grand merci à **Cécile** Bayeur et **Sylvain** Plantureux pour m'avoir choisi pour cette aventure : me sortir de la forêt brésilienne pour me lancer dans le massif vosgien était un pari, j'espère qu'il a été gagnant ! Merci pour votre accompagnement scientifique et technique, pour votre aide sur le terrain et pour vos multiples relectures d'articles, de posters, de présentations et bien sûr de ce manuscrit de thèse. Enfin, merci pour votre confiance, votre soutien et votre disponibilité au quotidien.

Merci à l'**Agence de l'Eau Rhin-Meuse**, à l'Union Européenne via le **Fonds Européen de Développement Régional**, au **Commissariat à l'aménagement du Massif des Vosges** et à la **Région Grand-Est**, pour avoir financé le programme *Typologie agro-écologique des prairies permanentes du massif des Vosges*, compensé le manque de financements en début de thèse, accepté les modifications de maquettes financières et permis la prolongation du projet pour une année de plus.

Je souhaite remercier les membres de mon comité de suivi de thèse : **Alice** Michelot-Antalik, **Bernard** Amiaud, **Grégory** Loucougaray et **Pascal** Carrère, ainsi que tous les collègues du **laboratoire LAE** ayant participé aux différentes *formations au projet de thèse* ou simplement pris le temps de d'échanger avec moi. Merci de m'avoir aidé à forger mon projet de thèse et d'avoir été toujours constructifs : vos conseils et regards extérieurs m'ont été précieux. Ces épreuves peuvent être difficiles dans la vie d'un doctorant, mais grâce à vous elles n'ont jamais été source d'angoisse. Enfin, je tiens à remercier les **membres du jury**, pour le temps consacré à ma thèse et leurs propositions d'amélioration.

Ce travail n'aurait pas pu être possible sans l'aide des membres du « *COTECH* » : **Adrien** Boillot, **Fabien** Dupont, **Jean-Sébastien** Laumond, **Julien** Bourbier, **Pauline** Barrier, **Rémi** Collaud, **Thierry** Froelicher. Votre aide sur le terrain a été essentielle, à la fois pour identifier les prairies à étudier mais aussi pour le travail de terrain que vous avez réalisé ! Sans vous je n'aurais pas pu analyser les prairies en 2019, année qui devait théoriquement compenser la pousse catastrophique de 2018… Espérons que la prochaine fois sera la bonne ! Merci aussi à **Louise** Regnier et **Vincent** Mirault d'avoir pris le temps de m'aider dans la collecte de fourrage, bien que ce n'était pas initialement l'objectif de votre travail.

Le *COTECH* a eu l'occasion de s'agrandir à diverses occasions grâce à la présence de **Arnaud** Jouart, **Cécile** Hary, **Damien** Godfroy, **Daniel** Brua, **Emilie** Rivière, **Eric** Albrecht, **Guillaume** Gama, **Margaux** Reboul-Salze, **Pascale** Garret, **Sébastien** Husse et **Stéphan** David. Merci à vous tous, car votre expertise du territoire, de l'agriculture et des prairies m'a permis de mieux comprendre les particularités du massif vosgien. Nos nombreuses réunions à Schirmeck, où l'accueil est toujours parfait, ont été l'occasion de discuter de la concrétisation des outils d'aide à la médiation, sans quoi ma thèse serait bien fade.

Cette thèse a été pour moi l'occasion de co-encadrer de nombreux stagiaires. Merci à **Gaëlle** Imbert, **Louise** Lobjois et **Marc** Bisset : vous avez été les premiers stagiaires du projet, et votre

gros travail d'enquête et de classification des prairies m'a permis de mieux comprendre la diversité du massif vosgien. **Benjamin** Pires, **Fanette** Haltel et **Marie-Louise** Coly, merci à vous pour les nombreuses heures de terrain (et de route) : tondre et peser de l'herbe sous un orage n'est pas des plus agréables, merci pour votre patience et votre bonne humeur pendant ces deux mois ! Enfin, merci à **Lisa** Aubry, qui nous a rejoint quelques jours avant l'épisode de confinement. J'espère que réaliser ton stage à distance n'a pas été trop difficile, et que nos multiples réunions en visioconférence n'ont pas été traumatisantes.

J'ai bien sûr une grande pensée pour tous les collègues des **Vosges du Nord**. Vous m'avez accueilli à bras ouverts au sein de l'équipe et m'avez fait découvrir ce territoire qui m'était inconnu, dans la bonne ambiance quotidienne indispensable à la réalisation d'une thèse. Je sais grâce à vous que les Parc Naturels Régionaux ne font pas que de l'écologie, et surtout que la vie de château n'est pas toujours merveilleuse (en particulier quand elle ne dure que deux semaines et commence par un déménagement…). Il ne vous a pas fallu longtemps pour me convertir à la bière marquée Parc et au sauna, et je suis désormais heureux de savoir prononcer Langensoultzbach, Sturzelbronn ou encore Goetzenbruck sans trébucher. Merci au **pôle Nature** pour toutes les discussions que nous avons pu avoir, au sujet des prairies bien sûr mais aussi des forêts, cours d'eau, tourbières et rochers (et encore un peu de forêt). Enfin merci à **Marie** L'Hospitalier et **Sébastien** Morel pour votre expertise des prairies permanentes, votre soutien et vos conseils tout au long de la thèse, et vos négociations financières avec l'aide de **François** Goetzmann et **Thomas** Rosinski m'ayant permis de prolonger mon travail pendant quelques mois.

Toutes les données climatiques nécessaires à la réalisation de mes analyses m'ont été généreusement transmises par **Christian Piedallu**. Merci beaucoup pour ces données, leur précision est un atout majeur pour la prédiction des végétations et propriétés agroécologiques.

Je tiens à remercier **Jean-Noël** Galliot, **Katja** Klumpp et **Sophie** Hulin pour avoir longtemps échangé avec moi à propos des protocoles de mesure des stocks de carbone du sol et d'estimation des valeurs organoleptiques et santé des prairies. Merci aussi à **Claire** Laurent pour avoir réalisé des prélèvements de sols et les mesures de densité. Malheureusement je n'ai pas pu valoriser toutes ces données dans le cadre de ma thèse, mais j'espère pouvoir les inclure à d'autres études et/ou outils de médiation rapidement.

Merci à **tous les agriculteurs** ayant participé à cette étude. Vous avez accepté de répondre à nos enquêtes et de nous laisser accéder à vos prairies : sans vous cette étude n'aurait pas été possible. J'espère que mes résultats permettront de développer des outils d'aide à la médiation qui vous seront utiles, et qu'un accompagnement durable vous permettra de valoriser toute la diversité des prairies permanentes.

Enfin, je souhaite remercier de manière plus générale les **amis** et la **famille**, pour votre soutien pendant ces quatre années écoulées depuis ma candidature à ce projet, malgré la difficulté à se croiser régulièrement à cause de la distance et des heures supplémentaires de tous.

Cette aventure n'aurait surement pas pu commencer sans ta présence, **Mélissa**. Tu étais présente pour la rédaction de ma lettre de motivation, tu m'as accompagné au cyber-café de Santa Barbara (MG) pour l'entretien, tu m'as aidé pour la mise en place de protocoles et pour réaliser les prélèvements, tu m'as conseillé pour les analyses statistiques, tu as relu et corrigé de multiples articles et diaporamas… Tenir ce rythme n'aurait pas été possible sans nos escapades

du week-end avec **Totoro**, notre fidèle destrier permettant de vrai week-ends au vert sans connexion avec la civilisation, et nos nombreux voyages (il va falloir protéger de la prairie permanente pour les compenser…). Enfin, j'ai vu grandir en toi un intérêt soudain pour la botanique : tu es à deux doigts de trouver des dactyles par toi-même, continue !

PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES

Articles publiés :

Mesbahi G., Michelot-Antalik A., Goulnik J., Plantureux S. (2020) Permanent grassland classifications predict agronomic and environmental characteristics well, but not ecological characteristics, *Ecological Indicators*, 110, 105956

Mesbahi G., Bayeur C., Michelot-Antalik A., Plantureux S. (2019) Quelles typologies pour la prédiction des propriétés des prairies permanentes?, *Fourrages*, 237, 57-65

Article accepté :

Goulnik J., Plantureux S., Van Reeth C., Baude M., Mesbahi G., Michelot-Antalik A. (2020) Face surface and hairiness of pollinators visiting semi-natural grassland wild plants predict their face pollen load, *Ecological Entomology*

Présentation lors de conférences internationales :

Mesbahi G., Bayeur C., Plantureux S. (2020) Trade-offs between agronomic and ecological characteristics in permanent grasslands. *28th General Meeting of the European Grassland Federation*, Helsinki, Finlande.
Article de conférence (présentation annulée pour le Covid-19)

Mesbahi G., Bayeur C., Plantureux S. (2018) Prediction of grassland values by phytosociological or agronomical approach. *27th General Meeting of the European Grassland Federation*, Cork, Irlande.
Présentation orale et article de conférence

Présentations lors de conférences nationales :

Mesbahi G. (2020) Quelle classification pour la prédiction des propriétés prairiales ? *Séminaire national Habitats - « Typologies, données et cartographies : état des lieux des connaissances et perspectives sur les besoins opérationnels »*, Paris, France
Présentation orale

Mesbahi G., Bayeur C., Plantureux S. (2019) Les typologies agronomiques : des outils efficaces pour évaluer rendements et performances des prairies permanentes. *Journées de Printemps de l'AFPF*, Paris, France
Poster et article de conférence

Mesbahi G., Bayeur C., Plantureux S. (2019) Des prairies permanentes diversifiées et performantes. *Journée de l'école doctorale*, Nancy, France
Poster

Présentations lors de conférences techniques :

Mesbahi G. (2018 et 2019) La typologie de prairies permanentes : un outil pour agronomes et écologues. *Journée de formation à la phytosociologie du massif vosgien*, Saverne et Rothau, France
Présentation orale

Mesbahi G. (2018) Les typologies agroécologiques. *Natura 2000 biogeographic seminar*, Parc Naturel Régional des Vosges du Nord, France
Présentation orale

Mesbahi G. (2018) Prairies permanentes : la conservation par la valorisation, exemple du massif vosgien. *Séminaire des Parc Naturels Régionaux : Biodiversité et Gestion de l'Espace*, Eppe-Sauvage, France
Présentation orale

Table des matières

REMERCIEMENTS 4
PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES 7
GLOSSAIRE ET ABREVIATIONS 15
INTRODUCTION GENERALE 19
1. Contexte et enjeux 20
2. Cadre conceptuel 23
2.1. La communauté : une unité d'individus soumis aux mêmes contraintes 24
2.1.1. L'écologie des communautés 24
2.1.2. La théorie des filtres 24
2.1.3. L'écologie fonctionnelle, une application de la théorie des filtres 25
2.2. Echelles pertinentes pour étudier les prairies 26
2.2.1. Echelle de la communauté végétale 26
2.2.2. Echelle de la parcelle agricole 26
2.2.3. Echelle de l'exploitation agricole 27
2.2.4. Echelle du paysage 27
2.2.5. L'échelle de temps 27
2.3. Biens et services écosystémiques, ou propriétés agroécologiques ? 29
2.3.1. Des définitions divergentes entre auteurs 29
2.3.2. Des biens et services écosystémiques aux propriétés agroécologiques 30
2.4. Impacts du milieu et des pratiques sur les propriétés agroécologiques 30
2.4.1. Les propriétés écologiques et environnementales 31
2.4.2. Les propriétés agronomiques 40
2.5. Des compromis à faire entre propriétés prairiales 50
2.6. Des outils de prédiction des propriétés à perfectionner 52
2.6.1. L'estimation des propriétés par les agriculteurs 52
2.6.2. De nombreux outils existent mais restent incomplets 53
2.6.3. Les typologies : des outils simples et polyvalents 54
3. Objectifs, hypothèses et organisation du manuscrit 56
MATERIELS ET METHODES GENERAUX 61
1. Le massif vosgien 62
2. Valorisation de données existantes 64
2.1. Relevés phytosociologiques 64
2.2. Données agronomiques 65
2.3. Modèles climatiques, édaphiques et géologiques 67

3. Travail de terrain 2017-2019 67
3.1. Recensements des types prairiaux à l'échelle du massif vosgien 67
3.1.1. Attribution des types agronomiques, fonctionnels et phytosociologiques 67
3.1.2. Combinaisons entre types phytosociologiques et agronomiques 70
3.1.3. Sélection des combinaisons les plus importantes 71
3.2. Analyse approfondie des types les plus importants 71
3.2.1. Relevés botaniques 72
3.2.2. Analyses fourragères 73
3.2.3. Analyses de sol 74
3.2.4. Activité antioxydante 76
3.3. Pratiques agricoles 77
4. Description des prairies sélectionnées 78
CHAPITRE 1 Liens entre pratiques, milieu, végétation et propriétés agroécologiques 81
Partie 1.A Prédiction de la végétation par le milieu et les pratiques 83
1. Introduction 83
2. Matériels et méthodes 83
2.1. Corrélation entre critères prédictifs 83
2.2. Prédiction des communautés prairiales 83
2.3. Liens entre critères et espèces 84
3. Résultats 84
3.1. Corrélations entre critères prédictifs 84
3.1.1. Corrélations entre critères prédictifs 84
3.1.2. Classifications des prairies selon les critères prédictifs 85
3.2. Sélection des meilleurs critères prédictifs de la végétation 88
3.3. Qualité des prédictions 89
3.4. Liens entre critères sélectionnés et espèces 91
4. Conclusion 93
Partie 1.B Prédiction des propriétés par le milieu, les pratiques et la végétation 94
1. Introduction 94
2. Matériels et méthodes 94
3. Résultats 96
3.1. Sélection des propriétés 96
3.2. Prédiction des propriétés agroécologiques 97
3.3. Corrélations et causalités 99
4. Conclusion 100

CHAPITRE 2 Prédiction des propriétés par les typologies prairiales 101
1. Introduction 103
2. Matériels et méthodes..... 104
2.1. Attribution des types agronomiques, fonctionnels et phytosociologiques 104
2.2. Calculs des propriétés prairiales..... 105
2.3. Analyses statistiques 106
2.3.1. Modélisation de chaque propriété 106
2.3.2. Sélection des meilleurs modèles 108
2.3.3. Identification des modèles de bonnes qualités 108
3. Résultats 108
3.1. Sélection des meilleurs modèles 108
3.2. Identification des modèles fiables 110
4. Conclusion..... 111
CHAPITRE 3 Synergies et antagonismes entre propriétés agroécologiques..... 113
1. Introduction 114
2. Matériels et méthodes..... 114
3. Résultats 116
3.1. Corrélations positives et négatives entre propriétés 116
3.2. Classification et description des classes de propriétés 117
3.3. Prédiction des synergies et compromis 119
4. Conclusion..... 121
CHAPITRE 4 Transmission des savoirs scientifiques aux acteurs de terrain..... 123
1. Des attentes différentes entre acteurs 125
1.1. Quelle définition de la prairie permanente ? 126
1.2. Les attentes agroécologiques des différents acteurs..... 127
1.2.1. Attentes des agriculteurs 127
1.2.2. Attentes des conseillers 129
1.2.3. Confrontation entre les attentes des agriculteurs et des conseillers 131
2. Des outils pour transmettre les savoirs..... 133
2.1. Les typologies de prairies : valorisables seules ?..... 133
2.2. La cartographie : voie d'amélioration des typologies ? 135
2.3. Les suivis « au jour le jour » 136
2.4. Les espèces indicatrices 137
2.5. Les modèles..... 138
2.6. Une part du conseil peut échapper aux conseillers..... 139

3. Conclusion 140
DISCUSSION GENERALE 143
1. Corrélations entre critères prédictifs du milieu et des pratiques 145
2. Une étude qui ne se limite pas au massif vosgien 148
3. La végétation : difficilement prédictible, mais bon prédicteur 149
3.1. Comparaison des prédicteurs 149
3.2. Malgré le nombre élevé de critères, la végétation reste difficile à prédire 151
3.3. La biodiversité : à la fois critère et propriété ? 152
3.4. De nouvelles propriétés difficiles à prédire 154
3.5. Bilan 156
4. Utilisation des typologies seules pour prédire les propriétés agroécologiques 156
4.1. Qualité des prédictions 156
4.2. Les propriétés bien prédites par une seule typologie 158
4.3. Une solution : combiner les typologies ? 158
4.4. Limites de l'étude 160
4.5. Bilan 161
5. Synergies et compromis entre propriétés agroécologiques 161
5.1. Des résultats similaires entre matrice de corrélation et classification 162
5.2. Agronomie et écologie : des propriétés compatibles ? 162
5.3. Les qualités nutritives se cumulent 164
5.4. Les propriétés écologiques scindées en deux classes 164
5.5. Une prédiction fiable des classes de compromis 165
5.6. Bilan 166
6. Comment prédire végétations, propriétés et compromis entre propriétés? 167
6.1. Des critères prédictifs redondants ? 167
6.2. Les pratiques agricoles : des critères peu visibles mais nécessaires 169
6.3. Quel avenir pour les prédicteurs identifiés ? 171
6.3.1. Changement climatique et évolutions des pratiques 171
6.3.2. Propriétés agroécologiques : des méthodes parfois fluctuantes 172
6.4. Un regard critique sur les typologies prairiales 173
6.5. Bilan 174
Conclusion 176
BIBLIOGRAPHIE 179
ANNEXES 208

Table des figures

Figure 1 Principaux filtres abiotiques et interactions biotiques permettant l'implantation d'une communauté locale. D'après Lortie et al. (2004) 25
Figure 2 Exemples de pollinisateurs des prairies permanentes : syrphe (gauche) et abeille (droite) 38
Figure 3 Le thym (Thymus pulegioides), espèce riche en composés phénoliques et antioxydants (Kumar et al., 2015) 45
Figure 4 Le sainfoin (Onobrychis viciifolia), espèce reconnue pour sa teneur en tanins condensés (Arroyo-Lopez et al., 2014) 48
Figure 5 Synergies et antagonismes entre les propriétés prairiales 51
Figure 6 Exemple de typologie de la vie courante 55
Figure 7 Résumé graphique de l'organisation générale de la thèse 59
Figure 8 Carte des limites du massif vosgien et des Parcs Naturels Régionaux 63
Figure 9 Carte d'occupation des sols, d'après la base de données Corine Land Cover (Copernicus, 2018) 63
Figure 10 Zone de validité des typologies agronomiques et phytosociologiques du massif vosgien 66
Figure 11 Localisation des types agronomiques et phytosociologiques observés 69
Figure 12 Répartition des 59 prairies précisément étudiées 72
Figure 13 Quadrat, coupe et pesée de l'herbe 73
Figure 14 Echantillon de sol prélevé à la tarière 75
Figure 15 Graphiques des individus selon l'AFC regroupant toutes les prairies étudiées sur le massif vosgien, et comparaison des richesses spécifiques entre programmes d'étude. 78
Figure 16 Dendrogramme issu de la classification hiérarchique en composantes principales des prairies selon leurs critères du milieu et des pratiques 86
Figure 17 Parts de la présence (A) et de l'abondances (B) des espèces botaniques expliquées par le sol, l'environnement et les pratiques 90
Figure 18 Projections des présences (A) et des abondances (B) des espèces les mieux prédites et des critères sélectionnés 92
Figure 19 Poids d'Akaike et qualité (pseudo-R^2) des 16 modèles basés uniquement sur les typologies agronomique (A), phytosociologique (P) et fonctionnelle (F), leur combinaisons et les modèles nuls. 109
Figure 20 Sélection des meilleurs modèles de bonnes qualités 111
Figure 21 Matrice des corrélations entre propriétés agroécologiques 117
Figure 22 Classification des prairies selon leurs propriétés agroécologiques 118
Figure 23 Résultat de la forêt aléatoire permettant la prédiction des classes de propriétés grâce aux critères sélectionnés 120
Figure 24 Arbre de décision pour la prédiction des classes de synergies et compromis 121
Figure 25 Sièges d'exploitation des 54 agriculteurs ayant répondus à l'enquête 125
Figure 26 Principales définitions de la prairie permanente selon les agriculteurs du massif vosgien 126
Figure 27 Principales attentes exprimées spontanément (A) ou sélectionnées dans une liste (B) par les agriculteurs. 128
Figure 28 Prairie retournée par les sangliers en décembre 2018 129

Figure 29 Réunion d'échange entre conseillers d'horizons variés 130
Figure 30 Pousse de l'herbe en région Grand Est en 2018 et 2019 (Chambre d'agriculture Grand Est, 2020) 137
Figure 31 La rhinanthe et le pissenlit, des indicateurs de sols peu et très fertiles..... 138
Figure 32 Liens entre acidité, teneur en aluminium, altitude et profondeur des sols..... 146
Figure 33 Triangles de texture et pH du sol 146
Figure 34 Sol de transition des Vosges du Nord, composé de sable (rose) en surface et argile (gris) en profondeur..... 147
Figure 35 Exemple de prairie peu diversifiée et dominée par la fétuque rouge..... 148
Figure 36 Prairies appartenant aux classes de compromis 1, 2 et 3 162
Figure 37 Liens entre trois propriétés agroécologiques (valeur pastorale, indice de Shannon, richesse en oligotrophiles) et trois critères des pratiques (date de première utilisation, indice d'Ellenberg pour la fertilité et mode de première utilisation)..... 170

Table des tableaux

Tableau 1 Exemples de services écosystémiques fournis par les prairies permanentes (d'après D'Ottavio et al, 2017) 30
Tableau 2 Comparaison synthétique des protocoles entre typologies..... 66
Tableau 3 Combinaisons entre types phytosociologiques et types agronomiques..... 70
Tableau 4 Nombre d'analyses fourragères en 2018 et 2019 pour chaque utilisation 73
Tableau 5 Détail des analyses fourragères 74
Tableau 6 Description de la vache multipare et des objectifs de production utilisés pour les calculs de production laitière permise 74
Tableau 7 Détail des analyses de sol 76
Tableau 8 Minimums et maximums de descripteurs de la végétation, des pratiques et du milieu, observées sur les 59 prairies étudiées pendant cette thèse 79
Tableau 9 Principaux liens entre critères du milieu, pratiques agricoles et classes de critères 87
Tableau 10 Détail des critères sélectionnés pour la prédiction de la présence et de l'abondance des espèces botaniques 88
Tableau 11 Méthodes de détermination des 12 propriétés agronomiques 95
Tableau 12 Méthodes de détermination des 8 propriétés écologiques..... 96
Tableau 13 Corrélation entre propriétés agronomiques 97
Tableau 14 Corrélations entre propriétés liées à la diversité botanique..... 97
Tableau 15 Prédiction des propriétés agroécologiques par les pratiques, le milieu et la végétation 98
Tableau 16 Synthèse des liens entre principaux effets et propriétés agroécologiques..... 100
Tableau 17 Nombre de prairies attribuées à chaque type phytosociologique, agronomique et fonctionnel..... 105
Tableau 18 Méthodes de détermination des 16 propriétés écologiques, agronomiques et environnementales..... 107
Tableau 19 Méthodes de mesures et calculs des propriétés agroécologiques..... 115
Tableau 20 Liens entre propriétés écologiques et classes de prairies 119

Tableau 21 Comparaison de gradients observés lors de cette thèse et lors de la réalisation de la typologie nationale des prairies permanentes (d'après Michaud et al. 2012b) 149
Tableau 22 Bilan des critères sélectionnés pour la prédiction des communautés, propriétés et classes de compromis 168
Tableau 23 Comparaison des prédictions entre protocoles utilisés..... 169

GLOSSAIRE ET ABREVIATIONS

1. Glossaire (définitions retenues dans ce manuscrit)

Abondance : contribution d'une espèce ou d'un groupe d'espèce à la biomasse (%). Permet d'estimer le bol alimentaire des animaux d'élevage de manière plus précise qu'en utilisant les coefficients d'abondance-dominance basés sur le recouvrement (l'aire occupée par les individus d'une espèce)

Composition botanique : présence et/ou abondance des espèces dans la communauté

Composition floristique : présence d'une espèce ou d'un groupe d'espèce dans la communauté

Critère : variable liée aux pratiques agricoles, au milieu ou à la végétation

Indicateur : espèce ou ensemble d'espèces qui fournit de l'information sur le milieu (humidité, acidité, température, …) et/ou sur les pratiques agricoles (mode d'utilisation, fertilisation, …)

Mode d'utilisation : valorisation de la prairie par la fauche et/ou le pâturage. Sur une saison complète, une prairie peut être fauchée, pâturée, ou un mix des deux.

Propriété : bien ou service rendu par la prairie, grâce à l'écosystème et à l'être humain

Propriété agroécologique : propriété liée à l'agronomie (production fourragère, valeur nutritive, …), à l'écologie (diversité, valeur pour les pollinisateurs, …) et à l'environnement (stock de carbone)

2. Abréviations

°C.j : degrés jours cumulés, depuis le 1er février
ACP : Analyse en Composantes Principales
Al : Aluminium
ANOVA : Analyse de Variance
C/N : ratio Carbone sur Azote
Ca : Calcium
CaO : Oxyde de calcium
CEC : Capacité d'Echange Cationique
Fe : Fer
FEDER : Fonds Européen de Développement Régional
GLM : Modèle Linéaire Généralisé
HCPC : Classification Hiérarchique sur Composantes Principales

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique
INRAE : Institut Nationale de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement
j.UGB/ha : Jours UGB par hectare (chargement)
K : Potassium
K_2O : Oxyde de potassium
Mg : Magnésium
MgO : Oxyde de magnésium
Mn : Manganèse
N : Azote
P : Phosphore
P_2O_5 : Pentoxyde de phosphore
PNR : Parc Naturel Régional
PSE : Paiements pour Services Environnementaux
R^2 : Coefficient de détermination
pR^2 : Pseudo coefficient de détermination
RDA : Analyse de Redondance
SAU : Surface Agricole Utile
SHP : Surface Herbagère Principale
UGB : Unité Gros Bovins
UEL : Unité d'Encombrement Lait
UEB : Unité d'Encombrement Viande
UEM : Unité d'Encombrement Mouton
PDIE : Protéine Digestible dans l'Intestin permises par l'Energie
PDIN : Protéine Digestible dans l'Intestin permises par l'Azote
UFL : Unité Fourragère Lait
UFV : Unité Fourragère Viande

3. Liste des espèces

Code	Genre	Espèce	Nom vernaculaire
Agrcapi	*Agrostis*	*capillaris*	Agrostide commune
Antsylv	*Anthriscus*	*sylvestris*	Cerfeuil sauvage, Anthrisque sauvage
Arrelat	*Arrhenatherum*	*elatius*	Fromental, Avoine élevée
Broerec	*Bromus*	*erectus*	Brome dressé, Brome érigé
Carexsp	*Carex*	sp.	Carex, laîche
Cytscop	*Cytisus*	*scoparius*	Genêt à balais
Daucaro	*Daucus*	*carota*	Carotte sauvage
Fesrubr	*Festuca*	*rubra*	Fétuque rouge
Galsaxa	*Galium*	*saxatile*	Gaillet des rochers, Gaillet du Harz
Hiepilo	*Hieracium*	*pilosella*	Piloselle
Hollana	*Holcus*	*lanatus*	Houlque laineuse
Hypradi	*Hypochaeris*	*radicata*	Porcelle enracinée
Lolpere	*Lolium*	*perenne*	Raygrass anglais

Lotcorn	*Lotus*	*corniculatus*	Lotier corniculé
Planlanc	*Plantago*	*lanceolata*	Plantain lancéolé
Poatriv	*Poa*	*trivialis*	Pâturin commun
Poterec	*Potentilla*	*erecta*	Potentille dressée, Potentille tormentille
Priveri	*Primula*	*veris*	Primevère officinale, Coucou
Ranacri	*Ranunculus*	*acris*	Renoncule âcre, Bouton d'or
Staoffi	*Stachys*	*officinalis*	Épiaire officinale, Bétoine officinale
Taraxsp	*Taraxacum*	sp.	Pissenlit
Triflav	*Trisetum*	*flavescens*	Avoine dorée, Avoine jaunâtre
Triprat	*Trifolium*	*pratense*	Trèfle violet, Trèfle des près
Trirepe	*Trifolium*	*repens*	Trèfle blanc, Trèfle rampant
Vacmyrt	*Vaccinium*	*myrtillus*	Myrtillier

INTRODUCTION GENERALE

1. Contexte et enjeux

Les surfaces en herbe ont une place majeure dans les agrosystèmes à l'échelle mondiale et européenne. Elles recouvrent 52,5 millions de km² dans le monde, dont 600.000 km² dans l'Union Européenne soit 30% de sa surface agricole utile (Eurostat, 2017; Suttie et al., 2005). Elles sont la principale source de fourrage pour les élevages d'herbivores : en France elles produisent à elles seules près de la moitié de la production fourragère (AGRESTE, 2017).

La notion de « prairies permanentes » correspond à travers le monde à des milieux parfois très différents. Elle regroupe savanes, steppes, prairies tempérées de fauche et de pâture, marais et cariçaies, prés-salés, et toutes autres formations végétales principalement herbacées telles que les ourlets et mégaphorbiaies (Ellenberg and Mueller-Dombois, 1966). En Europe, les prairies permanentes sont définies comme des prairies dont la composition botanique (principalement herbacée, parfois en partie ligneuse) n'a pas été complètement détruite dans les dix dernières années par un labour ou des herbicides chimiques (Peeters et al., 2004). En France métropolitaine, les termes utilisés pour nommer les prairies permanentes sont aussi variés : prairie naturelle, prairie semi-naturelle, pré, pâturage, alpage, parcours, … Ils traduisent des points de vue (agriculteurs, scientifiques, administrations, ...), des modes de gestion ou des désignations locales (Plantureux et al., 2012). Tout au long de cette thèse, les prairies permanentes seront définies comme des agrosystèmes principalement herbacés dont la composition botanique est spontanée et diversifiée : les prairies ayant été labourées, retournées, ressemées et/ou sursemées depuis moins de 10 ans en sont donc exclues.

Chaque prairie permanente a une composition botanique unique issue des conditions du milieu et des pratiques agricoles passées et actuelles, et c'est grâce à cette composition botanique spontanée et diversifiée que les prairies permanentes jouent d'importants rôles pour l'alimentation, via la production de fourrage, mais aussi pour l'environnement via l'accueil d'une riche diversité végétale et animale (dont des insectes pollinisateurs), le stockage de carbone, la filtration de l'eau, la prévention des crues et de l'érosion des sols, ou encore la création de paysages ouverts (D'Ottavio et al., 2017).

Malgré ces nombreux points forts, les surfaces de prairies permanentes régressent en Europe et en France depuis les années 70 au profit des cultures et des prairies temporaires, ou sont abandonnées (artificialisation, reforestation). La réduction du nombre d'exploitations agricoles interfère avec la déprise agricole et l'intensification : les exploitations qui s'agrandissent abandonnent les surfaces les plus difficiles à exploiter et/ou les moins productives, abandonnent souvent l'élevage, transforment des prairies en cultures de vente, ou intensifient la gestion des surfaces restantes (Sheeren et al., 2015). Les prairies permanentes restantes sont donc sujettes à une intensification des pratiques agricoles, qui mène à un appauvrissement de la diversité floristique et à une réduction de nombreux services rendus par ces prairies. De plus, les services rendus par les prairies permanentes sont difficiles à identifier simplement, à cause de l'unicité de chaque prairie, pouvant induire une méconnaissance de leurs réelles forces et faiblesses. Cette méconnaissance peut, indirectement, inciter les agriculteurs à modifier leurs prairies diversifiées.

Le massif vosgien est une illustration parfaite de ces processus d'abandon et d'intensification. D'une surface de 7 360 km² dont 18% de SAU, ce massif peu agricole et très forestier est le plus densément peuplé de France (Dobremez and Borg, 2015). Lors de l'industrialisation du 19ième siècle, les paysans ont été convertis en ouvriers-paysans et ouvriers, ce qui a conduit à

une déprise agricole et à l'enfrichement de terres agricoles (Edelblutte, 2003; Guéry, 1962). Le processus s'est ensuite accéléré après la seconde guerre mondiale. A partir de 1950 la fin de l'industrialisation a déplacé les ouvriers vers d'autres bassins de production, induisant la perte de la moitié des exploitations agricoles entre 1955 et 1970 (Nonn, 1979). Dès l'après-guerre, le Fond Forestier National a favorisé un reboisement important du massif, laissant peu de place à l'agriculture. Aujourd'hui, en raison du nombre important d'exploitations viticoles (versant alsacien), moins de 50% des exploitations agricoles du massif vosgien ont une activité d'élevage, mais 75% de la surface agricole utile (SAU) est dédiée à la production de fourrages. Les animaux élevés sont principalement des bovins, 110 200 bovins ont été recensés, dont 70% sont destinés à la production laitière (AGRESTE, 2013). Fromage typique de la région, le Munster trouve son origine dans le massif vosgien. En 2013, 10% des éleveurs laitiers du massif vosgien produisaient du munster fermier, soit environ 580 tonnes annuelles (sur un total d'environ 6800 tonnes, soit 8,5%). La quasi-totalité de ces producteurs commercialisent une part de leurs fromages en circuits courts et 94% pratiquent la vente directe (AGRESTE, 2013). La forte demande de fromages a conduit à une augmentation des cheptels et une augmentation des rendements laitiers par animal, pour pouvoir produire suffisamment de lait. Cette évolution a généré une détérioration de l'autonomie fourragère de nombreuses exploitations, qui ont recherché, souvent sans succès, de nouvelles surfaces fourragères, et qui ont surtout tendance à intensifier leurs pratiques agricoles. Face à cette situation, les acteurs agricoles et naturalistes du massif vosgien souhaitent maintenir les surfaces prairiales existantes, voire les développer, et maintenir la diversité et la qualité des prairies permanentes.

Selon les données collectées par AGRESTE (2020) sur le massif vosgien, la SAU et la Surface Toujours en Herbe (STH) ont légèrement augmenté entre 2000 et 2010 (respectivement +1706 et +1726 ha, soit +1,3% et +2,1%). Les surfaces de prairies temporaires et de maïs ensilage ont augmenté de 721 ha (8,8%) et 332 ha (6,6%), bien que les surfaces en prairies artificielles aient fortement diminuées de 137 ha (-34,6%). Cependant, les acteurs agricoles et naturalistes du massif vosgien contredisent les chiffres précédents et observent généralement une diminution des surfaces en prairies permanentes : il semble donc qu'il y ait à l'échelle du massif une perte des prairies permanentes anciennes et fortement diversifiées, compensée par la réouverture paysagère et/ou l'inclusion de surfaces qui n'étaient jusqu'alors pas déclarées (artefact administratif).

Aujourd'hui, beaucoup d'agriculteurs ont une image négative des prairies permanentes : production et qualité insuffisantes et trop aléatoires d'une année sur l'autre en sont les principaux arguments (Frappat et al., 2012). Cette image négative est favorisée par le manque de connaissances à propos des propriétés agroécologiques des prairies permanentes, de leurs interactions et de leurs déterminants (Michaud et al., 2015). De plus, le changement climatique induit des saisons estivales de plus en plus sèches et chaudes, qui limitent la production des prairies permanentes. En réponse, les agriculteurs ont tendance à exploiter plus précocement leurs prairies afin de pouvoir les récolter une à deux fois avant l'été, dégradant leur qualité écologique. Quand ils le peuvent, certains agriculteurs convertissent les prairies permanentes en prairies temporaires ou en maïs ensilage, dont ils estiment les rendements plus fiables face aux aléas climatiques. Enfin, les industries agroalimentaires demandent aujourd'hui aux agriculteurs de fournir du lait et de la viande en quantité, avec une qualité minimale basée principalement sur les taux de matières grasses et/ou de protéines. Or, les prairies permanentes diversifiées offrent aussi des avantages gustatifs qui ne sont pas pris en compte dans les prix des produits.

Face à cette situation, les structures en charge du conseil agricole et environnemental doivent communiquer avec les agriculteurs et mieux leur montrer les avantages qu'ils peuvent tirer de ces prairies.

La flore du massif vosgien est étudiée depuis le 19ième siècle (Walter, 1926). En 1977, les agronomes se sont intéressés aux relations entre pratiques agricoles et paysages, mais aussi à leur évolution grâce à un suivi sur 30 ans (Brossier et al., 2008, 1995; INRA-ENSSAA, 1977). Ils ont en particulier pu mettre en avant le maintien de paysages ouverts malgré la déprise agricole prévue, grâce au développement du tourisme vert. A partir des années 2000, ont été développées trois typologies prairiales (deux typologies « agronomiques » et une typologie « phytosociologique) : Le Parc Naturel Régional des Ballons des Vosges, le Parc Naturel Régional des Vosges du Nord, la Communauté de Communes de la Vallée de la Bruche et la Communauté de Commune de la Vallée de Villé, avec l'appui scientifique de l'université de Lorraine et de INRAE, ont développé deux typologies agronomiques, l'une pour le sud du massif (Collectif, 2006) et l'autre pour le nord du massif (Bayeur et al., 2013). Ces typologies ont eu pour objectif premier d'estimer les rendements et la qualité fourragère des prairies en fonction de leur composition botanique et de leur gestion. A partir de 2015, les Conservatoires Botaniques associés aux acteurs précédemment cités ont développé un référentiel phytosociologique (Ferrez et al., 2017), dont l'objectif premier était la caractérisation des associations végétales et l'évaluation de leur état de conservation. Ces trois travaux répondent à des besoins spécifiques, agronomiques ou naturalistes, alors que les enjeux actuels autours des prairies permanentes nécessitent de considérer en même temps ces deux problématiques. De plus, les typologies agronomiques actuelles ne couvrent pas l'ensemble du territoire du massif, et les différentes typologies développées ne prennent pas en compte les nouveaux enjeux tels que la valeur économique des prairies, le stockage de carbone, les propriétés organoleptiques des produits animaux ou encore la santé animale.

C'est dans ce cadre qu'en 2016 un nouveau programme a été initié, porté par le Parc Naturel Régional des Vosges du Nord, en collaboration avec l'Université de Lorraine, INRAE, le Parc Naturel Régional des Ballons des Vosges, la Communauté de Communes de la Vallée de la Bruche et la Communauté de Communes de la Vallée de Villé. Ce programme est financé par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, l'Union Européenne via le FEDER, le Commissariat de Massif des Vosges et la Région Grand-Est. Il a permis le lancement de la présente thèse de doctorat dès janvier 2017, dont l'objectif est d'améliorer les connaissances sur les prairies du massif vosgien avant de développer des outils permettant de mieux conseiller les agriculteurs à la fois sur le plan agronomique et écologique, et endiguer le déclin des prairies permanentes.

Pour cela, de nouvelles connaissances scientifiques sont nécessaires afin d'identifier les déterminants des propriétés agronomiques et écologiques (ensuite dénommées agroécologiques) des prairies. Le premier objectif de cette thèse est d'améliorer la prédiction des propriétés agroécologiques, et de comprendre comment atteindre un niveau jugé satisfaisant de ces propriétés. Dans cette thèse, je cherche donc à comprendre comment le milieu et les pratiques agricoles affectent la végétation des prairies permanentes du massif vosgien, puis comment végétation, milieu et pratiques influent sur les propriétés agroécologiques de la prairie. Le second objectif est de mieux comprendre et prédire les compromis entre ces propriétés, afin de savoir s'il est possible de concilier valeur agronomique et valeur écologique sur une même prairie.

Les résultats mis en avant dans cette thèse seront ensuite valorisés pour répondre aux attentes des agriculteurs et de leurs conseillers agricoles et écologues. Pour cela, une typologie des prairies sera créée, et les conseillers pourront s'appuyer sur les nouvelles connaissances scientifiques afin d'aider les agriculteurs dans leurs choix de gestion.

Sur le plan scientifique, le massif vosgien est un cas d'étude intéressant pour répondre à ces questions. Le climat et le sol varient fortement à travers le massif, il est donc possible de trouver des milieux très différents sur une petite échelle. De même, le massif accueille une grande diversité d'exploitations agricoles, créant des gradients d'utilisation des prairies et d'intensification des pratiques agricoles. Ce travail s'appuie sur des données acquises depuis une quinzaine d'années sur les prairies permanentes du massif vosgien. J'ai interprété ces données historiques, que j'ai ensuite complétées pendant mon travail de thèse grâce au suivi pluriannuel d'un échantillon de prairies, et une série d'enquêtes auprès des exploitants agricoles. Pour cela, j'ai créé un réseau en deux temps : 150 prairies permanentes ont été observées en 2017, puis un suivi expérimental a été réalisé sur 59 de ces prairies en 2018 et 2019 afin d'étudier précisément leurs propriétés agronomiques et écologiques.

2. Cadre conceptuel

Les prairies permanentes présentent à la fois des intérêts agronomiques et écologiques. Elles sont donc étudiées à la fois par l'agronomie et l'écologie, mais ces deux disciplines posent souvent des regards très différents sur une même prairie (Plantureux et al., 2019; Theau et al., 2019).

Les écologues, dont les phytosociologues, cherchent principalement à caractériser les communautés végétales et évaluer leur état de conservation, mais aussi à comprendre les liens entre critères du milieu (climat, sol) et des pratiques agricoles et la composition botanique. Ils réalisent des relevés botaniques aussi exhaustifs que possible, à l'échelle d'une communauté végétale homogène (notion de station floristique), et s'intéressent principalement à la présence d'espèces et à une abondance simplifiée estimée par les coefficients de Braun-Blanquet. Les agronomes étudient aussi les communautés végétales, souvent à l'échelle de la parcelle agricole associant plusieurs communautés, mais dans le but premier d'évaluer l'impact des pratiques agricoles (fertilisation, intensification, type d'utilisation) sur la quantité et la qualité du fourrage. Ici, connaitre précisément l'abondance de chaque espèce est nécessaire, afin de pouvoir estimer le bol alimentaire des animaux. Souvent, seules les espèces représentant 80% de l'abondance totale sont étudiées, mais les études récentes montrent que les espèces dont l'abondance est faible jouent tout de même un rôle important dans l'appétence du fourrage et les propriétés organoleptiques des laits, fromages et viandes (Diquélou et al., 2003).

Depuis les années 1990, une nouvelle approche s'est développée : l'écologie fonctionnelle. L'écologie fonctionnelle ne s'intéresse pas à l'identité taxonomique des espèces, mais regroupe les espèces selon leurs caractéristiques fonctionnelles : réponse à leur environnement, propriétés. Ces fonctions sont évaluées grâce à des traits fonctionnels, c'est-à-dire des caractéristiques physiques de la plante (hauteur, date de floraison, surface foliaire spécifique, …) (Violle et al., 2007). Ces traits peuvent être utilisés pour prédire des propriétés fourragères classiques comme le rendement et la valeur nutritive, mais aussi la temporalité de production (moment du pic de biomasse), la souplesse d'exploitation (vitesse de perte de qualité

du fourrage) et la saisonnalité de la production (régularité de la distribution de la production au cours de l'année) (Ansquer et al., 2009b).

Les paragraphes suivants font un état des lieux de la littérature scientifique et technique existante sur les concepts mobilisés pour la présente thèse. Ils se concentrent tout d'abord sur les notions théoriques de l'écologie et la définition des propriétés agroécologiques. Ensuite, ils présenteront les principaux effets des pratiques agricoles et du milieu sur les propriétés agroécologiques en vue de leur prédiction, avant de chercher à connaitre les synergies et antagonismes existants entre ces propriétés. Ils soulèveront ensuite la question de la transmission des savoirs scientifiques aux acteurs de terrain. Enfin, je présenterai les problématiques et hypothèses traitées dans cette thèse.

2.1. La communauté : une unité d'individus soumis aux mêmes contraintes

Les propriétés agroécologiques des prairies peuvent être prédites par la végétation. Cependant, le fonctionnement des individus et des populations ne suffit pas, il est donc nécessaire de s'intéresser au fonctionnement des communautés végétales.

2.1.1. L'écologie des communautés

En écologie, une communauté est un ensemble d'espèces subissant les mêmes contraintes environnementales.

L'écologie des communautés permet non seulement l'étude des interactions entre les espèces, mais aussi l'étude des processus qui façonnent les populations et les dynamiques d'habitats et de ressources (Palmer et al., 1997). Il existe de nombreux débats sur la possibilité de considérer une communauté comme une unité continue, clairement définie : telle un individu unique. Le débat ne sera pas creusé dans cette thèse, où les différentes études se concentrent majoritairement à l'échelle de la communauté.

Les phytosociologues sont spécialisés dans l'étude des communautés végétales. Leur travail consiste principalement à la classification des communautés semblables au sein de types phytosociologiques appelés « syntaxa », afin d'évaluer l'état de conservation et établir des liens entre habitats et communautés.

2.1.2. La théorie des filtres

Les espèces composant une communauté prairiale sont le résultat de multiples processus sélectifs, à deux échelles différentes.

Tout d'abord, un pool global d'espèces est disponible, découlant de processus à grande échelle tels que la spéciation, la migration et la dispersion des espèces (Zobel, 1997). Ce pool contient toutes les espèces potentielles. Mais toutes les espèces ne peuvent pas s'installer, survivre et se reproduire dans n'importe quel milieu : des filtres environnementaux abiotiques, naturels et anthropiques interviennent à l'échelle locale (Pärtel et al., 1996), ainsi que des effets biotiques tels que compétition et facilitation entre plantes ou herbivorie (Lortie et al., 2004). Dans les prairies, et dans les autres milieux semi-naturels comme les forêts, ces filtres sont liés au milieu (température, pluviométrie, type et profondeur du sol), aux pratiques agricoles (fertilisation, travail du sol, drainage, …) et à la faune sauvage et d'élevage.

Cependant, cette théorie soulève des critiques (Cadotte and Tucker, 2017). De nombreuses études omettent les facteurs biotiques. Pourtant, la compétition entre les espèces (Mayfield and

Levine, 2010) structure les communautés : deux espèces dont la niche et la fitness (les vitesses de croissance, de développement et de reproduction) sont similaires pourront vivre côte à côte, mais si ces deux espèces ont des fitness différentes alors l'une dominera, bien que les deux espèces soient dans un milieu favorable (Scheffer and van Nes, 2006). De même, deux espèces peu adaptées à un milieu pourront survivre (Scheffer and van Nes, 2006). De plus, la théorie des filtres ne prend pas en compte l'effet cumulé des facteurs abiotiques et biotique, dont le rôle sur la structuration des communautés végétales est désormais démontré (Thomson et al., 1996). Enfin, les espèces qui survivent aux contraintes d'un milieu mais ne peuvent pas se reproduire posent question : elles apparaissent donc dans les relevés floristiques, mais il n'est pas possible d'affirmer que le milieu leur convient.

La théorie des filtres est donc intéressante et utile à la prédiction des présences et abondances des espèces, mais son cadre d'utilisation dépasse généralement sa définition stricte. Elle permet malgré ses limites d'éclairer les liens entre pratiques agricoles, milieux naturels et végétation, mais elle est plus explicative de l'absence que de la présence d'espèces (Kraft et al., 2015).

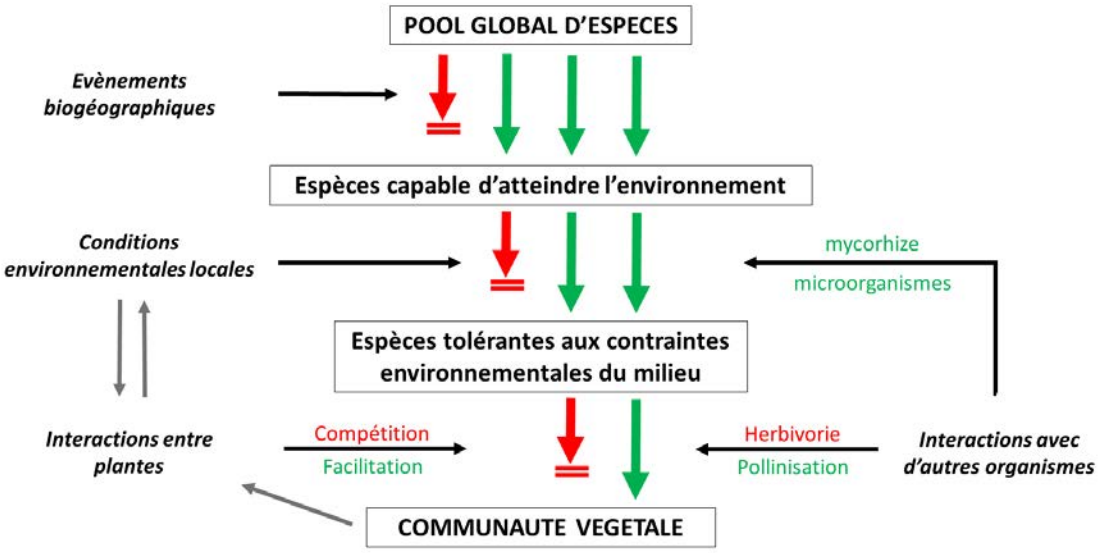


Figure 1 Principaux filtres abiotiques et interactions biotiques permettant l'implantation d'une communauté locale. D'après Lortie et al. (2004)

Les interactions biotiques peuvent aider à l'implantation d'espèces (vert) ou au contraire l'empêcher (rouge).

2.1.3. L'écologie fonctionnelle, une application de la théorie des filtres

L'écologie fonctionnelle, qui s'intéresse à l'impact du milieu sur les traits fonctionnels d'une communauté, est basée sur la théorie des filtres (Kraft et al., 2015).

L'écologie fonctionnelle n'étudie pas les plantes selon leur identité taxonomique, mais selon des traits fonctionnels. La notion de trait fonctionnel recouvre toute caractéristique morphologique, physiologique ou phénologique, mesurable au niveau d'un individu, impactant indirectement une des composantes de la croissance, de la reproduction ou de la survie (Violle et al., 2007). Il est possible de différencier les « traits de réponses » des « traits d'effets » : ces premiers permettent d'expliquer la réponse de la communauté végétale aux contraintes environnementales (climat, pratiques agricoles, …) alors que les seconds permettent de prédire

l'impact de la communauté sur son écosystème (service de pollinisation, rendement, stockage du carbone, …) (Lavorel and Garnier, 2002).

Cette approche, plus récente, permet de mieux évaluer les interactions entre les organismes et leur environnement (Garnier and Navas, 2012). Elle semble donc pertinente pour évaluer l'impact du milieu (climat, sol) et des pratiques agricoles sur la végétation, mais aussi l'impact de la végétation sur les propriétés prairiales agronomiques et écologiques.

L'étude des traits fonctionnels permet de comparer les communautés végétales entre-elles, car la variabilité est plus forte entre les communautés, qu'au sein des communautés (Firn et al., 2019). De plus, mesurer une combinaison de plusieurs traits (un *syndrome* de traits) de quelques espèces ciblées peut suffire à estimer les traits de la population entière (Ansquer et al., 2009b).

2.2. Echelles pertinentes pour étudier les prairies

L'étude de la végétation par les écologues se fait généralement à l'échelle de la communauté végétale, alors que les agriculteurs s'intéressent au rendement ou à la qualité fourragère de la parcelle, qui représente généralement pour eux l'unité de gestion. La question de l'échelle est donc importante à définir, car elle doit permettre de répondre aux attentes de tous.

2.2.1. Echelle de la communauté végétale

La communauté est un ensemble d'espèces, subissant les mêmes contraintes environnementales. Cette unité de surface est principalement utilisée par les écologues, car elle permet d'étudier facilement l'impact de l'environnement sur les espèces, et les interactions entre espèces. Enfin, sa faible surface (souvent quelques dizaines de mètres carrés en milieu prairial) permet des relevés botaniques rapides.

La phytosociologie, développée depuis le début du XXème siècle, a pour objectif de rassembler les prairies ayant des compositions similaires, puis de décrire et comprendre ces associations (Dengler et al., 2008; Gillet et al., 1991). Elle utilise cette échelle pour la créer des typologies prairiales : la communauté est l'unité de base de la phytosociologie, une parcelle agricole peut donc être découpée en plusieurs types phytosociologiques.

2.2.2. Echelle de la parcelle agricole

La parcelle est une unité peu utilisée en écologie prairiale, car les contraintes environnementales peuvent y être hétérogènes et donc induire des compositions floristiques différentes et donc des stations différentes. Par exemple, l'humidité ou la texture du sol diffèrent avec l'inclinaison de la parcelle ou la proximité d'un cours d'eau. La parcelle peut tout de même être étudiée par les écologues pour évaluer la capacité des pratiques agricoles ou de l'hétérogénéité du milieu à créer ou maintenir des mosaïques de communautés végétales (Klimek et al., 2008).

Cependant, cette échelle est celle utilisée par les agriculteurs : les pratiques y sont souvent homogènes, et les agriculteurs connaissent souvent le potentiel quantitatif et qualitatif de leurs parcelles de prairie. C'est pour cela que les outils destinés au conseil ou à l'échange avec les agriculteurs sont souvent adaptés à l'échelle de la parcelle.

Les typologies agronomiques des prairies sont généralement construites à l'échelle de la communauté végétale dominante, dans l'objectif de produire des références cohérentes sur la valeur d'un type de végétation. Cependant, afin de répondre aux attentes de l'agriculteur, les données sont extrapolées à la parcelle dans son ensemble.

2.2.3. Echelle de l'exploitation agricole

L'exploitation agricole est peu utilisée en écologie. Cette échelle est principalement utilisée, comme l'échelle de la parcelle, pour échanger avec les agriculteurs et les décideurs politiques. Cependant, elle peut être utilisée par les écologues pour étudier les mosaïques agricoles. En Irlande les exploitations agricoles à Haute Valeur Naturelle ont été classifiées, afin de définir les milieux et la biodiversité qu'elles recouvrent (Sullivan et al., 2017), et donc mettre en place des recommandations d'usage.

L'exploitation agricole est aussi pour l'agriculteur une échelle de référence, car c'est à cette échelle que sont réfléchis le système d'élevage et de culture, le système fourrager, et que sont établis les bilans économiques.

2.2.4. Echelle du paysage

L'échelle paysagère n'est pas clairement définie : elle prend en compte les différents éléments au-delà de la parcelle tels que la mosaïque parcellaire, les haies, les routes, les constructions, etc… mais n'est pas limitée géographiquement.

Depuis le milieu du XXème siècle de plus en plus d'études écologiques s'intéressent à cette échelle, qui permet principalement de prendre en compte l'effet du milieu sur la richesse et la diversité des espèces. Par exemple, cette échelle a permis de montrer que la perte d'habitat à grande échelle induit une perte de biodiversité (Staude et al., 2017), que l'impact positif des Mesures Agro-Environnementales (MAE) est fortement dépendant de la proportion de milieux semi-naturels dans le paysage (Concepción et al., 2012), ou encore que la richesse et l'abondance de pollinisateur est dépendante de la présence de forêts (Griffin et al., 2017).

Cependant, cette échelle permet difficilement d'étudier l'impact des pratiques agricoles, car il serait alors nécessaire de connaitre les pratiques pour chaque parcelle de la zone d'étude, et non seulement de la parcelle étudiée. L'étude de l'effet du milieu sur la composition taxonomique ou fonctionnelle de la zone d'étude serait assez peu précise, car les variables environnementales peuvent être très différentes sur de petites unités de surface, en particulier les variables édaphiques.

Enfin, il existe souvent des autocorrélations paysagères (Dormann, 2007). Par exemple, dans un massif montagneux on peut s'attendre à des paysages plus urbains et cultivés à basse altitude, et une présence plus forte de prairies permanentes, de landes et de forêt de résineux à haute altitude. Il est donc difficile de différencier l'impact du paysage de l'impact de l'altitude.

2.2.5. L'échelle de temps

La végétation évolue au cours d'une année en terme de composition botanique mais aussi de phénologie. Ces évolutions induisent des variations intra-annuelles de rendement, de digestibilité, de teneur en protéines ou en acides gras du fourrage (Michaud et al., 2012a; Pontes et al., 2007a; Revello-Chion et al., 2011).

De plus, les années ayant des conditions climatiques différentes les unes des autres, les abondances de formes de vie et de traits fonctionnelles sont significativement différentes d'une année à l'autre (Andueza et al., 2010), ainsi que les rendements et qualité fourragères (Chapman et al., 2013; Vázquez-de-Aldana et al., 2008). Ces variations interannuelles ont un faible impact sur la richesse spécifique et fonctionnelle, mais affectent fortement les biomasses : elles sont donc particulièrement importantes à prendre en compte pour les agriculteurs et agronomes pour estimer les productions sur le cours terme (une année).

La présence et l'abondance des espèces évoluent tout de même sous l'impact du changement climatique, naturel ou anthropique (Pérez-Obiol et al., 2011). Cependant, un changement climatique lent permet aux plantes de s'adapter, alors que des évènements climatiques extrêmes sur quelques jours peuvent avoir autant d'impact sur la végétation que plusieurs années de changement climatique progressif (Jentsch et al., 2009). Ces évènements (sécheresses ou à l'inverse fortes précipitations) sont donc à surveiller car ils peuvent rapidement modifier la composition botanique et les performances agronomiques potentielles des prairies sur le long terme.

Les prairies étant dans la majorité des cas maintenues par les agriculteurs, leurs compositions et performances agricoles peuvent évoluer si l'agriculteur change ses pratiques. Le suivi de l'évolution d'une prairie nécessite donc de s'assurer que les pratiques sont constantes si l'on souhaite étudier l'effet du changement climatique, mais de prendre en compte à la fois les pratiques et le changement climatique si l'on souhaite étudier l'effet d'un changement de pratiques. La richesse spécifique diminue rapidement sous l'impact de la fertilisation, mais à l'inverse la végétation d'une prairie subitement peu fertilisée peu mettre plusieurs dizaines d'année à retrouver un bon état de conservation (Willems and Nieuwstadt, 1996).

Enfin, l'effet du long terme sur les communautés végétales est encore méconnu. Le déplacement des lisières entre prairies et forêts entre 1830 et aujourd'hui affecte la composition botanique des espèces prairiales (Burst et al., 2017) et les prairies de plus de 300 ans sont plus diversifiées que les prairies récentes (Cousins, 2009). Enfin, il est aussi possible d'observer des effets beaucoup plus anciens, puisque la richesse des prairies est dépendante de l'occupation du territoire lors de l'âge du fer, entre 1800 et 500 av. J.-C. (Bruun et al., 2001). Cependant, l'effet de l'historique des occupations est faible, par rapport à celui des usages actuels.

Cette thèse s'intéresse aux prairies permanentes, principalement à l'échelle de la communauté végétale, qui m'a semblé être la meilleure échelle pour évaluer et prédire les propriétés des prairies puis conseiller les agriculteurs. Il est important de noter qu'il peut exister plusieurs communautés sur une parcelle agricole, liées par exemple à un gradient d'humidité (bas de la parcelle proche d'un cours d'eau) ou à des différences de sol (sol superficiel en haut de la prairie). Sur le terrain, les communautés sont délimitées en fonction des « faciès » : des zones de végétation de même aspect physionomique (même hauteur, couleurs et espèces dominantes). Les agronomes s'intéressent généralement au faciès dominant (ou principale station floristique), celui dont la surface est la plus importante, afin d'être le plus représentatif possible de la parcelle en n'étudiant qu'une partie.

Enfin, pendant cette thèse un seul relevé botanique a été réalisé par prairie, et les observations de rendement et de qualité fourragère ont été réalisées sur deux années. En raison des conditions climatiques particulières des étés 2018 et 2019, seule la pousse de printemps est analysée car trop peu de prairies ont pu être exploitées par les agriculteurs au cours de l'été et de l'automne.

2.3. Biens et services écosystémiques, ou propriétés agroécologiques ?

La définition des biens et services écosystémiques n'est pas encore établie, elle évolue entre auteurs au fur et à mesure des nouvelles connaissances. Cette évolution régulière ne permet généralement pas une bonne compréhension du concept de « biens et services écosystémiques » par le grand public (Lamarque et al., 2011).

2.3.1. Des définitions divergentes entre auteurs

Les services écosystémiques ont été définis par l'ONU comme les bénéfices que les humains retirent des écosystèmes (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Les « biens » peuvent être différenciés des « services », les premiers étant matériels (eau, nourriture, fibres, …) et les seconds immatériels (régulation du climat, cycle des nutriments, bien-être spirituel, …), mais cette différentiation n'est pas unanimement acceptée dans la littérature scientifique (Wallace, 2007). L'EFESE (Evaluation Française et Ecosystèmes et Services Ecosystémiques) distingue les avantages socio-économiques retirés par l'Homme des services qui correspondent aux fonctions écologiques et aux états des écosystèmes (Commissariat général au développement durable, 2016). Les fonctions écologiques sont des ensembles de phénomènes propres à l'écosystème (des variables d'état, des éléments de structure des écosystèmes ou des processus écologiques). Un service écosystémique peut donc être décrit par un avantage (MEA) ou par une fonction écologique (EFESE), mais c'est bien la mise en relation entre ces deux éléments qui caractérise le service.

Pour le MEA, les services écosystémiques peuvent être classés en 4 grands types : support, approvisionnement, régulation et culturel (Tableau 1). Cependant, des critiques ont été faites sur cette définition du MEA, en soulignant notamment un point de vue trop anthropocentré ou l'absence de différenciation entre les moyens et les finalités (Boyd and Banzhaf, 2007). D'autres classifications des services ont ainsi été proposées, pour répondre à des problématiques variées : une meilleure évaluation économique des services écosystémiques (Boyd and Banzhaf, 2007), une meilleure évaluation à l'échelle du paysage (Wallace, 2007), ou une meilleure prise en compte des besoins des décideurs (Fisher et al., 2009). De plus, la quantité de services fournis par l'écosystème n'est pas proportionnelle à la biodiversité présente. Il est nécessaire de mettre en avant les compromis entre services : une forêt diversifiée peut produire des baies et du bois, mais une augmentation de la production de bois se fera au détriment des arbustes à baies, et donc de la biodiversité et du service d'approvisionnement de nourriture (Slade et al., 2019).

Il est parfois difficile de différencier la part d'un service due à l'écosystème de celle due à l'être humain. Par exemple, la production de biomasse végétale par une prairie est partiellement due à l'écosystème (précipitation, rayonnement solaire, cycle des nutriments du sol, …) mais aussi à l'humain (fertilisation minérale apportée, gestion de la densité de pâturage, gestion des refus, …). Dans la vision d'EFESE, seule la partie du fonctionnement liée à l'écosystème est retenue comme service écosystémiques.

Enfin, certaines notions sont considérées ou pas comme service écosystémique, selon les chercheurs impliqués. Selon l'EFESE, les services de supports proposés par le MEA (Tableau 1) sont considérés comme des fonctions écologiques, et non comme des services écosystémiques (Commissariat général au développement durable, 2016). La biodiversité est donc considérée comme un déterminant biophysique des services écosystémiques, et non comme un service en tant que tel (INRA, 2017).

Tableau 1 Exemples de services écosystémiques fournis par les prairies permanentes (d'après D'Ottavio et al, 2017)

Les services sont classés en quatre types selon le MEA (2005). Les services en gras ont été étudiés lors de cette thèse.

	Services	Description
Support	**Production primaire**	**Amélioration de la croissance des végétaux**
	Maintien de la fertilité du sol	**Cycle des nutriments**
	Habitat :	
	Maintien du cycle de la vie	**Habitat pour les espèces**
	Connectivité	Dispersion des graines
	Diversité génétique	Conservation génétique
Approvisionnement	**Nourriture**	**Viande, lait,** laine, cuire, miel, …
	Fertilisant	Lisier et fumier pour fertilisation
	Ressources médicinales	Produits biochimiques
	Energie	Méthane pour énergie
Régulation	**Conversion de nourriture non consommable par l'humain**	**Consommation de végétaux**, recyclage des résidus de culture
	Pollinisation	Rendement, qualité des graines, diversité génétique
	Régulation du climat	**Séquestration du carbone**
	Prévention contre l'érosion des sols	Maintien de la couverture du sol
	Régulation de l'écoulement des eaux	Drainage naturel, prévention des inondations
Culturel	Opportunités de loisirs	Eco-tourisme, sport, spectacles, ….
	Valeur éducative	Transmission des savoirs sur la gestion des prairies et des troupeaux
	Héritage culturel	Présence de races locales, identité culturelle

2.3.2. Des biens et services écosystémiques aux propriétés agroécologiques

Les prairies permanentes fournissent de nombreux services écosystémiques (D'Ottavio et al., 2017), **mais la définition de ces services étant sujette à débat, j'utiliserai le terme de « propriétés agroécologiques » tout au long de ce manuscrit pour simplifier les définitions et limiter les débats**.

La biodiversité est désormais considérée comme un état de l'écosystème plus que comme un service. J'ai souhaité l'intégrer parmi les « propriétés » car face aux enjeux globaux de diminution de la biodiversité, il est important de comprendre comment le milieu et les pratiques agricoles l'impactent. De plus, cette thèse à une finalité technique qui se traduit par la création d'outils d'aide à la médiation, utilisables par les agriculteurs et leurs conseillers agronomes et écologues. Il est donc judicieux de caractériser les prairies par des indicateurs écologiques (richesse spécifique, indices de Shannon et de Simpson, richesse en espèces patrimoniales) facilement accessibles, et de montrer l'impact de l'intensification des pratiques sur la biodiversité.

2.4. Impacts du milieu et des pratiques sur les propriétés agroécologiques

Le milieu (sol, climat, topographie) et les pratiques agricoles façonnent les communautés végétales. L'objectif de cette thèse n'est pas de prédire seulement la composition botanique mais surtout les propriétés agroécologiques des prairies permanentes. Nous passerons en revue

dans cette partie les principales connaissances existantes à propos de l'impact du milieu et des pratiques agricoles sur la composition botanique et les propriétés prairiales.

2.4.1. Les propriétés écologiques et environnementales

A. La diversité botanique

Les différents aspects de la diversité

Les études sur la diversité botanique se sont principalement intéressées à la richesse spécifique, pourtant cette valeur peut être très variable entre des prairies similaires (Brunbjerg et al., 2018). De plus, la richesse spécifique peut difficilement être reliée au rôle fonctionnel de la biodiversité : les propriétés agroécologiques sont souvent plus liées à l'abondance des espèces qu'à leur richesse (Le Roux et al., 2008). C'est pourquoi, de nombreuses études se concentrent désormais sur des indices de biodiversité, tels que les nombres de Hill : richesse taxonomique N0, diversité de Shannon N1 et diversité inverse de Simpson N2, qui prennent en compte l'abondance des espèces en plus de leur présence (Bello et al., 2010; Mauchamp et al., 2014).

Depuis les années 90, les écologues s'intéressent à la diversité fonctionnelle des prairies permanentes (par exemple: Lavorel and Garnier, 2002; Mouillot et al., 2013; Violle et al., 2007). Les communautés végétales peuvent ainsi être comparées selon la moyenne de chaque trait fonctionnel, pondérée par l'abondance des espèces (*Community Weighted Mean*) (Lavorel et al., 2007), ou selon divers indices de diversité fonctionnelle tels que ceux proposés par Petchey (2002) ou l'entropie quadratique de Rao (Botta-Dukát, 2005). Sur un principe similaire, les espèces des prairies peuvent être divisées en trois formes de vie :

- les herbes sont les espèces monocotylédones des familles Cyperaceae, Juncaceae, Liliaceae et surtout des Poaceae. Les Poaceaes (ou graminées) en particulier jouent un rôle important dans la ration alimentaire des animaux en apportant énergie et protéines
- les légumineuses (ou Fabaceae) regroupent les espèces capables de fixer l'azote atmosphérique grâce à des symbioses avec des bactéries hébergées dans les nodules racinaires. Ces plantes sont importantes car elles sont riches en protéines
- les diverses sont toutes les autres espèces dicotylédones. Ces plantes sont d'une importance moindre dans l'équilibre des rations alimentaires, mais jouent sur l'appétence du fourrage pour les animaux, sur leur santé, et sur la qualité des produits animaux (lait, fromages, viande) (ex : Farruggia et al., 2008).

Toutes les espèces botaniques n'ont pas le même intérêt écologique : les espèces rares et/ou menacées sont considérées comme les espèce à protéger prioritairement. De plus, la richesse en espèces rares d'une prairie n'est pas forcément corrélée à la richesse totale (Pykälä et al., 2005), il est donc intéressant d'étudier spécifiquement ces espèces rares. Les espèces oligotrophiles sont des espèces sensibles à la fertilité du sol et donc à l'intensification des pratiques agricoles (Muller, 2002). Leur présence est donc souvent liée à des pratiques extensives (parfois appelées « traditionnelles »), plus respectueuse de l'environnement : leurs richesse et abondance peuvent être utilisées comme un proxy de la qualité écologique de la communauté.

Enfin, l'étude de la diversité ne se limite pas à la diversité taxonomique et fonctionnelle : la phytosociologie étudie directement les communautés ayant des compositions similaires (Dengler et al., 2008). Il existe ainsi des types prairiaux aux propriétés différentes, mais aussi des types rares et d'autres plus communs (Ferrez et al., 2017).

La conservation des prairies permanentes permet non seulement de protéger les espèces botaniques, mais aussi de nombreuses espèces animales. La diversité floristique (taxonomique, fonctionnelle et phytosociologique) des prairies influence par exemple l'abondance et la diversité d'oiseaux, d'araignées et de pollinisateur (Berg and Gustafson, 2007; Kovács-Hostyánszki et al., 2013).

Impact du climat sur la composition botanique

L'évolution constante du climat à des échelles de temps géologiques a modifié la répartition des espèces végétales, et permis la création de nouvelles espèces (spéciation). Ces changements climatiques se sont exprimés à travers les températures, la pluviométrie ou plus directement par des variations de surfaces de sol dues à l'avancée des glaciers et océans (Bernal et al., 2019; Miller et al., 2008; Pérez-Obiol et al., 2011; Tinner and Lotter, 2001). En plus de la diversité taxonomique, ces changements climatiques ont impacté les traits fonctionnels des communautés végétales (Sande et al., 2019).

A des échelles de temps plus courtes, quelques années, le climat impacte aussi la composition botanique des prairies (van Oijen et al., 2018). Les gradients d'humidité sélectionnent des communautés végétales (Critchley et al., 2002; Stampfli and Zeiter, 2004; Wang et al., 2007) et modifient leurs traits fonctionnels (Breshears and Barnes, 1999; Kessler et al., 2007; Sellin et al., 2013). Par exemple, la richesse spécifique et l'indice de diversité de Shannon sont positivement corrélés à la pluviométrie (Serafini et al., 2019; Wang et al., 2019).

L'altitude est souvent utilisée en écologie comme une variable climatique. En effet, elle est corrélée à la température, à l'humidité ou encore à la fertilité des sols (de Almeida Campos Cordeiro and Neri, 2019; Pittarello et al., 2018; Sevruk, 1997; Wang et al., 2019), mais aussi à de nombreux paramètres physiques tels que la pression atmosphérique, le rayonnement solaire, l'évapotranspiration, etc… (Körner, 2007). Discerner l'impact de chacune de ces variables nécessite donc des protocoles complexes et de nombreuses données difficiles à obtenir.

De manière générale, la diversité floristique diminue avec l'altitude, en particulier à l'étage alpin ou se situe la limite de croissance des arbres, et à l'étage nival limitant la croissance de toutes les espèces vasculaires (Ozenda and Borel, 2013). Dans les prairies plus précisément, la composition taxonomique des communautés botaniques (ensemble d'espèces subissant les mêmes contraintes environnementales) change avec l'altitude, ainsi que l'abondance des différentes formes de vie (de Almeida Campos Cordeiro and Neri, 2019). Heide (1994) a montré que l'altitude sélectionne les espèces qui ont une floraison précoce, en raison du climat plus rude.

Il est cependant souvent difficile de différentier l'effet du climat et l'effet du sol. Par exemple, l'humidité ne dépend pas uniquement de la pluviométrie, mais aussi de la capacité du sol à capter et restituer cette eau.

Impact du sol sur la composition botanique

Les plantes prairiales sont en interaction permanente avec le sol. Ce dernier est un support, mais aussi une source d'eau et de nutriments.

Les liens entre sol et végétation sont complexes. Texture, profondeur, portance, fertilité, acidité et humidité façonnent la diversité taxonomique et fonctionnelle des prairies (Critchley et al., 2002; Michaud et al., 2012b). De même, l'étude des communautés botaniques met en évidence des différences entre les communautés de prairies sur sols basiques et de prairies sur sols acides

(Ferrez et al., 2017). Ellenberg et al (1992) ont ainsi utilisé les plantes comme indicatrices des conditions édaphiques d'un milieu, en notant certaines plantes selon leur affinité à l'acidité, à l'humidité, à la fertilité ou encore à la salinité des sols.

De manière générale, les teneurs en azote (N) et phosphore (P) disponibles sont négativement corrélées à la richesse spécifique et aux indices écologiques de Shannon et de Pielou (Wang et al., 2007). Cependant, en milieu prairial il est difficile de différencier la fertilité naturelle du sol, les amendements réalisés par l'être humain et les animaux domestiques, et les dépôts atmosphériques. La Capacité d'Echange Cationique (CEC) des sols est souvent utilisée pour mesurer la fertilité : elle représente la capacité d'un sol à capter les cations (principalement Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} et NH_4^{+}) d'origine naturelle ou anthropique, qui pourront être restitués aux plantes. En absence de fertilisation ou dans des milieux fertilisés mais acides, les cations captés sont de faible intérêt agronomique (H_3O^{+} principalement). En général, la CEC est fortement liée au rapport C/N et au pH des sols (Blaize, 2018).

Si les sols impactent les communautés végétales, il est aussi vrai que les plantes modifient les propriétés biotiques (décomposeur de la litière, pathogènes, …) et abiotiques (disponibilité des nutriments, teneur matière organique, microclimat, …) du sol, ce qui influence leur propres performances (De Long et al., 2019a). Ainsi, Gould et al (2016) ont montré qu'une forte diversité taxonomique et fonctionnelle améliore la stabilité des agrégat des sols. Cependant les effets de la végétation sur le sol dépendent de l'âge de la communauté floristique et s'expliquent par la consommation en eau, l'ombre apporté et l'intégration de biomasse dans le sol (Fischer et al., 2019).

Le massif vosgien, situé au nord-est de la France, recouvre plus de 7000 km². C'est un massif de moyenne montagne, s'élevant de 170 à 1424 m d'altitude. Les températures mensuelles moyennes sont de -4 à +12°C, et la pluviométrie varie fortement (de 700 à 2300 mm/an) sous l'effet de complexes gradients longitudinaux, latitudinaux et altitudinaux. De manière générale, le versant ouest est plus humide car orienté vers l'océan, et le versant oriental est plus chaud et sec par l'effet Foehn (Ferrez et al., 2017).

La géologie y est aussi disparate. Le nord du massif est principalement gréseux, ce qui produit des sols sableux et acides, mais les franges nord-ouest et nord-est du massif sont calcaires et donc basiques. Le sous-sol de la partie sud du massif est granitique et produit donc des sols acides et parfois très superficiels sur les crêtes.

Impact du mode d'utilisation sur la composition botanique

Les communautés végétales sont donc façonnées par le milieu naturel, mais aussi par les interventions agricoles et en particulier le mode d'utilisation de la prairie et sa fertilisation (Michaud et al., 2012b).

L'utilisation de la prairie distingue la récolte mécanique (fauche, ensilage, enrubannage, récolte en vert) du pâturage (chargement, durée de pâturage, espèces et races animales). De manière générale, la fauche augmente l'abondance d'herbes et de plantes diverses capables de produire

rapidement de nouvelles feuilles, en opposition au pâturage qui sélectionne les rosettes et les plantes rampantes (Gaujour et al., 2012; Lanta et al., 2009).

La diversité botanique des parcelles de fauche est généralement plus élevée que celle des pâtures, du moins tant qu'elles ne sont pas trop intensifiées, notamment après une exploitation précoce et fréquente. Ainsi, une à deux fauches par an permettraient un optimum de diversité spécifique (Fischer and Wipf, 2002; Jacquemyn et al., 2003). La date de fauche joue aussi un rôle important dans la sélection des espèces : les espèces dont les graines n'ont pas été formées lors de la fauche ne pourront pas se reproduire de façon sexuée. De même, si les graines ne sont pas tombées au sol elles seront prélevés dans le fourrage (Smith et al., 2002), les fauches précoces et fréquentes sélectionnent donc les espèces pouvant se cloner, d'intérêt écologique souvent faible (Plantureux et al., 2005).

Selon Diaz et al (2001), le pâturage sélectionne les espèces annuelles, les rosettes, les espèces stolonifères et hémicryptophytes, et les espèces avec un fort potentiel de dispersion. Cependant, les effets du pâturage sur la végétation dépendent de son intensité et des animaux qui y pâturent.

L'intensité de pâturage se calcule généralement en faisant le produit du nombre d'animaux (UGB ou Unités Gros Bétail) et du nombre de jours de pâturage par unité de surface, et se mesure en nombre de jours.UGB.ha^{-1}. L'impact de l'intensité a été souvent étudiée, mais les résultats peuvent être contradictoires en fonction de la richesse spécifique originellement présente dans la prairie et des niveaux d'intensité comparés. Dumont et al (2009) ont montré que la faible densité de pâturage favorise les espèces diverses et les espèces tolérantes au stress (selon la définition de Grime (1977)), mais qu'il s'agit plus d'évolution des abondances des espèces que d'apparition/disparition d'espèces. De plus, une faible intensité serait aussi favorable aux insectes tels que les papillons et orthoptères (Dumont et al., 2009). A l'inverse, dans les prairies dont la composition botanique est initialement peu diversifiée et compétitive (selon la définition de Grime (1977)), l'intensité de pâturage peut être positivement corrélée à la richesse floristique (Bullock et al., 2001, 1994). Enfin, le pâturage des landes permet généralement d'augmenter leur richesse spécifique par rapport à l'absence de perturbation (Bullock and Pakeman, 1977), tant qu'il n'est pas excessif (Rosa García et al., 2013). Lorsqu'il est extensif, le pâturage crée de l'hétérogénéité au sein des prairies, favorables à la diversité végétale et animale (Klimek et al., 2008; Marion et al., 2010).

L'intensité de pâturage peut influencer la végétation de différentes manières : par le prélèvement de la végétation (Kohler et al., 2004), ce qui permet à la lumière d'atteindre le sol (Rook and Tallowin, 2003), par la sélection d'espèce à consommer favorisant les espèces de faible appétence par le troupeau (Osoro et al., 2017), par le piétinement qui sélectionne les espèces tolérantes et permet aussi à la lumière d'atteindre le sol (Ellenberg et al., 1992; Pauler et al., 2019) ou encore par l'apport de fertilisation par les excrétions du troupeau (Nennich et al., 2005). Les bovins rejettent de l'azote à hauteur moyenne de 60,4 g/jour dans l'urine et 43,7 g/jour dans les fèces (Dong et al., 2014).

La composition botanique des prairies est aussi sélectionnée selon l'espèce animale qui y pâture. Tóth et al (2018) ont trouvé que le pâturage de mouton induit des diversités taxonomique et fonctionnelle inférieures au pâturage de bovins. D'après ces résultats, la végétation est même mieux prédite par l'espèce animale au pâturage que par l'intensité de pâturage. Le pâturage de bovins et équins sur une même prairie permet une richesse spécifique plus importante que lorsqu'une seule espèce pâture (Loucougaray et al., 2004). L'importance de l'espèce animale

peut s'expliquer par les préférences de chacune : par exemple les chèvres consomment plus d'espèces ligneuses, et façonnent ainsi les communautés végétales (Osoro et al., 2017). Au-delà de l'espèce, la race joue aussi un rôle non négligeable : les bovins de race « Highland Cattle » sont plus favorables à la biodiversité que les races bovines spécialisées dans la production de viande telles que les Limousines, Charolaises ou Angus (Pauler et al., 2019). Ce résultat est dû à un piétinement moindre du fait de leur poids léger et à la consommation d'espèces ligneuses.

Enfin, l'effet de la saison de pâturage est peu étudié, mais sujet à de nombreux débats. Globalement peu d'effets sont observés, mais la synthèse des études est difficile car elles sont toutes soumises à de nombreuses variations de climat, de diversité floristique et d'intensité de pâturage (Gaujour et al., 2012).

Cependant, l'utilisation de la prairie est aussi liée à sa fertilisation. En effet, l'augmentation du nombre de fauche ou de l'intensité de pâturage, et l'avancement de la date de première utilisation est souvent possible grâce à la fertilisation. Rodríguez-Rojo et al (2017) ont ainsi montré que l'intensification des pratiques permet une meilleure prédiction de la composition botanique que l'utilisation de la prairie.

Impact de la fertilisation sur la composition botanique

Le but premier de la fertilisation est d'augmenter les rendements agricoles. Dans les prairies, la fertilisation permet aussi d'améliorer la qualité du fourrage et d'avancer les dates d'utilisation (Papanastasis and Koukoulakis, 1988).

L'augmentation de la fertilisation a généralement pour conséquence une diminution de la diversité floristique à court et à long termes (Borer et al., 2017; Melts et al., 2018). La fertilisation impacte aussi la distribution des espèces au sein d'une prairie, comme l'ont montré Serafini et al. (2019) via l'analyse des indices de de diversité de Shannon. En effet, les espèces oligotrophiles et les espèces pérennes (Garnier et al., 2018), ainsi que les espèces fixatrices d'azote par symbiose, espèces rares et groupes fonctionnels localement rares (Suding et al., 2005) ont un plus fort risque de disparition sous l'effet de l'augmentation de la fertilisation. Dans les prairies humides, la fertilisation à plus d'effet que la fréquence de fauche, mais les effets dépendent de la communauté végétale initialement en place : la fertilisation peut augmenter la proportion d'herbes ou de diverses, avec ou sans effet sur la richesse spécifique (Čop et al., 2009).

Les traits fonctionnels sont aussi déterminés par la fertilité du milieu. Par exemple, les espèces de milieux pauvres adoptent des stratégies de conservation, avec de faibles surfaces foliaires spécifiques et teneurs en azote, mais une forte teneur en matière sèche et un ratio C/N des feuilles élevé (Ansquer et al., 2009b; Louault et al., 2005). Garnier et al (2018) ont identifié les traits fonctionnel permettant de prédire la résistance d'une espèce à l'intensification des pratiques : la taille de la plante, la masse des graines et la teneur en matière sèche des feuilles.

La fertilisation peut être apportée sous différente formes : minérale via les fertilisants chimiques, ou organique principalement via les épandages de fumier, de lisier et les excréments des animaux au pâturage. Ces deux formes impactent différemment la végétation, car les nutriments de la fertilisation minérale sont rapidement assimilables, et souvent plus concentrés. De plus, le fumier apporte une grande quantité de carbone, qui offre au sol une meilleure rétention de l'eau et favorise la compétition entre espèces (Kirkham et al., 2008). Le lisier à des conséquences plus importantes que le fumier sur la composition botanique : il favorise

l'abondance d'espèce à forte valeur fourragère comme le raygrass anglais (*Lolium perenne*), le pâturin des près (*Poa pratensis*) et la fétuque des près (*Festuca pratensis*) (Laissus and Leconte, 1982). Enfin, les animaux au pâturage émettent des excréments qui créent des zones riches en nutriments et permettent le développement d'une végétation hétérogène (Dai, 2000; Shiyomi et al., 1998).

La composition des fertilisants a aussi des impacts sur la composition botanique. Par exemple, une fertilisation basée sur le phosphore et le potassium augmente la richesse des légumineuses, alors que l'ajout de nitrate, phosphore et potassium augmentera la proportion d'herbes (Boob et al., 2019). A l'inverse, Wassen et al (2005) ont observé une diminution de la biodiversité suite à l'application de phosphore sur les prairies, et les teneurs en phosphore et potassium du sol sont parmi les principaux déterminants des communautés des prairies humides (Critchley et al., 2002). En effet, le phosphore serait plus souvent l'élément limitant la croissance des plantes, d'où son impact supérieur sur les communautés (Hejcman et al., 2007).

Sur les landes, la fertilisation à base d'azote, phosphore et potassium diminue la diversité et permet une domination des grandes herbes, alors que l'apport de calcium permet une augmentation de la richesse spécifique et l'apparition d'espèces oligotrophiles (Schellberg, 1999). Cependant, les effets du chaulage sont encore débattus, car les résultats des études sont contrastés, probablement à cause des différences d'acidité des sols avant l'application du chaulage (Li et al., 2003). Augmenter le pH des sols acides semble augmenter leur richesse botanique, jusqu'à ce que la neutralité soit atteinte (Gaujour et al., 2012), mais induit la disparition de communautés acidiphiles parfois déjà menacées à l'échelle européenne (Schellberg, 1999).

Enfin, de l'azote atmosphérique est continuellement déposé. Ces dépôts sont en augmentation depuis le début de l'air industriel et diminue la richesse spécifique des prairies américaines (Clark and Tilman, 2008) et européennes (Stevens et al., 2010). Cependant, l'interaction entre les dépôts atmosphériques et le changement climatique augmente la diversité botanique des prairies pyrénéennes subalpines (Boutin et al., 2017).

Les corrélations entre pratiques et milieu

Dans un souci de simplification, j'ai présenté dans les paragraphes précédents les principaux critères prédictifs de la végétation les uns après les autres. Cependant, il existe en réalité des corrélations entre ces critères.

La gestion des prairies d'altitudes, très humides ou séchantes est souvent moins intensive. Les prairies d'altitude et très humides ne sont parfois accessibles qu'à la fin du printemps, et l'accès peut être empêché dès le début de l'automne. Il n'est donc pas forcément possible d'exploiter la prairie plusieurs fois dans l'année, il est donc inutile d'apporter une forte fertilisation dans ces conditions. De plus, certaines prairies d'altitude ne sont pas mécanisables à cause de la pente, elles seront donc uniquement pâturées. Les prairies séchantes sont souvent liées à des sols sableux et/ou superficiels, et la pousse de l'herbe est très faible en été. La fertilisation importante de ces prairies est donc peu utile, car le facteur limitant n'est pas l'accès aux nutriments mais la ressource en eau. De même, la croissance des prairies humides en période de sécheresse ou de forte inondation n'est pas limitée par la ressource en nutriments (Bonis et al., 2008).

Les critères du sol sont partiellement corrélés au climat et donc indirectement à l'altitude. Par exemple, l'acidité des sols dépend des températures et précipitations (Zhang et al., 2019), phénomène amplifié sur le massif vosgien car les sols calcaires et marneux sont situés uniquement sur les franges des Vosges du Nord, et donc à faibles altitudes. De plus, les sols acides limitent la croissance de la végétation en limitant l'absorption des nutriments (Heyburn et al., 2017), ils seront donc potentiellement moins fertilisés.

Ces corrélations entre pratiques et milieux, induisent des hétérogénéités qui posent des problèmes conceptuels. Par exemple, l'étude des interactions entre fertilisation et humidité sera difficile, car peu de prairies sont à la fois très humides et très fertilisées. Il est possible de trouver ces prairies au sein de fermes expérimentales ou en incitant des agriculteurs, mais elles se reflèteront peu ou pas la réalité des pratiques des agriculteurs.

Grâce à de fortes variations climatiques, géologiques, pédologiques et topologiques, la végétation du massif est très hétérogène. De manière générale, le massif est fortement dominé par la forêt, qui laisse place aux prairies principalement le long des vallées montagnardes, sur la grande crête centrale et dans les vallées du nord du massif. Les prairies sont plus fréquentes sur les versants orientés au sud et à l'est.

Dans les vallées, la diversité des prairies reste importante grâce à une grande variété de milieux et de pratiques agricoles, et des végétations hygrophiles se développent dans les prairies humides.

Au-delà de 900 m d'altitude, l'étage montagnard supérieur se dessine : ce sont les Hautes-Chaumes. Il est principalement composé de landes à callune, myrtilles et nard raide. Certains versants développent une végétation alpine, là où les conditions climatiques ne permettent pas la croissance de végétations forestières.

Des pelouses se développent lorsque les conditions géologiques et climatiques le permettent, en particulier sur les Hautes-Chaumes acides, sur des sols superficiels calcaires ou encore sur des sols très sableux. Certaines de ces pelouses peuvent être considérées comme des formations primaires : elles se maintiennent à l'état de pelouse sans intervention humaine.

Enfin, les précipitations abondantes et les températures moyennes basses sont favorables au développement de tourbières, principalement dans la partie nord du massif et autours de certains lacs d'altitude.

B. Valeur pour les insectes pollinisateurs

De manière générale, il existe une corrélation positive entre la diversité botanique et la richesse et l'abondance des insectes pollinisateurs (Garrido et al., 2019; Griffin et al., 2017). Certains pollinisateurs rares et/ou menacés sont spécialistes d'une espèce botanique, ou d'un type de fleur. Cependant, les fleurs qu'ils consomment sont souvent aussi consommées par d'autres espèces pollinisatrices, il est donc possible de conserver les pollinisateurs rares et communs sur une même parcelle (Sutter et al., 2017).

Ce lien entre diversité floristique et de pollinisateurs peut s'expliquer par la corrélation positive entre abondance de fleurs et qualité du nectar (Fowler et al., 2016). En effet, l'apport de nectar

est le meilleur prédicteur de la richesse de pollinisateur (Milberg et al., 2016), bien que d'autres critères aient prouvés leur importance, comme la hauteur de la végétation (Milberg et al., 2016) ou la couverture du sol (Potts et al., 2009). L'impact de la quantité et de la qualité du pollen semble plus difficile à estimer car les pollinisateurs y répondent différemment : l'abondance de l'abeille européenne *Apis mellifera* et du bourdon des champs *Bombus pascuorum* est par exemple négativement corrélée au taux de protéines du pollen. Enfin, certains pollens peuvent être néfastes : la renoncule âcre (*Ranunculus acris*) par exemple est toxique pour les larves de pollinisateurs (Sedivy et al., 2012). Les plantes sont plus ou moins attractives, selon leurs traits fonctionnels. Par exemple, la taille de la fleur, sa symétrie, sa forme et le taux de réflexion des rayons UV sont liés à la richesse et à l'abondance des pollinisateurs (Hegland and Totland, 2005; Ricou et al., 2014) (Figure 2).

Enfin, le paysage est un prédicteur important des communautés de pollinisateurs. La présence de forêt par exemple permet une recolonisation rapide des prairies restaurées (Griffin et al., 2017), et peut servir de lieu de ponte ou de réservoir de nourriture (Moquet et al., 2017). L'inclinaison et l'orientation de la parcelle peuvent même être des facteurs plus importants que les pratiques agricoles (Aviron et al., 2007). L'arrêt de la fertilisation, la réduction de la fréquence de coupe et l'arrêt du pâturage favorisent les papillons (Potts et al., 2009). Ce résultat peut être dû au développement d'une composition floristique plus diversifiée, mais aussi à des pratiques qui laisse le temps aux fleurs de s'épanouir. A l'inverse, dans les prairies pauvres en éléments nutritifs, un léger pâturage peut augmenter la diversité et l'abondance de plantes à fleurs et donc celles des pollinisateurs (Garrido et al., 2019).

Figure 2 Exemples de pollinisateurs des prairies permanentes : syrphe (gauche) et abeille (droite)

C. Séquestration de carbone dans les sols

Les sols de prairies permanentes permettent, avec les sols de forêts, l'une des meilleures séquestrations de carbone dans le sol, bien au-delà des sols cultivés (Arrouays et al., 2002). Ainsi, les changements d'usage impactent les stocks de carbone : la conversion d'une culture ou d'une forêt en prairie augmente les stocks de carbone, alors que l'abandon des prairies, la plantation d'arbres ou le retournement d'une prairie à la faveur d'une culture diminuent les concentration en carbones du sol (Guo and Gifford, 2002; Soussana et al., 2004).

Augmenter la diversité floristique d'une prairie peut augmenter les stocks de carbone dans le sol, dans les plantes et dans les racines (Hungate et al., 2017; Oram et al., 2018). Chen et al. (2017) expliquent ce résultat par une corrélation négative entre richesse spécifique et dégradabilité des racines mais aussi par le rôle des différentes formes de vie : les herbes augmentent le ratio C/N alors que les légumineuses le diminuent. Les légumineuses sont ainsi reconnu pour leur capacité à augmenter le stock de carbone dans le sol (Li et al., 2016). Cependant, la présence et l'abondance d'espèces et de formes de vie n'expliquent pas à elles seules les variations entre stock de carbone : la désynchronisation des espèces et leur diversité des réponses face aux contraintes environnementales pourrait aussi être un facteur majeur (Fischer et al., 2019; Sasaki et al., 2019).

Les gains et pertes de carbone du sol sont aussi liés aux traits fonctionnels des plantes (De Deyn et al., 2008). Les traits floraux (teneur en azote et carbone de la plante, rapport C/N) peuvent expliquer les propriétés du sol tels que la teneur en azote et les flux de carbone. Cependant, De Long et al. (2019b) ont observés ces relations en monoculture mais pas dans les prairies diversifiées.

Les pratiques agricoles jouent un rôle non négligeable dans le stockage de carbone. Tout d'abord, le choix du pâturage ou de la fauche modifie à court terme la dynamique du carbone (Don et al., 2009). Si la prairie est pâturée, il est nécessaire de faire attention au chargement, car le surpâturage peu diminuer le taux de carbone dans le sol (Wang et al., 2011), en particulier lorsque la prairie se dégrade et la proportion de sol nu augmente (Du et al., 2019). De plus, fertilisation et chargement interagissent : Soussana et al. (2004) ont identifié que des pratiques alliant une fertilisation à 150 kg d'azote par hectare et par an, avec un chargement inférieur à 1,2 UGB / ha permet de stocker plus de gaz à effet de serre qu'elles n'en émettent. Enfin, nourrir le bétail avec un fourrage de bonne qualité permet de diminuer les émissions de carbone par kilo de lait et viande produit, c'est pourquoi l'ensilage d'herbe précoce peut aider à équilibrer la balance entre stockage et émissions de carbone (Åby et al., 2019). Le stock de carbone est ainsi le résultat de complexes interactions entre fréquence de coupe ou de pâturage (export de carbone) et fertilisation (stockage de carbone), et une intensification intermédiaire des pratiques permet de maximiser la séquestration (Soussana and Lemaire, 2014).

Le climat est aussi un déterminant important de la séquestration de carbone. De manière générale, la température et l'humidité sont les facteurs qui influent le plus sur l'apport de matière organique au sol (Post and Kwon, 2000), mais les mécanismes de séquestration diffèrent entre les prairies permanentes des différents climats (De Deyn et al., 2008). Le froid semble avoir tendance à accumuler le carbone organique dans les horizons de surface (Post and Kwon, 2000). Cependant, les printemps plus chauds augmentent la photosynthèse des toundras sans modifier la respiration, ce qui augmente aussi la séquestration du carbone (Black et al., 2000). Le climat impacte le stock de carbone d'une année à l'autre, en particulier lors d'été

particulièrement sec (Don et al., 2009; Novick et al., 2004). Ciais et al. (2005) expliquent ce phénomène par le stress hydrique, qui diminue les émissions nettes de carbone en diminuant de 30% la production primaire brute.

Pour finir, une dimension paysagère permet aussi d'expliquer la répartition des stocks de carbone dans les sols de prairies. Par exemple, les bordures des prairies permettent l'augmentation de la teneur en carbone des prairies, que ces bordures soient des haies d'arbre ou des murets de pierre. Cette augmentation est principalement corrélée à l'humidité et inversement corrélé à la densité apparente du sol (Ford et al., 2019).

2.4.2. Les propriétés agronomiques

A. Rendement

Les choix de gestion par l'agriculteur, en particulier le mode d'utilisation et la fertilisation, permettent de prédire le rendement des prairies.

Le but premier de la fertilisation est l'augmentation du rendement, qui peut s'expliquer par l'augmentation de la croissance des espèces en place, et par le remplacement d'espèces peu productives par des espèces compétitrices à croissance rapide (Garnier et al., 2018; Schellberg, 1999). De plus, le mode d'utilisation de la prairie peut influencer le rendement, mais si les pâturages sont moins productifs que les fauches (Grace et al., 2019a), le mode d'utilisation est un moins bon déterminant du rendement que la fertilisation (Čop et al., 2009). En effet, les pâturages produisent généralement autant de biomasse que les prairies de fauches, mais elle est moins bien valorisée à cause du piétinement, de la présence de fèces et les refus (Plantureux and Thorion, 2005).

Cependant, l'effet de la fertilisation peut être modéré par les conditions climatiques. La production de biomasse diminue quand l'altitude augmente (Wang et al., 2007), il ne faut donc pas s'attendre à des productions similaires en vallée et en montage même avec l'utilisation de fertilisants. L'effet de la fertilisation est aussi limité par la pluviométrie. A fertilisation constantes, les rendements seront similaires entre les années à pluviométrie moyenne ou élevée, mais seront faibles en cas d'année sèche : le manque d'eau est donc un facteur limitant important (Serafini et al., 2019).

Le climat et le sol sont aussi de forts déterminants des rendements prairiaux. Au printemps, le rendement est généralement limité par la température (en conditions d'absence de stress hydrique). En été, le rendement est généralement limité par le stress hydrique. Le changement climatique devrait augmenter les fréquences et intensité des sécheresses et canicules estivales, ce qui diminuera fortement les rendements, et impose d'adapter les systèmes fourragers (Lemaire and Pflimlin, 2007; Munkhtsetseg et al., 2007). Cependant, les rendement prairiaux ne sont pas seulement sensibles aux précipitations, mais aussi à la fréquence des précipitations (Swemmer et al., 2007) et la saison d'abondance ou manque de précipitations (Vitra et al., 2019). Enfin, le sol par sa texture et sa teneur en matière organique a des capacités de rétention de l'eau différentes : les sables ont tendance à sécher plus rapidement et donc à permettre une moins bonne résistance de la végétation aux sécheresses (Gupta and Larson, 1979). De plus, les sols à forte Capacité d'Echange Cationique pourront capter les nutriments sous forme d'ions avant qu'ils ne soient lessivés, et pourront ensuite les restituer aux plantes pour subvenir à leurs besoins. Liée à la fois au climat et au sol, l'altitude est inversement corrélée aux rendements (Huguenin-Elie et al., 2017).

L'étude des liens entre diversité botanique et rendement se heurte souvent à un problème de protocole : il est difficile voire impossible de comparer des prairies (semi-)naturelles appartenant à des milieux et pratiques agricoles identiques mais ayant des compositions botaniques différentes. Pour étudier distinctement les effets de la diversité sur le rendement à grande échelle, il est donc généralement nécessaire de faire un choix entre composition botanique spontanée et conditions environnementales uniformes (Plantureux, 2020). Les auteurs des expérimentations où la prairie est semée montrent généralement une corrélation positive entre diversité et productivité (Borer et al., 2017). Grace et al. (2016) ont montré que des prairies diversifiées de six et neuf espèces produisent autant qu'une monoculture de ray-grass fertilisée. De même, Kirwan et al. (2007) ont montré que les prairies européennes intensifiées semées de quatre espèces ont un rendement supérieur aux monocultures. Cette étude montre aussi l'importance de la diversité des formes de vie, car les mélanges les plus productifs sont composés d'herbes et légumineuses. Enfin, supprimer des espèces botaniques induit une perte de biomasse sur le long terme (Kardol et al., 2018).

L'augmentation de la biodiversité permet aussi une meilleure stabilité des rendements. Les prairies diversifiées (quatre espèces) sont plus résistantes à la sécheresse que les monocultures (Haughey et al., 2018). De plus, Finn et al.(2018) ont montré que la plus faible productivité des prairies diversifiées (quatre espèces) lors d'années humides est compensée par de meilleurs rendements lors d'années sèches. Cependant, la richesse spécifique n'augmente pas la résistance à la sécheresse des prairies, mais permet une meilleure récupération des prairies peu productives leur permettant parfois de surcompenser les pertes. Ce phénomène pourrait être dû à la non synchronisation de la réponse des espèces (Kreyling et al., 2017). Enfin, la stabilité de la production de biomasse peut être expliquée par la diversité spécifique en conditions arides, et par la diversité des traits foliaires en conditions plus humides : il semble donc important de favoriser la diversité spécifique et fonctionnelle afin de sécuriser les rendements (García-Palacios et al., 2018).

Il est intéressant de noter que les études démontrant des corrélations positives entre diversité floristique et rendement considèrent des prairies de quatre espèces "diversifiées" (ex : Finn et al., 2018; Grace et al., 2016). Or, les prairies permanentes du massif vosgien hébergent souvent une diversité supérieure à 20 espèces, approchant parfois les 70 espèces (Ferrez et al., 2017).

Dans les prairies semi-naturelles qui ne sont donc pas semées, les liens entre diversité et productivité sont variés : elles peuvent être inversement corrélées (Brown and Cahill, 2019), peu liées (Gough et al., 1994), mais semblent bien corrélées aux facteurs abiotiques (climat, sol, …) (Borer et al., 2017). Ici aussi, la non synchronisation entre les espèces et la diversité des réponses aux contraintes environnementales pourrait expliquer les liens entre diversité et rendements (Sasaki et al., 2019). Schmid (2002) montre que dans les prairies permanentes, la corrélation négative entre rendement et biodiversité s'observe presque uniquement lorsqu'elle est due à une augmentation de la fertilité du milieu. De plus, il n'existe pas de corrélation linéaire entre diversité et productivité : il s'agit plus d'un nuage de point où les faibles et fortes productivités sont liées à de faibles diversités, mais où la productivité moyenne peut être liée à une vaste gamme de diversité (Schmid, 2002). Ainsi, augmenter la fertilisation d'une prairie augmente la productivité et diminue la diversité, mais diminuer la fertilisation induit une perte de la productivité sans forcément augmentation de la biodiversité.

B. Qualité fourragère

La qualité fourragère dépend à la fois du fourrage lui-même, mais aussi de l'animal. La valeur nutritive du fourrage prend en compte la digestibilité, la valeur énergétique, la valeur azotée et l'ingestibilité (Farruggia et al., 2008). Cependant, ces valeurs peuvent différer selon l'orientation du fourrage : sera-t-il consommé par un ruminant ou un monogastrique, par un bovin ou un ovin, par un animal spécialisé dans la production de lait ou de viande (INRA, 2010) ? En plus de la valeur nutritive, il faut aussi prendre en compte les préférences et motivations de l'animal, qui peuvent être estimées par la palatabilité de la végétation (Baumont, 1996).

Comme nous l'avons vu précédemment, les pratiques et le milieu sélectionnent une composition botanique particulière. Les espèces prairiales ayant des qualités fourragères différentes, on observe donc des variations de qualités fourragères entre prairies dues aux pratiques et au milieu. INRA (2010) évalue ces qualités fourragères, mais la difficulté d'étudier toutes les espèces sauvages impose de se concentrer sur les espèces cultivées (ray-grass, fétuques, …) ou sur des regroupements de prairies permanentes (prairies de plaine, prairies de demi-montagne, …).

L'étude de la composition floristique des communautés prairiales, via la phytosociologie, peut permettre l'estimation de la qualité fourragère (Petrovic et al., 2013). Les traits fonctionnels tels que la surface foliaire spécifique et la teneur en matière sèches des feuilles (respectivement *Specific Leaf Area* et *Leaf Dry Matter Content*, en anglais) permettent une bonne prédiction de la digestibilité et de la teneur en azote des feuilles (Al Haj Khaled et al., 2006; Ansquer et al., 2009a; Pontes et al., 2007b; Tasset et al., 2019). Cependant, la teneur en protéines, en ADF (Acid Detergent Fiber) et la digestibilité de la matière organique pourraient être plus liées au stade de développement de la végétation qu'à sa composition spécifique (Grace et al., 2016). En effet, la phénologie de la végétation est un critère important pour la prédiction de la qualité fourragère : la teneur en parois végétales augmente avec l'avancement des stades de développement de la végétation, ce qui diminue la digestibilité (Farruggia et al., 2008). Cependant, toutes les espèces ne perdent pas en qualité à la même vitesse : les espèces à floraison tardive ont une meilleure digestibilité (Pontes et al., 2007b), ce qui peut permettre de rassembler les graminées (Cruz et al., 2010) et dicotylédones (Theau et al., 2017) au sein de types ayant des phénologies similaires, facilitant ainsi la prédiction de la qualité fourragère de la végétation.

Les pratiques agricoles, en particulier la fréquence de fauche (Čop et al., 2009) et la fertilisation (Schellberg, 1999), impactent la qualité fourragère des prairies grâce à deux processus. Premièrement, elles améliorent la qualité nutritive du fourrage par exemple par l'amélioration du taux de protéine ou la valorisation de jeunes pousses plus digestibles, et secondement elles modifient la composition botanique, en sélectionnant les graminées compétitives de meilleure qualité fourragère.

La fertilisation permet une meilleure croissance de la végétation, mais modifie aussi sa qualité fourragère. La fertilisation azotée améliore la digestibilité de la fléole des prés (*Phleum pratense*), et augmente la teneur en protéine de la fléole des prés et du ray-grass anglais *Lolium perenne* (Bumane, 2010; Cherney and Cherney, 1997). Cependant, la fertilisation peut avoir des effets différents selon son équilibre entre azote, phosphore, potassium et calcium (Schellberg, 1999). Dans des prairies permanentes canadiennes soumises à des fertilisations en

azote et/ou soufre et/ou potassium, la teneur en azote du fourrage est plus élevée dans les prairies fertilisées uniquement en azote, alors que la teneur en potassium est maximale dans les prairies fertilisées par les trois éléments (Malhi et al., 2010).

De même, des connaissances du climat et sol peuvent aider à la prédiction de la qualité fourragère. De manière générale, les prairies très humides ont une forte teneur en matière sèche et des feuilles épaisses, ce qui se traduit par une digestibilité plus faible de la végétation (Oddershede et al., 2018). De même, le stress hydrique induit une diminution de la surface foliaire spécifique (SLA), ce qui diminue aussi la digestibilité du fourrage (Vitra et al., 2019). Deléglise et al. (2015) ont observé une diminution de la teneur en protéines, mais pas de la teneur en fibre ni en énergie. Ces résultat peuvent cependant être nuancés, car les précipitations peuvent sélectionner des graminées, apportant une meilleur qualité fourragère (Silvertown et al., 1994). Enfin, les effets des épisodes de sécheresse sont visibles pendant les mois qui suivent, mais un retour à la normale est observé lors du printemps suivant (Deléglise et al., 2015). Il y a donc un optimum à trouver, entre les prairies inondées et celles trop sèches. Les effets du climat peuvent être limités par le sol : les sols argilo-limoneux ont une meilleure rétention de l'eau (Gupta and Larson, 1979), et les sols relativement humides sont favorables aux communautés bactériennes, la minéralisation de l'azote y est donc plus forte (Guntiñas et al., 2012). On peut donc s'attendre à ce que les sols argilo-limoneux soient associés à de meilleures qualité fourragère tant qu'ils ne causent pas d'inondation de la végétation. Enfin, les oligoéléments du sol sont en parti captés par la végétation, et peuvent donc participer à la ration alimentaire. Le transfert du sol à l'animal ne dépend pas seulement de la composition du sol, mais aussi du climat, des espèces botaniques et des pratiques de pâturage (Reid and Horvath, 1980). Cependant, les éléments toxiques présents dans le sol, comme le cadmium (Cd), pourront aussi être assimilés par la végétation et transmis aux animaux (Quezada-Hinojosa et al., 2015).

La valeur fourragère ne dépend pas que de la valeur nutritive, mais aussi de la motivation de l'animal à consommer la végétation. Certaines études se sont alors intéressées plus directement à la consommation par les animaux, et ont pu mettre en avant des préférences. Par exemple, les jeunes bovins font des bouchées principalement composées de légumineuses et graminées de préférence de petites tailles (Dumont et al., 2007) alors que les moutons et cerfs élaphes passent 50% de leur temps à brouter des graminées pourtant minoritaires dans la prairie (Hester et al., 1999). Les aliments sont choisis en fonction de leur qualité nutritive, de caractéristiques physiques telles que la présence d'épines ou la facilité d'ingestion prédictible par la teneur en parois végétales et la proportion de tiges, et des caractéristiques chimiques telles que l'odeur et le gout (Baumont, 1996; Pontes et al., 2010). Les brebis prélèvent des bouchées de graminées à feuilles large ou d'arbuste, et des bouchés plus petites de petites graminées et dicotylédones herbacées (Magda et al., 2001). Enfin, les animaux apprennent et associent les goûts, odeurs et apparences du fourrage, ce qui complique la prédiction précise de la palatabilité du fourrage car elle dépend du vécu de l'animal (Baumont, 1996). Ces préférences permettent l'estimation de l'appétence du fourrage, prise en compte dans les calculs de valeur pastorale (Daget and Poissonet, 1972). La richesse spécifique ne semble pas impacter les consommations de matière sèche et d'azote par les troupeaux (Totty et al., 2013), ce qui peut s'expliquer par le fait que les animaux d'élevage, souvent cloisonnés à une surface limité, ne peuvent pas complètement choisir les espèces qu'ils pâturent (Rook et al., 2002).

C. Qualité organoleptique des produits[1]

Les métabolites primaires et secondaires sont des déterminants de la qualité des produits laitiers et carnés : qualité gustative mais aussi nutritionnelle (Fraisse et al., 2007). Les métabolites secondaires sont des composés issus des métabolismes qui ne sont associés ni à la nutrition, ni à la croissance des plantes. Leurs fonctions sont diverses : chez les plantes ces métabolites servent par exemple à attirer les pollinisateurs, à protéger les plantes des stress biotiques et abiotiques, etc… Les composés phénoliques (une molécule OH liée à un cycle aromatique) sont les plus nombreux des métabolites secondaires (Farruggia et al., 2008), et jouent un rôle primordial dans la qualité organoleptiques des produits laitiers et carnés.

L'impact de la composition botanique des prairies sur la flaveur des produits carnés et laitiers semble difficile à estimer (Larick et al., 1987). La composition botanique des prairies peut être reliée à la composition en acide gras des laits et viandes (Collomb et al., 2002; Normand et al., 2019), ainsi qu'à leurs propriétés organoleptiques (Bovolenta et al., 2014; Buchin et al., 1999; Jeangros et al., 1997). La majorité des études s'est intéressée à la différence entre animaux élevés à l'herbe et ceux nourris à base de concentrés et/ou de maïs. Ainsi, les produits laitiers issus de pâturage ont généralement meilleur goût et un taux d'acides gras insaturés plus favorable à la santé du consommateur (Croissant et al., 2007), alors que l'appréciation du goût des viandes semble dépendante des habitudes de consommation : les Européens préfèrent la viande issue d'élevages nourris à l'herbe, à l'inverse des Américains (Priolo et al., 2001). Les différences de flaveurs peuvent s'expliquer par la présence de métabolites secondaires des plantes dans les produits, ainsi que par des taux différents de matière grasse, de protéines et de minéraux (Croissant et al., 2007; Priolo et al., 2001; Schiano et al., 2017).

Enfin, les produits laitiers et carnés se dégradent naturellement avec le temps et l'exposition à la lumière. Afin de pouvoir conserver ces produits le plus longtemps possible, les industries agroalimentaires peuvent y ajouter des antioxydants. Cependant, les antioxydants chimiques peuvent présenter un risque pour la santé du consommateur, c'est pourquoi les industriels s'intéressent désormais aux antioxydants naturels (Kumar et al., 2015).

En effet, les antioxydants naturels permettent de maintenir la qualité de ces produits (Descalzo and Sancho, 2008; Van Aardt et al., 2005). Ces antioxydants peuvent être des protéines enzymatiques (catalase, glutathionne peroxydase, …), des protéines non enzymatiques (caséine, peptides, …), des vitamines (C et E), et de nombreux composés non protéiques (caroténoïdes, ubiquinols, polyphénols, thiols, …) (Castillo et al., 2013; Descalzo and Sancho, 2008). De nombreuses espèces botaniques sont riches en antioxydants, en particulier les lamiacées : Romarin, Origan, sauge, mélisse, menthe, thym (Figure 3)… ainsi que d'autre espèces observables aux abords des prairies comme l'aubépine (*Crataegus monogyna*) ou la ronce (*Rubus ulmifolius*) (Kumar et al., 2015). Cependant, seulement 2% de la vitamine E consommée par les vaches se retrouve dans le lait. Il est donc nécessaire que le bétail consomme de grandes quantités de fourrage riche en vitamine E pour avoir un effet sur la qualité du lait (Castillo et al., 2013).

[1] Pour des raisons de gestion du temps, la qualité organoleptique n'a pu être prédite dans la présente thèse. Elle sera étudiée plus tard, lors du projet d'étude des prairies permanentes du massif vosgien.

Figure 3 Le thym (Thymus pulegioides), espèce riche en composés phénoliques et antioxydants (Kumar et al., 2015)

Enfin, les choix de gestion de l'agriculteur affectent aussi la qualité des produits, en particulier la sélection des espèces et races au sein du troupeau. La composition du lait diffère entre races de chèvres (Soryal et al., 2005) et de vaches (Soyeurt et al., 2006), bien que la ration reste constante. Ainsi, certaines races produisent un lait plus favorable à la transformation en fromage grâce à leur potentiel coagulent (Penasa et al., 2014) ou à leur couleur (Watson and Ferguson, 1936). De même, la qualité de la viande diffère en fonction des races (Chambaz et al., 2003), ce qui pourrait être lié à la précocité des races (Mezgebo et al., 2017). Enfin, Warren et al. (2008) ont montré que l'interaction de la race et de la ration alimentaire permet de déterminer la qualité de la viande : une ration à base d'herbe produit une viande avec un ratio entre acides gras polyinsaturés et saturés plus favorables, en particulier chez les bovins de race Holstein. Cependant, la ration alimentaire est un déterminant de la qualité du lait plus importante que la race (Ferlay et al., 2011).

Farruggia et al. (2008) mettent aussi en avant l'importance des modes de conservation du fourrage et des conditions environnementales dans la concentration en métabolites secondaires des fourrages de prairies permanentes. De même, le stade de développement de la végétation joue un rôle majeur dans la valeur organoleptique des fromages (Tornambé et al., 2010). Ces critères pourraient même être plus importants que la composition botanique de la prairie.

L'impact de la composition botanique des prairies sur la flaveur des produits carnés et laitiers étant difficile à estimer (Larick et al., 1987), il n'est pas possible d'estimer l'impact de l'intensification des prairies. Cependant, on peut supposer qu'une forte intensification des pratiques engendre une perte de diversité et d'abondance des dicotylédones, et donc une diminution de la qualité organoleptique des produits.

Les AOP (Appellation d'Origine Protégée) sont une reconnaissance au niveau européen des liens entre pratiques agricoles, milieu naturel, savoir-faire et qualité des produits. Sur le massif vosgien, le Munster (ou Munster-Géromé) a obtenu cette appellation. Il s'agit d'un fromage au lait de vache, à pâte molle et à croute lavée, fabriqué depuis le VIIème siècle en Alsace et Lorraine. Afin de conserver un goût particulier, lié à la végétation prairiale, les vaches doivent pâturer au moins 150 jours par an et l'herbe représenter au moins 40% de leur ration moyenne.

Cependant, l'aire géographique de l'AOP Munster s'étend bien au-delà du massif vosgien, allant jusqu'à la ville de Neufchâteau pourtant située à plus de 80km des limites du massif. De même, la règlementation sur les races de vaches est souple alors qu'il existe une race locale, la Vosgienne. Des éleveurs se sont alors regroupés pour créer le fromage Cœur de massif, composé d'au moins 80% de lait de Vosgienne provenant d'une aire géographique resserrée sur le massif vosgien.

D. Santé animale

Les études montrent aujourd'hui que le pâturage est bénéfique au bien-être animal (Arnott et al., 2017). Il permet la diminution de nombreuses maladies telles que les boiteries, les mammites, les maladies respiratoires et certaines parasitoses externes favorisées par l'ambiance chaude et humide des étables l'hiver. Le pâturage est aussi source de risques sanitaires spécifiques, en particulier l'infestation par des parasites internes ou les maladies transmises par les arthropodes tels que les mouches ou les tiques (Bareille et al., 2019). Le foin peut aussi présenter des risques pour la santé : une humidité trop élevée lors de la fenaison augmente la teneur en moisissures et toxines, pouvant créer des problèmes respiratoires (Séguin et al., 2010). Ces aspects ne sont pas directement influencés par les prairies elles-mêmes, et ne seront donc pas développés.

Cependant, une partie des maladies sont directement dues à la végétation et/ou à la gestion des prairies. Par exemple, l'ingestion au pâturage d'une herbe trop jeune peu concentrée en minéraux comme le magnésium peut induire des tétanies d'herbage et météorisations spumeuses, et l'ingestion de certaines bactéries peut développer des entérotoxémies. Ces trois maladies sont des urgences vitales pour les animaux. Enfin, une dizaine de plantes toxiques peuvent mener à des intoxications mortelles, mais ces espèces sont souvent de faibles appétences et consommées principalement lorsque le bétail manque de fourrage (Bareille et al., 2019).

Les métabolites secondaires peuvent être une source de molécules pharmaceutiques améliorant la santé du troupeau, respectueuse de l'environnement et facilement accessible à moindres coûts. Les prairies permanentes produisent un riche cocktail de métabolites secondaires, principalement liés à la présence de dicotylédones (Poutaraud et al., 2017). Les prairies gérées de façon extensive, et donc généralement avec une plus grande part de dicotylédones, produisent donc un cocktail de métabolites secondaires plus complexe et en plus forte dose. Cependant, les effets de ces cocktails sont aujourd'hui encore méconnus : la combinaison de très nombreuses molécules peut avoir des répercutions inattendues (synergie, addition ou antagonisme) (Poutaraud et al., 2017). Les métabolites secondaires en lien avec la santé les plus connus sont les tanins et les antioxydants.

Les tanins

Souvent utilisés pour lutter contre les parasites intestinaux des animaux d'élevage, les tanins condensés font partie des nombreux métabolites secondaires (Poutaraud et al., 2017).

Cependant, des études récentes amènent à nuancer l'effet des tanins. La chicorée est par exemple une espèce souvent utilisée comme source de tanin pour le bétail, mais l'effet de la chicorée dépend des cultivars et des parasites ciblés. De plus, il reste difficile de différencier l'effet des tanins de l'effet des lactones sesquiterpéniques (Williams et al., 2016). De même, le sainfoin permet de lutter contre les nématodes (Figure 4), alors que le caroubier, lui aussi riche en tanin, a un effet très limité. Cette différence peut-être due à la quantité ou à la qualité des tanins, mais aussi des autres métabolites secondaires (Arroyo-Lopez et al., 2014).

Les antioxydants

Le stress oxydatif est un phénomène naturel, qui a lieu au sein des cellules. Il est dû à un déséquilibre entre molécules prooxydantes et antioxydantes (Rahal et al., 2014). La consommation d'antioxydants permet donc d'aider à rétablir l'équilibre au sein des cellules. Les antioxydants peuvent être de différentes formes, les composés phénoliques en compose une grande partie (Poutaraud et al., 2017).

La majorité des études s'est concentrée sur les antioxydants provenant d'une seule espèce floristique. Par exemple, parmi les espèces observables en prairie, le liondent (*Léontodon hispidus*), les thyms (*Thymus* sp., Figure 3) ou encore l'ortie (*Urtica dioica*) ont été identifiés comme fortement concentrés en antioxydants ayant aussi des propriétés antibactériennes ou antifongiques (Ebrahimzadeh et al., 2010; Gülçin et al., 2004; Nabavi et al., 2015). Ici aussi, l'impact de la consommation de cocktails d'antioxydants par les animaux reste peu étudié, pourtant les concentrations et compositions en composés phénoliques varient selon la composition botanique des prairies (Butler et al., 2008; Reynaud et al., 2010) mais aussi en fonction de la saison avec une concentration maximale entre fin-mai et début-juin (Fraisse et al., 2007). De plus, certains métabolites secondaires montrent une toxicité, tels que la colchicine qui paralyse les terminaisons nerveuses et inhibe la division cellulaire (Winter et al., 2011) ou la ranunculine toxique pour le bétail au pâturage (Majak, 2001).

Enfin, l'effet cumulé des pratiques agricoles et de la composition botanique peut impacter la concentration en métabolites. Tout d'abord, à l'échelle de la communauté la fertilisation sélectionne les graminées moins riches en antioxydants, mais la fertilisation diminue aussi la teneur en antioxydants à l'échelle de l'espèce (Stumpf et al., 2019). De plus, le séchage de l'herbe détruit certains métabolites (Majak, 2001).

Les métabolites secondaires et antioxydants peuvent ensuite être transmis aux consommateurs de produits laitiers et carnés (Clausen et al., 2010; Sretenovic et al., 2007). Ils peuvent ainsi influencer la santé du consommateur, et modifier les propriétés organoleptiques des aliments.

*Figure 4 Le sainfoin (*Onobrychis viciifolia*), espèce reconnue pour sa teneur en tanins condensés (Arroyo-Lopez et al., 2014)*

E. Economie[2]

La valeur économique d'une prairie peut être approchée par le calcul des coûts de production et du potentiel de production. Cependant, de nombreuses méthodes ont été développées pour calculer les coûts de productions, et aucune ne semble aujourd'hui créer le consensus (Réseau Mixte Technologique Praires Demain, 2016). Les méthodes analytiques permettent de calculer le coût du fourrage, prenant parfois en compte le foncier, la main d'œuvre et/ou les aménagements parcellaires pour le pâturage (ex : Bayeur et al., 2013). La méthode « systémique » prend en charge l'ensemble des coûts de production (salaires, foncier, bâtiments, mécanisation, frais d'élevage, alimentation des animaux), divisé par les quantités de lait ou de viande vive produites. Enfin les méthodes « prix équivalence » permettent de comparer le fourrage à un mélange de paille, céréales et tourteaux apportant la même valeur alimentaire en terme d'énergie, d'azote et d'encombrement (Chambre d'Agriculture des Deux-Sèvres, 2018).

Les coûts de production peuvent être établis par hectare, par tonne de matière sèche, par tonne de protéine ou encore par calories. Ils sont dépendant des choix techniques de l'agriculteur, en particulier l'utilisation (pâturage et/ou fauche) et la fertilisation.

[2] Pour des raisons de gestion du temps, seule la production laitière potentielle a pu être prédite dans la présente thèse. Les coûts de production et les paiements pour services écosystémiques seront étudiés plus tard, lors du projet d'étude des prairies permanentes du massif vosgien.

Coût des pratiques agricoles

Le pâturage induit de faibles coûts de production (Delaby et al., 2017) : les exploitations basées sur l'herbe fraiche et apportant peu de concentrés ont donc des coûts de production moindres (Gazzarin et al., 2018). A l'inverse, Dale et al. (2018) ont montré que la production de lait de pâturage par hectare était maximisée à fort chargement (7,8 UGB/ha/an) avec une complémentation en concentrés, sans modifier la qualité du lait, mais la valeur réelle de ce chargement peut être abaisser en prenant en compte les hectares nécessaires à la production de concentrés (Delaby, 2014). Les coûts de production des fourrages fauchés sont variables selon les chantiers de récolte : foin et ensilage coûtent environ 200 €/ha, alors que l'enrubannage coûte 250 €/ha (Lépée, 2011). Enfin, le pâturage induit un risque parasitaire plus important que la consommation de fourrages conservés, pouvant se répercuter par une hausse des coûts de production et/ou une baisse de la production (Chauvin, 2009). Cependant, afin d'être plus représentatifs des besoins de l'agriculteurs, ces coûts par hectare devraient être calculés par tonne de matière sèche ou en fonction de la qualité du fourrage.

La fertilisation permet d'augmenter les rendements, mais aussi la qualité fourragère (Pontes et al., 2016; Schellberg, 1999). Cependant, produire de meilleurs rendements est ainsi lié à des coûts de productions plus élevés, dû au cout du fertilisant lui-même ainsi qu'à l'utilisation des engins agricoles. L'utilisation de fertilisants organiques tels que les fumiers et lisiers est moins couteuse que l'utilisation de fertilisants chimiques (Bayeur et al., 2013), mais à l'inverse les fertilisants organiques augmentent le risque parasitaire (Thamsborg et al., 1999) et donc peuvent indirectement augmenter les charges de prophylaxie de l'exploitation agricole et/ou diminuer la production.

Enfin, modifier la taille du troupeau impacte la rentabilité de l'exploitation agricole, mais aussi la prise de risque. Cependant, il n'existe pas de taille parfaite : la taille de troupeau la plus rentable et la moins risquée varie selon les courts du lait (Anderson and Ridler, 2017).

Valeur économique de la diversité floristique

Les prairies permanentes permettent des coûts de production faibles comparés aux prairies temporaires, aux prairies artificielles et au maïs, car elles ne nécessitent ni travail du sol, ni semence ou produits phytosanitaires (sauf dans certains cas particuliers, comme en cas de dégâts de sangliers ou de mulots). La diversité floristique des prairies permanentes peut être un atout car elle peut augmenter la production laitière sans affecter la qualité du lait (Totty et al., 2013; Woodward et al., 2013). Ceci peut être dû à la qualité fourragère : par exemple, l'herbe fraiche de demi montagne à une qualité légèrement supérieure à celle du raygrass anglais frais grâce à sa meilleure teneur en azote (INRA, 2010). Cependant, certaines espèces naturellement présentent dans les prairies peuvent être toxiques pour le bétail (Majak, 2001; Zhao et al., 2013) et donc induire une augmentation des charges de prophylaxie et/ou une diminution des rendements en lait et viande (Bourdôt et al., 2003).

De plus, les industriels vendent aujourd'hui du lait enrichi en divers éléments tels que les vitamine C, D et E, calcium, fer, … afin d'en améliorer la flaveur et/ou la qualité nutritionnelle (Kumar et al., 2015; Schiano et al., 2017). Les prairies permanentes peuvent permettre des produits carnés et laitiers plus riches en métabolites secondaires et en oligo-éléments, qui pourraient donc être valorisés par les industriels qui auront alors moins de compléments à ajouter. Cet intérêt des industriels pourrait se répercuter sur les prix d'achat du lait et de la viande.

Enfin, l'image de la prairie peut être utilisée comme preuve de qualité auprès du consommateur, et permet donc d'augmenter les volumes et/ou les prix de ventes. Par exemple, le concours Prairies Fleuries (Magda et al., 2015) est mis en avant par les agriculteurs l'ayant remporté, et les prairies sont souvent mises en avant par les agriculteurs et industriels commercialisant des produits labélisés (Appellation d'Origine Protégée, Indication Géographique Protégée, agriculture biologique, etc.) ou non.

Paiements pour Services Environnementaux

Pour finir sur la dimension économique, les Paiements pour Services Environnementaux (PSE) ont pour but de financer les agriculteurs pour les biens et services qu'ils rendent auprès de la ressource en eau, de l'érosion des sols, de la séquestration du carbone, de la conservation de la biodiversité et de la préservation du paysage (Bureau, 2010). Ainsi, dans les exploitations agricoles les prairies et haies, toutes deux fortement liées à l'élevage, peuvent y prétendre. Cependant, l'identification des services rendus et leur quantification monétaire reste difficile bien qu'elle soit indispensable à toute démarche de PSE.

Les PSE ont été concrètement mis en place à la fin des années 80 en Union Européenne, au travers des Mesures Agri-Environnementales (MAE). Les MAE climatiques « Prairies Fleuries » financent les agriculteurs dont les parcelles permettent le développement de plantes à fleurs ciblées. Le financement s'élève à 66,01 €/ha/an (Préfecture de l'Isère, 2015), arrondi à 66 €/ha/an sur le massif vosgien. Autre exemple, les MAE climatiques « Systèmes Herbagers et Pastoraux » se calculent non pas selon une prairie, mais selon divers critères à l'échelle du système agricole de l'exploitation : chargement, surface en prairies permanentes, absence de traitement phytopharmaceutique, et présence d'espèces floristiques ciblées. La rémunération s'élève ici entre 57 et 115 €/ha/an à l'échelle nationale (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2014), et autour de 80 €/ha/an sur le massif vosgien.

Le carbone stocké dans les sols agricoles pourrait aussi être financé. Hungate et al. (2017) ont estimé qu'une méga tonne de carbone pourrait couter 137,26 $. Etant donné qu'il existe une corrélation positive entre carbone stocké et biodiversité (Binder et al., 2018) il est possible de calculer cette rémunération à l'espèce botanique, qui varierait donc entre 11,10 et 805 $ selon la diversité de la prairie (Hungate et al., 2017).

2.5. Des compromis à faire entre propriétés prairiales

Comme nous avons pu le voir dans les paragraphes précédents, il existe des synergies (ex : diversité floristique et qualité gustative des produits) et des antagonismes (ex : diversité et productivité) entre les propriétés agroécologiques des prairies. Il ne semble donc pas possible de cumuler toutes les différentes propriétés sur une même prairie, ce qui se traduit donc par la nécessité de faire des compromis (Figure 5).

Biodiversité et rendement sont généralement opposés car dans un même milieu, fertiliser une prairie pour augmenter son rendement se traduit généralement par une perte de biodiversité (Borer et al., 2017; Melts et al., 2018). Par contre, fertiliser une prairie permet souvent d'améliorer sa qualité fourragère, en particulier la teneur en protéine et la digestibilité (Pittarello et al., 2018; Schellberg, 1999) : l'augmentation de la qualité fourragère est liée à l'impact de la fertilisation sur la teneur en protéine des espèces fourragère en place, mais aussi à la sélection d'un cortège de graminées plus tolérants à la fertilisation que la majorité des dicotylédones.

Cependant, des notions supplémentaires peuvent être prises en compte dans la définition de la qualité fourragère (Magda et al., 2015). Par exemple, les prairies diversifiées sont plus propices à la production de produits laitiers et carnés goûtus et favorables à la bonne santé du consommateur et du bétail (Croissant et al., 2007; Kumar et al., 2015), et permettent plus de souplesse dans le choix de la date d'utilisation (Cruz et al., 2010).

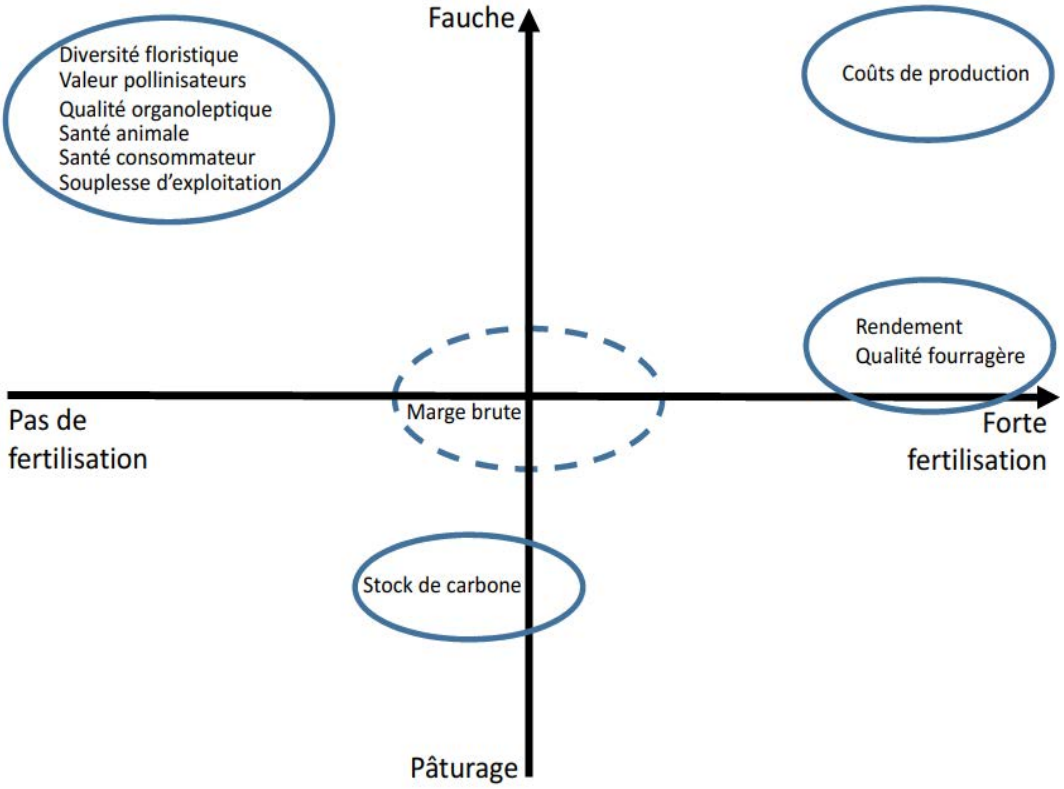


Figure 5 Synergies et antagonismes entre les propriétés prairiales

Les prairies dont la composition floristique est diversifiée ont souvent une part importante de plantes à fleurs, favorables aux insectes pollinisateurs (Garrido et al., 2019; Griffin et al., 2017). De plus, ces prairies semblent aussi positivement corrélées au stock de carbone dans le sol (Binder et al., 2018), lui-même lié à la diversité des macro et microorganismes du sol (Edwards, 2004). Cependant, la diversité floristique n'est pas seulement dépendante de la fertilisation, mais aussi de l'équilibre entre fauche et pâturage et de l'acidité du sol (Gaujour et al., 2012; Lanta et al., 2009). De même, le stock de carbone est favorisé par les retours de matières organique à la prairie, qui peuvent être réalisé par le pâturage ou par une fertilisation à base de fumier (Don et al., 2009), tant que la prairie n'est pas dégradée par le surpâturage (Wang et al., 2011).

Enfin, les coûts de production sont maximisés par la fertilisation, surtout si elle est d'origine chimique, et par la fauche (Bayeur et al., 2013; Delaby et al., 2017). Cependant, de forts coûts de production ont pour objectifs d'améliorer la quantité et la qualité des rendements, il est donc difficile d'estimer une marge brute qui serait la différence entre le prix de vente et les coûts de production. En effet, le prix de vente peut être maximisé par un taux butyreux du lait élevé ou une bonne note de l'état carcasse liés à une alimentation de bonne qualité, mais aussi par la

production d'un fromage ou d'une viande de bonne qualité gustative liés à des prairies diversifiées (Kumar et al., 2015; Schiano et al., 2017). De plus, la marge brute peut être améliorée par diverses aides incitant l'agriculteurs à protéger la biodiversité comme les Mesure Agro-Environnementales (MAE) ou l'arrivée potentielle de nouveaux Paiements pour Service Environnementaux (PSE) rémunérant le stockage de carbone. Ces aides seront ainsi liées à une composition floristique diversifiée, et donc à des pratiques plutôt extensives (Bureau, 2010).

2.6. Des outils de prédiction des propriétés à perfectionner

Les outils de prédiction des propriétés peuvent prendre diverses formes : modèles informatiques, typologies, etc… Cependant, prédire les propriétés agroécologiques nécessite tout d'abord d'évaluer les acquis des destinataire (en particulier les agriculteurs) et leurs attentes. Les différentes formes d'outils permettent de répondre à différentes attentes des agriculteurs et des conseillers : elles sont donc complémentaires les unes des autres et aucune ne peut prétendre être parfaite. Pour cela, il faut se questionner sur les méthodes utilisées par les agriculteurs pour estimer les propriétés de leurs prairies, leurs attentes vis-à-vis des prairies, et sur la réponse que les outils peuvent leur apporter.

2.6.1. L'estimation des propriétés par les agriculteurs

Réussir à prédire les propriétés agroécologiques des prairies et leurs compromis est le but premier des outils, mais il est essentiel que ceux-ci soient adaptés aux agriculteurs pour pouvoir être utilisés correctement et régulièrement. Pour cela, la première étape de création est d'évaluer les acquis et les attentes des futurs utilisateurs de ces outils, afin de leur transmettre les informations dont ils ont besoin de façon claire et ergonomique.

La définition des « services écosystémiques » faisant débat dans le monde scientifique (Wallace, 2007), ce concept reste difficile à comprendre et appliquer pour les agriculteurs et les décideurs (Lamarque et al., 2011). En effet, la perception des services rendus par un milieu dépend par exemple de la localisation des personnes interrogées, et les services les moins visibles (pollinisation et qualité du sol par exemple) sont souvent sous-évalués.

Les agriculteurs adaptent leurs pratiques agricoles pour valoriser les propriétés qui leurs sont importantes, et le choix des propriétés importantes dépend de la situation de chacun. Les propriétés socio-économiques (faibles coûts de production, faible charge de travail) et agronomiques (santé et fertilité du troupeau) peuvent être valorisées par le pâturage. Cependant, d'autres agriculteurs utilisent la fauche pour des arguments similaires : augmentation de la production de lait et baisse du temps d'entretien des prairies (Becker et al., 2018; Frappat et al., 2012). Ces différences dans l'évaluation de l'impact des pratiques sur les propriétés agroécologiques dépendent de la part de pâturage dans les système de production de chaque agriculteur, mais aussi des modes de production : biologique ou conventionnel, transformation à la ferme ou vente en coopérative (Becker et al., 2018; Dobremez et al., 2015; Frappat et al., 2012; Lessire et al., 2019; Michaud et al., 2008). Enfin, la vision de la qualité du fourrage diffère entre les besoins de chaque éleveur : une fauche précoce peut être vue comme un avantage car riche en protéine et permet de meilleurs rendements, mais une fauche tardive peut être vue comme intéressante car fournissant beaucoup de fibres (Dobremez et al., 2015). Isaac et al. (2017) ont par ailleurs montré que certains agriculteurs, en particulier ceux de petites exploitations agricoles, utilisaient la variation des traits foliaires pour estimer les contraintes

environnementales qui s'exercent sur leurs cultures, comme un manque de nutriment ou de luminosité.

Outre les aspects économiques des prairies, les agriculteurs ont aussi de plus en plus conscience de l'aspect écologique et paysager (Lessire et al., 2019). Les prairies sont par exemple associées à l'identité régionale et à une bonne image auprès des consommateurs, surtout dans les régions profitant de labels AOP (Frappat et al., 2012; Michaud et al., 2008). Certains aspects de la biodiversité peuvent être perçu comme favorables à l'agriculture. La diversité floristique peut permettre la production d'un foin favorable à la bonne santé du troupeau (Frappat et al., 2012), et les passereaux, rapaces et chiroptères peuvent permettre de lutter contre les insectes et certains ravageurs vertébrés (Kross et al., 2017). D'autres aspects de la biodiversité peuvent être perçus comme néfastes à la production agricole, par exemple l'abandon des prairies permanentes est particulièrement fort dans les régions où la crainte du loup est importante (Hinojosa et al., 2018). Frappat et al. (2012) ont noté que les agriculteurs parlent assez peu de biodiversité et de séquestration de carbone par eux même, ce qui semble montrer un manque de connaissance ou d'intérêt pour ces problématiques. Pourtant, certains agriculteurs sont capables d'évaluer avec fiabilité la qualité des sols, en utilisant des critères comme la végétation spontanée, le développement de la culture et la couleur du sol (Lima et al., 2011), mais ces approches semblent peut-être moins importantes pour le choix des prairies que des terres labourables. Enfin, de nombreux agriculteurs ont une vision négative des prairies permanentes. Elles sont souvent jugées peu productives, de faible valeur fourragère et trop fluctuantes entre les mois et les années, et sont associées à des pratiques agricoles arriérées, aujourd'hui révolues (Michaud et al., 2008).

Les prairies ont pu être classées selon les attentes des agriculteurs : ces prairies peuvent avoir des objectifs de production, de qualité fourragère, de pousse de printemps ou d'été, et/ou de diversité floristique (Dobremez et al., 2015). Mais ces observations ont aussi permis de mettre en avant les limites des prairies perçues par les exploitants agricoles (Frappat et al., 2012) : le besoin de s'adapter en permanence à la vitesse de pousse et à la taille du cheptel, l'insécurité des rendements face aux aléas climatiques par rapport au maïs, et le manque d'accompagnement. Les éleveurs peu engagés dans le pâturage sont peu documentés sur le sujet, et les éleveurs herbagés sont à la recherche de plus de documentation telles que les bulletins de pousse de l'herbe, les sommes de températures, ou l'organisation de groupes de discussions.

Communiquer sur les avantages des prairies permanentes et accompagner techniquement semble donc être à la fois une demande des éleveurs et des naturalistes qui souhaitent conserver des prairies diversifiées. En effet, les agriculteurs qui tentent de développer des pratiques plus favorables à la biodiversité ont souvent des difficultés à obtenir les résultats attendus, car les solutions diffèrent entre parcelles (Wezel et al., 2018), et les agriculteurs sensibilisés ont tendance à mieux protéger la biodiversité (Kross et al., 2017). Les typologies de prairies sont des outils qui peuvent permettre une évaluation rapide des propriétés agroécologiques des prairies, utilisables par les agriculteurs et leurs conseillers agricoles ou naturalistes.

2.6.2. De nombreux outils existent mais restent incomplets

Des modèles ont été développés afin de prédire la production de biomasse (Magiera et al., 2017; Pulina et al., 2018) ou la composition botanique (Amiaud et al., 2005; Clark et al., 2019) des prairies. Cependant, ces modèles sont souvent incomplets : ils peuvent être construits sur un

trop petit nombre de critères prédictifs ou de mauvais critères prédictifs (Stouffer, 2019), et peu de modèles prédisent à la fois les propriétés agronomiques et écologiques, nécessaires à la prédiction de leurs interactions (van Oijen et al., 2018). De plus en plus de propriétés sont à prédire avec les nouvelles découvertes scientifiques, et les modéliser demande d'important jeux de données pour pouvoir créer le modèle et le vérifier. Enfin, l'utilisation de modèles peut s'avérer compliquée s'il n'y a pas d'interface Homme-machine ergonomique simplifiant la prise en main des modèles.

Afin de simplifier la prise en main des modèles, des outils ont été développés. Par exemple, Herb'type © (Duru et al., 2010) permet la prédiction de la productivité, de la digestibilité, de la temporalité (temps de repousse) et de la souplesse d'exploitation (la possibilité de faire varier les dates de récolte sans impacter la qualité) grâce à des connaissances simplifiées en botanique.

Enfin, l'une des limites de ces outils est qu'ils ne permettent généralement la prédiction que d'un type de propriété à la fois, or l'estimation des propriétés agronomiques et écologiques est nécessaire pour conseiller au mieux les agriculteurs. Les typologies sont des outils facilement utilisables par les agriculteurs et leurs conseillers, et pouvant estimer une grande variété de propriétés agronomiques et écologiques en peu de temps.

2.6.3. Les typologies : des outils simples et polyvalents

A. Les typologies, quésaco ?

Une typologie est une classification, qui regroupe les individus semblables au sein de types. Les typologies permettent « *d'organiser et de synthétiser les connaissances sur des objets d'étude souvent complexes et variés, en vue de les analyser et de les décrire simplement* » (Michaud et al., 2013). Les typologies créent donc des catégories à partir de gradients continus difficilement analysables (Caves et al., 2018; Jraissati, 2014).

Il est souvent possible de classer un ensemble d'individus selon différents critères, qui mèneront donc à différents types. Ces critères sont à sélectionner lors de la création de la typologie, afin d'obtenir des types utiles à l'analyse à réaliser. Par exemple, des voitures peuvent être classées selon leur couleur, leur utilisation ou leur nombre de passagers (Figure 6) : toutes ses typologies sont valables, mais seront utiles dans des circonstances différentes.

Les typologies des prairies permettent de rendre compte de la diversité de la végétation, et des propriétés (ou « services rendus ») des prairies (Michaud et al., 2013). Elles rassemblent les prairies dont la composition botanique est semblable, et qui sont donc souvent soumises aux même contraintes environnementales telles que le milieu naturel et les pratiques agricoles. Ces prairies ayant des compositions botaniques similaires, elles ont aussi des propriétés agronomiques (rendement, qualité fourragère) ou écologiques (diversité floristique, valeur pour les pollinisateurs) similaires (ex : Bayeur et al., 2013; Collectif, 2006; Ferrez et al., 2017; Launay et al., 2011).

Les typologies des prairies permanentes peuvent être divisées en trois catégories principales : les typologies phytosociologiques, agronomiques et fonctionnelles. Chaque catégorie utilise une méthodologie propre, permettant de répondre à des problématiques différentes.

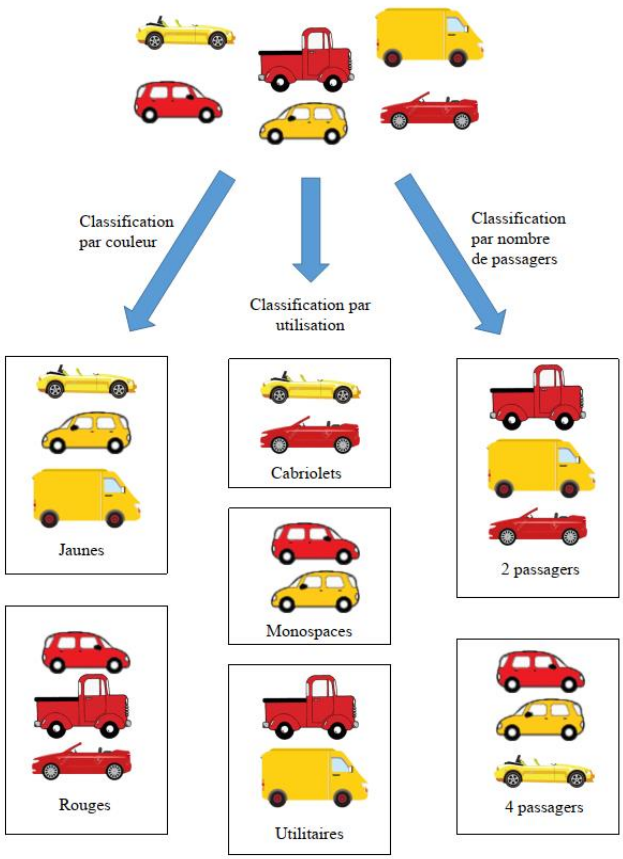


Figure 6 Exemple de typologie de la vie courante

B. Les typologies phytosociologiques

Depuis le début du XXème siècle, les naturalistes utilisent la phytosociologie selon la méthode de Braun-Blanquet pour classifier les communautés végétales. Les types phytosociologiques sont arrangés dans un système hiérarchisé, et leurs noms suivent des règles scientifiques établies. Ainsi, la phytosociologie peut être appliquée à toutes les communautés végétales, à l'échelle globale (Dengler et al., 2008).

Le développement d'une typologie phytosociologique nécessite de fortes connaissances en botanique car toutes les espèces doivent être identifiées, et un coefficient d'abondance-dominance leur est attribué (Braun-Blanquet, 1964). Pour être utilisée, la typologie nécessite encore de bonnes connaissances botaniques, mais une prairie peut être classée en moins d'une heure.

L'objectif premier des classifications phytosociologiques est de caractériser la composition botanique d'une communauté végétale, mais elles peuvent aussi être utilisées pour prédire des propriétés agronomiques telles que la qualité fourragère (Petrovic et al., 2013).

Plus récemment, de nouvelles approches phytosociologiques se sont développées. La phytosociologie synusiale par exemple permet de mieux prendre en compte les différentes strates de la végétation (Gillet et al., 1991), alors que l'approche numérique permet de créer des regroupements de végétations sans se limiter aux syntaxa (types phytosociologiques)

précédemment décrits par la communauté scientifique (Dengler et al., 2008). Cependant, dans cette thèse seule la phytosociologie telle que décrite par Braun-Blanquet sera utilisée.

C. Les typologies agronomiques

Afin de pouvoir prédire les propriétés agronomiques plus précisément que par la phytosociologie, les agronomes développent des typologies agronomiques depuis les années 1950. Ces typologies permettent d'estimer les rendements et la qualité fourragère des prairies, mais peuvent aussi être utilisées pour évaluer l'impact des pratiques agricoles sur le milieu (Michaud et al., 2013). De nombreuses typologies agronomiques ont déjà été développées en France et dans certains pays limitrophes : l'une des premières typologies agronomiques françaises s'applique aux prairies des Alpes du Nord (Bornard and Dubost, 1992) et une typologie plus récente est utilisable à l'échelle de toute la France (Launay et al., 2011).

Des relevés de végétation aussi exhaustifs que possible sont souvent nécessaires à la création des typologies, ainsi que l'abondance précise de chaque espèce (Diquélou et al., 2003). Il est utile de réaliser des analyses agronomiques pour connaitre le rendement et la qualité fourragère des prairies, et une connaissance des pratiques agricoles permet de comprendre les liens entre pratiques et propriétés. Une fois développées, ces typologies peuvent souvent être utilisées sans connaissances botaniques mais demandent alors de connaitre les pratiques agricoles, ce qui nécessite un entretien avec l'agriculteur.

Ces typologies ont été développées pour prédire les propriétés agronomiques des prairies, mais les typologies les plus récentes permettent aussi d'estimer des propriétés écologiques telles que la richesse spécifique, la valeur patrimoniale et la valeur pollinisateurs (Hulin et al., 2011; Launay et al., 2011).

D. Les typologies fonctionnelles

A partir des années 1990, les écologues ont expliqué le fonctionnement des prairies non pas grâce à la taxonomie, mais grâce aux traits fonctionnels (Lavorel and Garnier, 2002; Mouillot et al., 2013; Violle et al., 2007). Les agronomes ont ensuite utilisé ces connaissances pour développer des classifications fonctionnelles des principales graminées (Cruz et al., 2010; Durante et al., 2012) ou plantes diverses (Theau et al., 2017).

Pour utiliser ces typologies, il est tout d'abord nécessaire de classifier des espèces selon leurs traits fonctionnels. Ensuite, des relevés botaniques permettent de connaitre la proportion de chaque espèce classée, et ainsi d'en déduire le type de la prairie. Ainsi, pour classer les prairies, il suffit de savoir identifier les quelques espèces classées et d'estimer leur abondance relative.

Les typologies fonctionnelles ont initialement été développées pour estimer les propriétés agronomiques telles que le rendement, la qualité fourragère, la précocité ou encore la souplesse d'exploitation (Cruz et al., 2010). Mais les traits fonctionnels permettent aussi d'améliorer la prédiction de services écosystémiques (Carol Adair et al., 2018; Lavorel, 2013) et la réponse des communautés végétales aux changement environnementaux (Lavorel and Garnier, 2002; Nock et al., 2016).

3. Objectifs, hypothèses et organisation du manuscrit

L'analyse de la bibliographie montre que de nombreux critères liés au milieu et aux pratiques agricoles peuvent permettre de prédire les propriétés agroécologiques de praires. Cependant,

jusqu'à présent la majorité des études n'a tenté de prédire que quelques propriétés, généralement soit agronomiques soit écologiques, et peu d'études prennent en compte une grande diversité de milieux et de pratiques agricoles.

Les objectifs scientifiques de cette thèse sont d'identifier les critères permettant de prédire les propriétés agroécologiques des prairies du massif vosgien, et les compromis entre propriétés. Ils visent à mieux comprendre comment le milieu et les pratiques agricoles influencent la végétation des prairies, puis comment cette végétation s'exprime au travers des propriétés agronomiques et écologiques. Ces résultats seront ensuite utilisés à des fins technico-économiques, afin de développer un outil d'aide à la médiation utilisable à la fois par les agriculteurs et leurs conseillers agricoles et écologues.

Face à la multitude de propriétés étudiables, je me suis concentré sur les propriétés agroécologiques ayant démontré leur importance lors de précédentes études. Ces propriétés doivent aussi être quantifiables suffisamment rapidement pour être étudiées pendant la thèse. Je ne me suis donc par exemple pas intéressé aux services culturels fournis par les prairies, bien que les paysages ouverts soient caractéristiques des sommets vosgiens et de forte attractivité sur le plan touristique.

La question principale de ce travail de thèse est :

Comment prédire les propriétés agroécologiques des communautés prairiales et comprendre leurs interactions ?

Cette question peut se décomposer en plusieurs parties (Figure 7)

- Q1a : Comment les pratiques agricoles et le milieu permettent de prédire la végétation des prairies du massif vosgien ?

Les pratiques agricoles et le milieu sélectionnent la composition botanique, mais tous les critères prédictifs n'ont pas la même importance. Il est donc nécessaire d'identifier les critères permettant au mieux de prédire la composition botanique des prairies permanentes.

Les hypothèses sont que la composition botanique est principalement déterminée par des variables liées au milieu (l'humidité, la température et l'acidité du sol) et aux pratiques (fertilisation et nombre d'utilisation).

- Q1b : Quelles connaissances de la végétation, des pratiques agricoles et du milieu permettent la prédiction des propriétés agroécologiques des prairies permanentes ?

Les pratiques agricoles et le milieu sélectionnent la composition botanique, qui s'exprime à travers les propriétés agroécologiques. Pouvoir estimer directement les propriétés depuis les connaissances du milieu et les pratiques permettrait de simplifier l'estimation par les non-botanistes, alors que l'estimation des propriétés uniquement avec les connaissances de la flore répondrait mieux aux attentes des naturalistes.

L'hypothèse est qu'il est préférable d'utiliser à la fois la connaissance de la composition botanique, du milieu et des pratiques pour permettre la meilleure prédiction possible des propriétés agroécologiques des prairies permanentes.

- Q2 : Parmi les différentes méthodes de typologie de la végétation prairiale (phytosociologie, agronomique et fonctionnelle), quelle(s) méthode(s) ou combinaison(s) de méthodes permet(tent) d'estimer les propriétés agroécologiques des prairies ?

L'utilisation de modèles statistiques incluant le milieu, les pratiques et la composition botanique peut être difficile à prendre en main. Les typologies peuvent alors être utilisées pour estimer plus simplement des propriétés agroécologiques. Cependant, chaque typologie répond à des objectifs différents, par des méthodologies propres. Les hypothèses sont que la phytosociologie permet de bien prédire les propriétés écologiques, et la typologie agronomique permet de prédire les propriétés agronomiques. La typologie fonctionnelle pourrait être combinée aux approches précédentes afin d'améliorer la prédiction des propriétés prairiales.

- Q3 : Les différentes propriétés agronomiques et écologiques sont-elles synergiques ou antagonistes ? Ou, autrement dit : est-il possible que la production de la prairie réponde aux attentes de l'éleveur en termes de quantité et de qualité fourragère, tout en maintenant la qualité écologique ?

Il est généralement admis que propriétés agronomiques et écologiques sont antagonistes. En effet, rendements et qualités fourragères sont souvent dus à une forte fertilisation et à une utilisation précoce de la prairie, qui nuisent à la diversité floristique. Cependant, il semble nécessaire de compléter cette équation par des propriétés désormais chères au grand public et aux agriculteurs. L'hypothèse est que la prise en compte de ces nouvelles propriétés agronomiques (santé animale et du consommateur, souplesse d'exploitation) et écologiques (valeur polinisateurs, stock de carbone) pourraient être favorisées par la biodiversité et donc créer de nouvelles synergies.

- Q4 : Comment transformer efficacement les connaissances scientifiques en conseils portés aux agriculteurs ?

Les agriculteurs utilisent parfois leurs prairies depuis de nombreuses années, et peuvent donc facilement comparer les rendements entre prairies. De même, l'abondance des plantes à fleurs, souvent considérée comme une preuve de diversité, est facilement observable par les agriculteurs. A l'inverse, la qualité fourragère des prairies est une notion plus abstraite, dépendante des attentes de l'agriculteur, estimable de la composition botanique mais qui nécessite parfois des analyses en laboratoire pour être précisément évaluée. L'hypothèse est que les typologies agronomiques de prairies permanentes sont des outils facilement utilisables, mais qui doivent être associés à d'autres outils pour répondre à toutes les attentes des agriculteurs et de leurs conseillers. Enfin, des propositions seront amenées pour permettre aux typologies de répondre au mieux aux attentes des différents acteurs de terrain, sur le fond comme sur la forme.

Le premier chapitre couvrira les question Q1a et Q1b, c'est-à-dire la prédiction de la végétation par les pratiques et le milieu, et la prédiction des propriétés agroécologiques par les pratiques, le milieu et la végétation. Le chapitre 2 répondra à la question Q2 à propos de la prédiction des propriétés agroécologiques par les typologies prairiales : ce chapitre est une traduction de l'article *Permanent grassland classifications predict agronomic and environmental characteristics well, but not ecological characteristics* publié dans la revue Ecological Indicators (Mesbahi et al., 2020). Le chapitre 3 s'intéressera à la question Q3 à propos de l'étude et de la prédiction des compromis et synergies entre propriétés agroécologiques. Enfin le

chapitre 4 répondra à la question Q4 sur la transmission des connaissances scientifiques aux acteurs de terrain. Pour finir, une partie Discussion permettra de discuter les résultats des précédents chapitres un à un, puis de confronter les résultats.

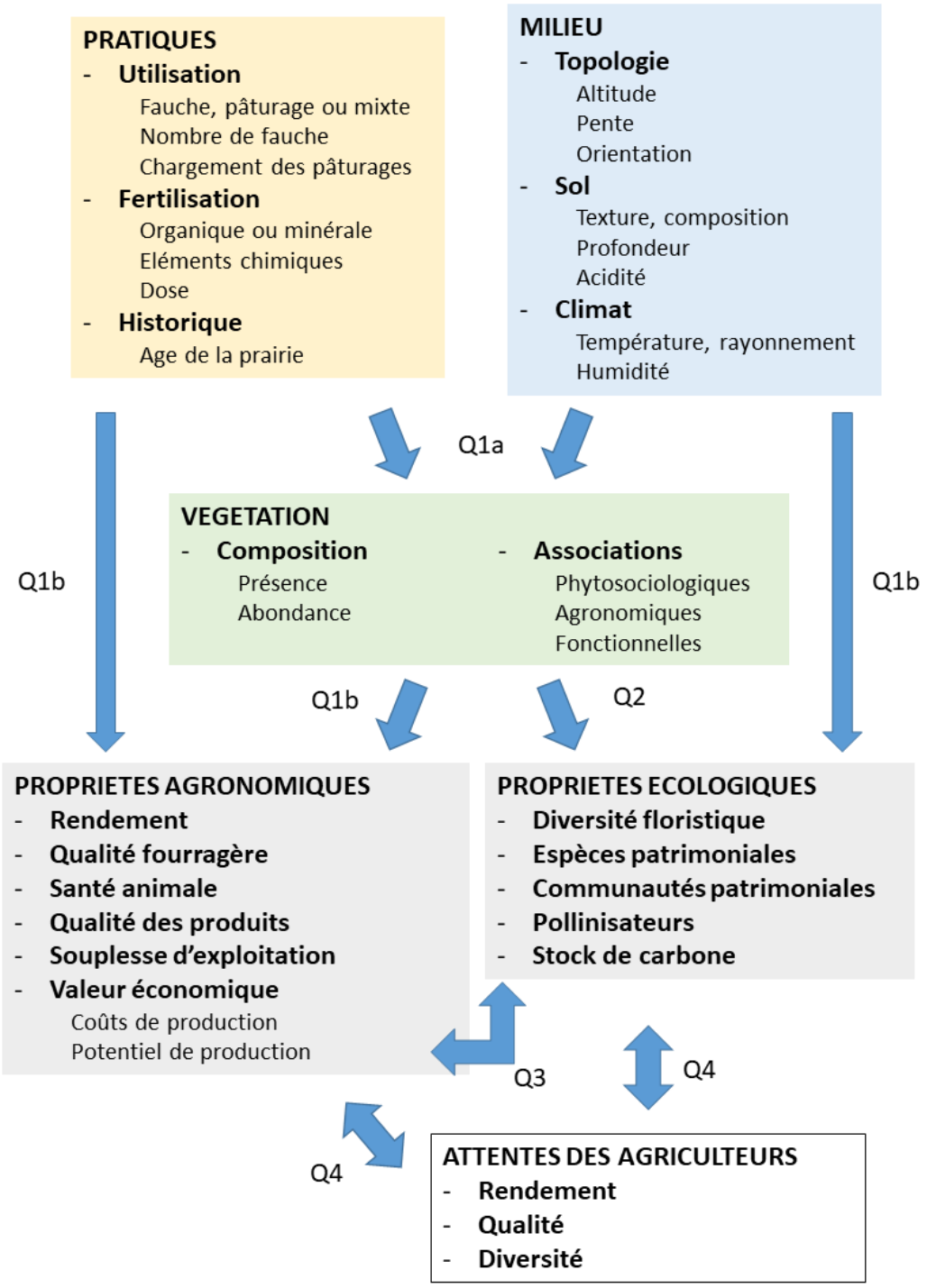


Figure 7 Résumé graphique de l'organisation générale de la thèse

MATERIELS ET METHODES GENERAUX

L'objectif de cette partie est de présenter les matériels et méthodes utilisés dans chacun des chapitres suivants, afin de ne pas répéter les éléments fondamentaux.

Le massif vosgien y sera tout d'abord présenté puis la collecte de données sera expliquée : quelles sont les données de précédentes études que j'ai pu valoriser et quelles nouvelles données j'ai dû collecter. Les protocoles de relevés botaniques, de collecte de fourrage et de sol, les détails sur les analyses fourragères, d'antioxydants et de sol, ainsi que l'enquête auprès d'agriculteurs seront présentés dans cette dernière partie.

Les analyses statistiques et les calculs des propriétés agroécologiques seront expliqués plus tard, dans les chapitres 1 à 4 propres à chaque étude.

1. Le massif vosgien

Les massifs français sont officiellement délimités par la loi Montagne, et une gouvernance spécifique leur est attribuée via les préfets de région coordonnateurs de massif et les commissaires à l'aménagement, au développement et à la protection du massif. Le massif vosgien est l'un des six massifs montagneux de France métropolitaine, auxquels s'ajoutent trois massifs ultra-marins.

Le massif vosgien, situé au nord-est de la France, recouvre 7360 km². Il compte 580 communes, s'étend sur sept départements appartenant à deux régions (région Grand-Est et région Bourgogne Franche-Comté) et accueille deux Parc Naturels Régionaux (Figure 8). La population du massif vosgien est de plus de 620.000 habitants, soit une moyenne de 84 habitants/km² : il s'agit du massif métropolitain le plus densément peuplé (Dobremez and Borg, 2015). Le massif est principalement occupé par la forêt (66,5 % de sa surface), les prairies permanentes et landes ne recouvrant que 11,1 et 0,6 % respectivement.

C'est un massif de moyenne montagne, s'élevant de 170 à 1424 m d'altitude, mais de nombreuses communes de la périphérie du massif s'apparentent plutôt à des situations de paysages collinéens (le tiers nord du massif n'excède pas les 600 m d'altitudes). Les températures mensuelles moyennes sont de -4 à +12°C, et la pluviométrie varie fortement (de 700 à 2300 mm/an) sous l'effet de complexes gradients longitudinaux, longitudinaux et altitudinaux. De manière générale, le versant ouest est plus humide car orienté vers l'océan, et le versant oriental est plus chaud et sec par l'effet Foehn (Ferrez et al., 2017).

La géologie y est aussi disparate. Le nord du massif est principalement gréseux, ce qui produit des sols sableux et acides, mais les franges nord-ouest et nord-est sont calcaires et donc basiques. Le sous-sol de la partie sud du massif est granitique et produit donc des sols acides et parfois très superficiels sur les crêtes (Ferrez et al., 2017).

Selon la loi Montagne, une partie du massif du Jura est officiellement rattachée au massif vosgien : le Jura alsacien. En effet, cette partie du massif du Jura se retrouve isolée du reste de la partie française du massif du Jura, et relativement proche du massif vosgien en terme de distance. Ce travail de thèse ne s'est que peu intéressé au Jura alsacien, principalement à cause du manque de contacts avec les acteurs de ce territoire et de la longueur des trajets pour y parvenir, ce qui aurait considérablement compliqué le travail. Cependant, le Jura alsacien présente une agriculture et une flore similaire au reste du massif vosgien, les résultats de cette thèse pourront donc, après vérification, y être appliqués.

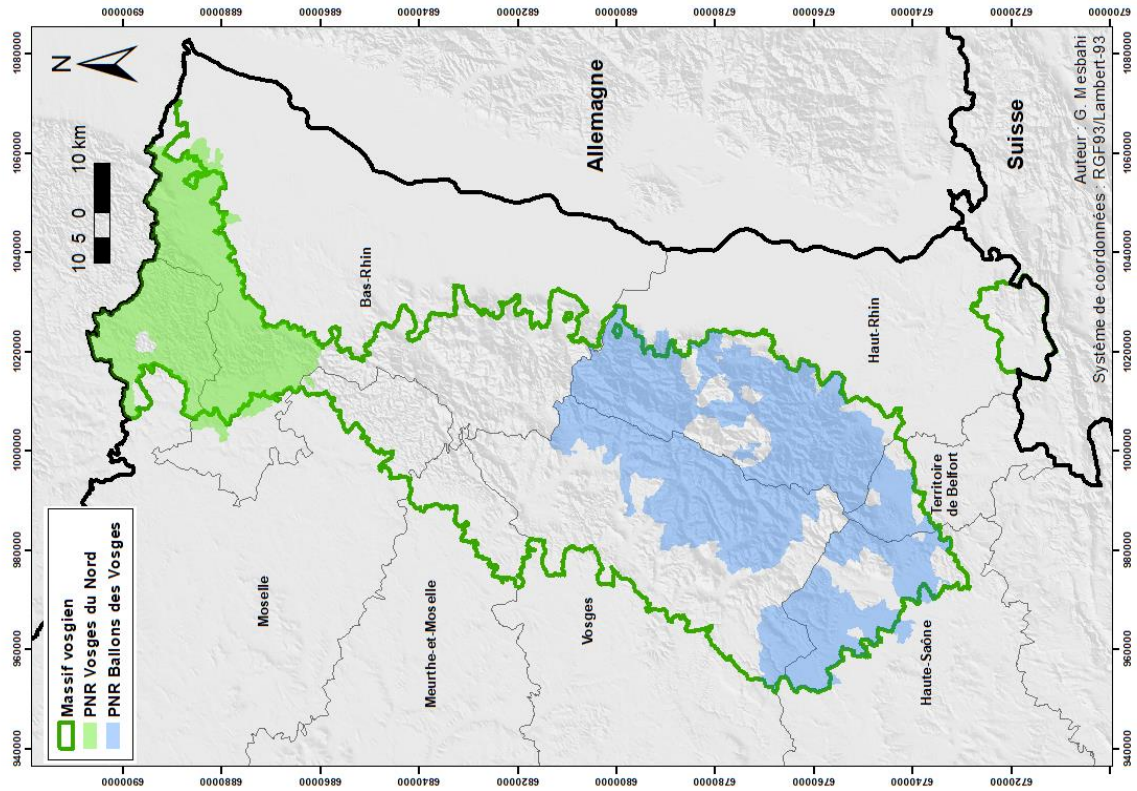


Figure 8 Carte des limites du massif vosgien et des Parcs Naturels Régionaux

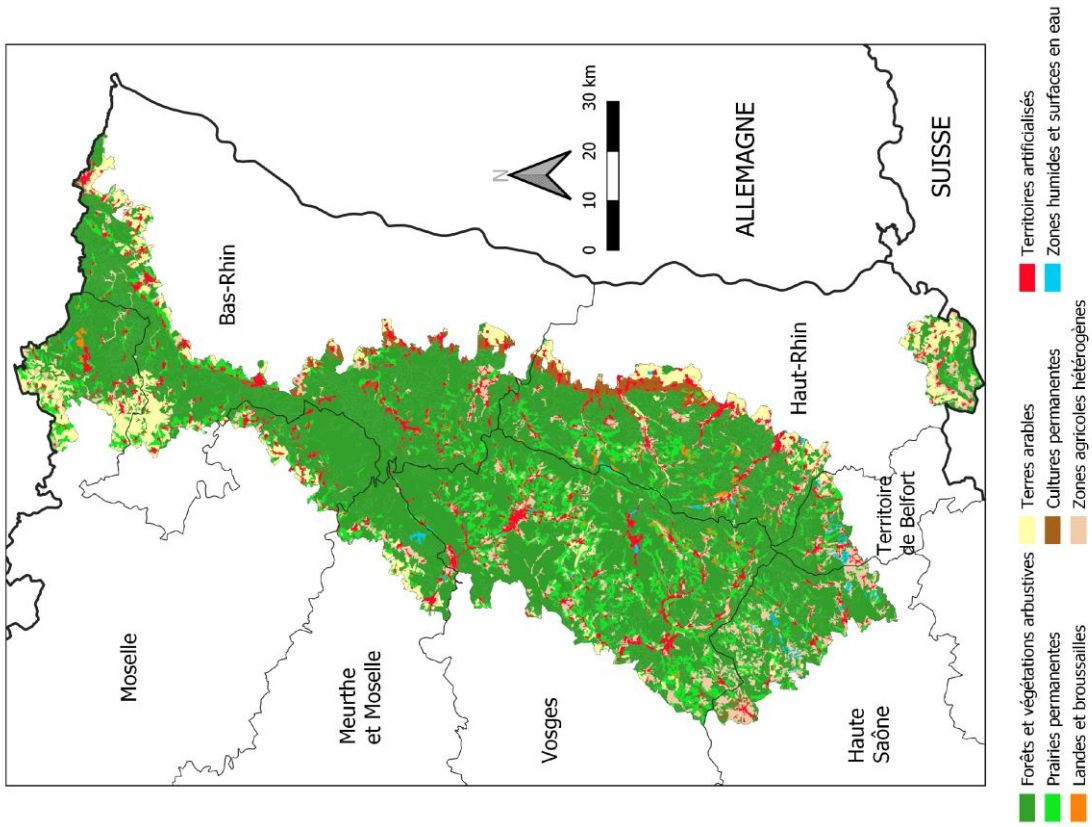


Figure 9 Carte d'occupation des sols, d'après la base de données Corine Land Cover (Copernicus, 2018)

2. Valorisation de données existantes

De nombreuses données ont déjà été collectées par le passé sur les prairies permanentes du massif vosgien, pendant plusieurs études ayant des objectifs plutôt agronomiques (Bayeur et al., 2013; Collectif, 2006) ou plutôt écologiques (Ferrez et al., 2017). Afin de recenser la diversité des prairies permanentes du massif vosgien, mais aussi la diversité des pratiques agricoles associées à ces prairies, j'ai rassemblé toutes ces données en un unique jeu de données : 796 prairies ont ainsi été recensées. J'ai pu lier toutes ces prairies à leur climat, sol et topographie grâce à des modèles cartographiques.

2.1. Relevés phytosociologiques

Un recensement phytosociologique des milieux ouverts naturels et semi-naturels du massif vosgien a été réalisé de 2015 à 2016 (Ferrez et al., 2017). Cette étude s'est intéressée aux prairies permanentes, mais aussi aux pelouses, landes, cariçaies, mégaphorbiaies et ourlets. 3247 relevés phytosociologiques ont été recensés sur le massif vosgien, dont 1479 réalisés en 2014 et 2015 par les Conservatoires Botaniques d'Alsace, de Lorraine et de Franche-Comté. Ces relevés phytosociologiques sont constitués de toutes les espèces vasculaires d'une unité de végétation homogène (25 à 100 m²).

Lors des relevés phytosociologiques, un coefficient d'abondance-dominance a été attribué à chaque plante de chaque relevé, selon la méthode de Braun-Blanquet (Braun-Blanquet, 1964) :

r : un individu
+ : éléments peu ou très peu abondants, recouvrement < 5% de la surface
1 : éléments assez abondant, recouvrement < 5% de la surface
2 : éléments très abondants, recouvrement < 25% de la surface
3 : recouvrement compris entre 25 et 50% de la surface, abondance quelconque
4 : recouvrement compris entre 50 et 75% de la surface, abondance quelconque
5 : recouvrement supérieur à 75% de la surface, abondance quelconque

Suite à une analyse statistique, ces relevés ont permis la création d'une typologie phytosociologique, constituée de 62 types dont 19 types de prairies, 11 types de pelouses et 5 types de landes. Cette typologie a été présentée dans un guide de terrain (Ferrez et al., 2017). Le guide décrit principalement la composition et la dynamique de la végétation, ainsi que les conditions environnementales (Annexe 1).

En m'appuyant sur l'expertise des Conservatoires Botaniques, j'ai retenu les 25 types phytosociologiques les plus pertinents vis-à-vis du sujet de ma thèse à l'échelle du massif (Annexe 2). Il s'agit de types semi-naturels présents dans les exploitations agricoles du massif vosgien, et présentant des enjeux agronomiques et/ou écologiques. Les 25 types sont composés de 568 relevés floristiques réalisés de 2008 à 2015, comportant 550 espèces botaniques vasculaires.

2.2. Données agronomiques

Deux typologies agronomiques et une part de la typologie nationale ont été réalisées sur le massif vosgien (Bayeur et al., 2013; Collectif, 2006; Launay et al., 2011).

Pour construire les typologies agronomiques, des relevés botaniques les plus exhaustifs possible sont nécessaires. Lors de ces relevés, toutes les espèces vasculaires sont identifiées, et leur abondance est précisément estimée par des pourcentages de chaque dans la biomasse (estimation visuelle dans 25 poignées). C'est sur la base de ces relevés floristiques que les types sont créés, grâce à des analyses statistiques. En plus des typologies en elles-mêmes, chaque type de chaque typologie a été décrit selon son cortège floristique, son rendement, sa qualité fourragère, son environnement (sols et altitude) et ses pratiques agricoles.

Une première typologie agronomique a été développée entre 2000 et 2006, à l'échelle du Parc Naturel Régional des Ballons des Vosges (Collectif, 2006), mais peut aussi être utilisée sur les communes voisines aux conditions environnementales similaire (Figure 10). Afin de réaliser cette typologie, 110 prairies ont été étudiées, gérées par 31 agriculteurs. Cette typologie classe les prairies permanentes en 11 types et apporte des informations sur le fourrage (rendement annuel) et sur la composition botanique (nombre d'espèce, rareté de ces espèces) (Annexe 3).

Une deuxième typologie agronomique a été développée, sur le territoire du Parc Naturel Régional des Vosges du Nord et sur les Vosges Mosellanes (Figure 10). Cette typologie a identifié 14 types, grâce à l'étude de 122 prairies gérées par 12 agriculteurs (Bayeur et al., 2013). Elle apporte des informations similaires à la typologie décrite précédemment, avec des informations supplémentaires : valeur des types prairiaux pour les insectes pollinisateurs, coûts de production du fourrage et souplesse d'exploitation (Annexe 4). De plus, cette typologie permet d'apporter des conseils de gestion aux agriculteurs, pour améliorer ou conserver les propriétés agronomiques ou écologiques des prairies.

Ces deux typologies agronomiques s'appliquent à des territoires différents, il est donc possible de les rassembler en une typologie (appelé *Typologie agronomique* dans cette thèse), classant les prairies en 25 types (Annexe 5).

Enfin, une typologie agronomique a été développée à l'échelle nationale (Launay et al., 2011). Parmi les 190 prairies étudiées, 14 sont situées sur le massif vosgien et gérées par 5 agriculteurs. Cette typologie a permis l'identification de 19 types, caractérisés par leurs rendements, valeurs fourragères, compositions taxonomiques et fonctionnelles et valeurs pollinisateurs.

Lors de la réalisation de ces typologies phytosociologiques et agronomiques, de nombreuses données ont été collectées, à propos de la composition de la végétation, des pratiques agricoles, des rendements et da qualité fourragère (Bayeur et al., 2013; Collectif, 2006; Ferrez et al., 2017; Launay et al., 2011). J'ai pu utiliser ces données pour comparer les compositions des communautés végétales et leurs potentielles productions fourragères, bien que les protocoles ne soient pas toujours constants entre les études (Tableau 2).

Tableau 2 Comparaison synthétique des protocoles entre typologies

Typologies	Ballons des Vosges	Vosges du Nord	Nationale	Phytosociologique
Nombre de PP	110	117	190	550
Années d'études	2000 - 2003	2010-2012	2009-2010	2008-2015
Inventaire des espèces	Toutes les espèces vasculaires de la strate herbacée			
Estimation de l'abondance	25 poignées (% de la biomasse)	25 poignées (% de la biomasse)	8 quadrats 0,5 m² (% de la biomasse)	Coefficients de Braun-Blanquet
Pratiques agricoles	Récupérées lors d'enquêtes	Récupérées lors d'enquêtes	Récupérées lors d'enquêtes	Estimées d'après la bibliographie
Rendement	Estimé des récoltes et pâturages	Estimé des récoltes et pâturages	Mesuré par le % de matière sèche	Estimé d'après la bibliographie
Qualité fourragère	Estimée d'après la végétation	Estimée d'après la végétation	Mesurée en laboratoire	Estimée d'après la végétation

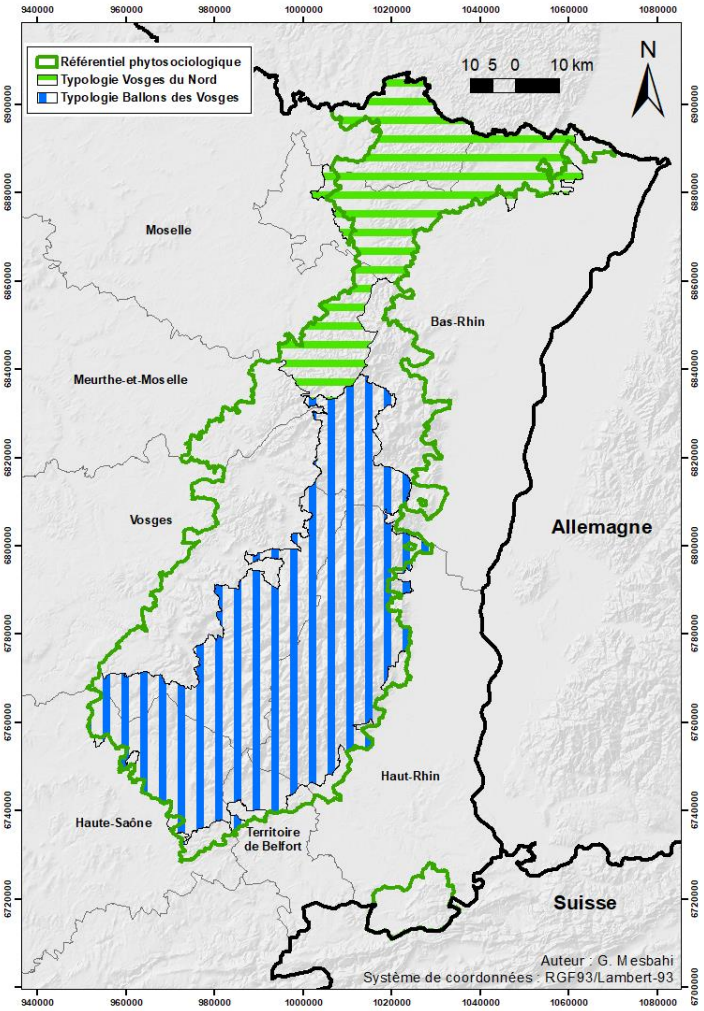


Figure 10 Zone de validité des typologies agronomiques et phytosociologiques du massif vosgien

2.3. Modèles climatiques, édaphiques et géologiques

J'ai associé à chaque prairie des informations climatiques, édaphiques et topologiques, en utilisant des modèles développés par le laboratoire SILVA de Nancy (UMR INRAE-AgroParisTech).

La température moyenne mensuelle, la pluviométrie moyenne mensuelle, l'évapotranspiration moyenne mensuelle et la teneur moyenne en eau du sol (réserve utile) moyenne mensuelle ont été modélisées par Piedallu et al. (2013). L'évapotranspiration moyenne mensuelle a été calculée par Lebourgeois et Piedallu (2005), et le rayonnement solaire moyen mensuel par Piedallu et Gégout (2007). Ces données sont modélisées à une précision de 1 km, pour chaque mois de janvier 2005 à décembre 2014.

Enfin, les altitudes, pentes et orientations de chaque prairies ont été calculées grâce aux modèles numériques de terrain (MNT) développés par l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN, 2016). Ces modèles ont été développés à l'échelle de la France métropolitaine, j'ai donc dû extraire les données correspondant aux parcelles étudiées grâce au logiciel QGIS et le package Point sampling tool (Jurgiel, 2018; QGIS Development Team, 2019).

3. Travail de terrain 2017-2019

Deux phases de terrain distinctes ont été nécessaires pour collecter les données prairiales. Une première phase a eu pour objectif d'étudier la diversité des végétations et pratiques agricoles sur le massif vosgien. La seconde phase s'est concentrée sur la collecte de données précises liées à la biodiversité et au sol, et la mesure des rendements et qualités fourragères.

3.1. Recensements des types prairiaux à l'échelle du massif vosgien

L'objectif de la première phase de terrain était de caractériser la diversité des prairies permanentes, pour pouvoir sélectionner ensuite des prairies représentatives à étudier plus précisément. J'ai attribué un type phytosociologique et un type agronomique à 142 prairies du massif vosgien, permettant d'étudier la diversité des communautés végétales et des pratiques agricoles. Cette phase a été réalisée avec l'aide de trois stagiaires de niveau Master 2 : Gaëlle Imbert, Louise Lobjois et Marc Bisset.

3.1.1. Attribution des types agronomiques, fonctionnels et phytosociologiques

J'ai sélectionné les prairies de façon à recouvrir la diversité des pratiques et des milieux observables sur le massif. Afin de pouvoir s'assurer de la diversité des types prairiaux, j'ai sélectionné les prairies parmi celles déjà étudiées lors des précédentes typologies du massif vosgien. Ainsi, une centaine de prairies avait déjà été suivie pour la réalisation des typologies agronomiques (Bayeur et al., 2013; Collectif, 2006), et une cinquantaine pour le référentiel phytosociologique (Ferrez et al., 2017).

A. Types agronomiques

Lors des précédentes études, 25 types agronomiques ont été identifiés (Bayeur et al., 2013; Collectif, 2006). Il est possible d'attribuer les types agronomiques grâce aux pratiques agricoles (Annexe 3 et Annexe 4). Nous avons donc interrogé les agriculteurs gérant les prairies étudiées à propos de leurs pratiques agricoles (utilisation de la prairie, fertilisation, …), mais nous avons

aussi profité de cet entretien pour connaitre leur vision des prairies permanentes en général, leurs attentes vis-à-vis des prairies étudiées, et l'historique de ces dernières.

B. Types phytosociologiques

Afin d'attribuer des types phytosociologiques, des relevés botaniques sont nécessaires. Cependant, la phytosociologie est une science demandant une parfaite maitrise de la botanique en plus de la phytosociologie elle-même. Afin de limiter les erreurs lors de la détermination de la végétation et donc du type phytosociologique, nous avons décidé de développer une clé de détermination simplifiée, se basant uniquement sur les genres floristiques et non les espèces. Pour développer cette clé, j'ai créé un arbre de régression s'appuyant sur les 550 relevés prairiaux réalisés par les Conservatoires Botaniques lors de la création du référentiel phytosociologique, grâce au logiciel R et au package mvpart (R Core Team, 2019; Therneau and Atkinson, 2014). Grâce à une matrice de confusion, j'ai pu vérifier que la clé permet la bonne classification de 80% des prairies, bien que seuls 48 genres botaniques soient nécessaires à la détermination des types. Nous avons donc réalisé des relevés botaniques simplifiés, dont l'objectif était de noter la présence ou l'absence des 48 genres ciblés, afin de déterminer le type phytosociologique de chaque prairie.

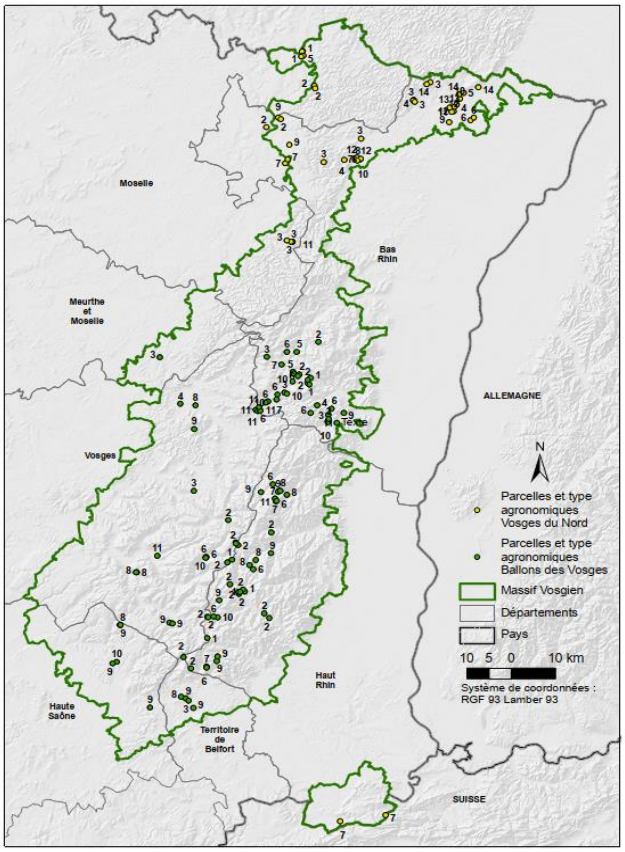
Nous avons ainsi pu attribuer un type agronomique et un type phytosociologique à 142 prairies, gérées par 56 agriculteurs. Nous avons observé 20 types phytosociologiques sur les 25 possibles, et les 25 types agronomiques précédemment décrits (Figure 11). De plus, nous avons observé 86 combinaisons entre types phytosociologiques et agronomiques (Tableau 3).

C. Attribution de types fonctionnels

Enfin, j'ai attribué des types fonctionnels aux prairies permanentes du massif vosgien. Cependant, comme cette typologie n'a pas été développée pour le massif vosgien et n'utilise pas toute la diversité botanique, je n'ai pas comparé les types fonctionnels aux types agronomiques et phytosociologiques.

Cruz et al. (2010) ont attribué un type (A, B, b, C et D) à 38 des graminées (Poaceaes) les plus communes des prairies françaises. Ces classes sont basées sur des ensembles de traits foliaires (teneur en matière sèche, surface spécifique, longévité, résistance à la case) et de traits liés à la plante entière (date de floraison, hauteur maximale). Cruz et al. (2010) ont ensuite proposé une méthode permettant d'extrapoler ces types de graminées à la prairie.

J'ai adapté cette méthode afin de limiter le nombre de types ne contenant qu'une seule prairie. Si un type de graminées représente à lui seul plus de 60% de l'abondance des graminées de la prairie, alors la prairie est associée à ce type (ex : 76% de graminées de type A, 3% de B et 21% de C induisent une prairie de type A), comme l'ont proposé Cruz et al. (2010). Sinon, la prairie est définie par les deux principaux types de graminées, par ordre décroissant de leur abondance (ex : 28% de A, 30% de B, 10% de b et 32% de C induisent une prairie de type CB).



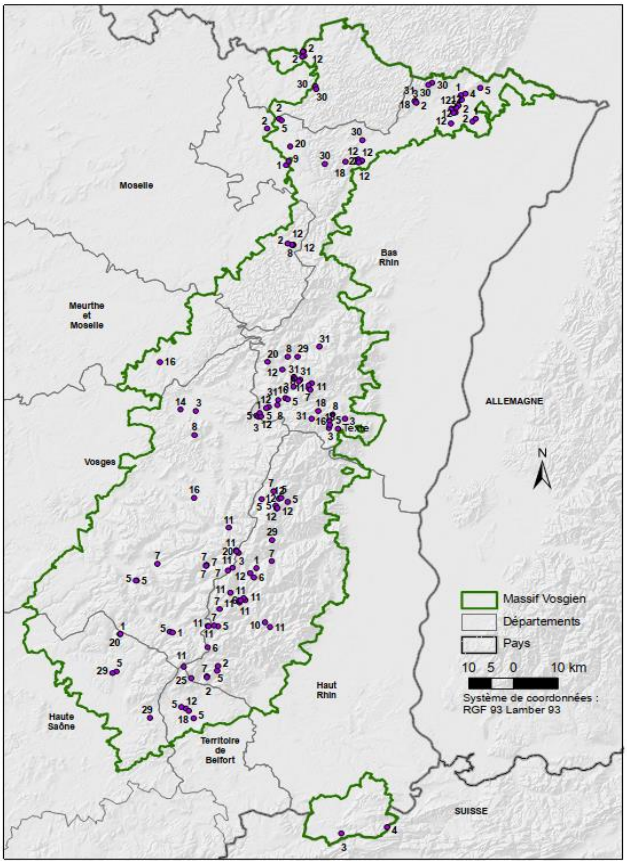


Figure 11 Localisation des types agronomiques et phytosociologiques observés

		Types phytosociologiques																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	18	20	25	29	30	31
Types agronomiques Vosges du Nord	1		3																		
	2		1																	2	
	3		2	1					1				1							3	1
	4		1													2					
	5				1								1								
	6	1	2																		
	7	1	1	1	1					1											
	8												1								
	9		1										1				1				
	10	1											1								
	11					2							1								
	12		1										3		1						
	13												3								
	14	1				1														1	
Types agro. Ballons des Vosges	1						2	1				3									
	2			1				1			1	11					1	1	1		3
	3							1					2		2	2	1				
	4	1				4		1					1	1		1					
	5																		1		2
	6		1				1	3	3		1		2								2
	7							1	1				2								
	8	2		1		3															
	9		1	1		3		2	1				2				1		2		
	10			2		3															
	11	1		1		4		1													

Tableau 3 Combinaisons entre types phytosociologiques et types agronomiques

Sont mis en avant les types phytosociologiques sans lien avec l'une des typologies agronomiques (gris), les combinaisons sélectionnées pour une études approfondie (vert), et les combinaisons fusionnées car suffisamment proches (bleu, orange et violet).

3.1.2. Combinaisons entre types phytosociologiques et agronomiques

Il n'existe pas de lien exclusif entre un type phytosociologique et un type agronomique (Tableau 3), il est donc possible d'émettre l'hypothèse que les typologies diffèrent dans leurs méthodes et leurs capacités à prédire les propriétés agroécologiques. Il existe donc probablement une méthode meilleure que l'autre, ou une complémentarité entre les méthodes selon les propriétés à prédire.

Il est facilement observable que certains types phytosociologiques ne sont présents que dans une partie du massif : par exemple le type 4 est uniquement présent dans les Vosges du Nord, alors que le type 6 est uniquement présent dans les Ballons des Vosges (Tableau 3). Cette répartition est certainement due aux différences géologiques et topographiques entre ces deux zones du massif vosgien. Enfin, on peut voir que certains types agronomiques ne sont liés qu'à un type phytosociologique (type Vosges du Nord 1 par exemple) et que certains types phytosociologiques ne sont liés qu'à un type agronomique (type phytosociologique 9).

3.1.3. Sélection des combinaisons les plus importantes

Grâce à ces résultats, j'ai pu sélectionner 20 combinaisons entre types agronomiques et types phytosociologiques, afin d'étudier plus précisément les liens entre pratique, milieu, végétation et propriétés agroécologiques. Cette sélection a été faite à dire d'expert, en collaboration avec les acteurs du projet d'étude des prairies permanentes du massif. Vingt combinaisons composées de trois prairies, soit 60 prairies, ont été jugées suffisantes pour couvrir la diversité des situations du massif vosgien, tout en permettant un suivi de terrain par une équipe restreinte.

J'ai sélectionné des combinaisons dont la fréquence d'apparition était forte à l'échelle du territoire, telles que la combinaison entre type phytosociologique 11 et le type agronomique des Ballons des Vosges 2, qui a été observée 11 fois (Tableau 3). J'ai sélectionné d'autres combinaisons pour leur importance écologique, telle que la combinaison entre le type phytosociologique 1 et le type agronomique des Ballons des Vosges 8 regroupant des prairies de fauche extensives d'intérêt patrimonial majeur ; ou pour leurs enjeux agronomiques comme la combinaison entre type phytosociologique 31 et le type agronomique des Ballons des Vosges 2, typique des prairies d'altitude sous exploitées pouvant permettre d'augmenter l'autonomie fourragère des exploitations agricoles. Les combinaisons sélectionnées sont mises en couleurs dans le Tableau 3.

Enfin, j'ai estimé que certaines associations avaient des compositions botaniques et répondaient à des enjeux écologiques et agronomiques suffisamment proches pour être rassemblées. J'ai ainsi créé une association entre le type phytosociologique 5 et les types agronomiques Ballons des Vosges 8 et 9 ; entre le type phytosociologique 31 et les types agronomiques Ballons des Vosges 5 et 6 ; entre le type phytosociologique 12, le type agronomique Vosges du Nord 12 et les prairies pâturées du type agronomique Ballons des Vosges 3 ; et enfin entre le type phytosociologique 12, le type agronomique Vosges du Nord 13 et les prairies fauchées du type agronomique Ballons des Vosges 3.

3.2. Analyse approfondie des types les plus importants

La seconde période de terrain (2018 et 2019) a eu pour objectif une analyse approfondie des combinaisons entre types phytosociologiques et agronomiques précédemment sélectionnées.

J'ai sélectionné trois prairies par combinaison de types, afin d'obtenir un jeu de 60 prairies. J'ai utilisé ces prairies pour collecter des informations précises sur la composition botanique, la valeur fourragère et la composition du sol. Il ne m'a pas été possible d'accéder à l'une des prairies, et une autre prairie a été détruite avant le prélèvement de sol pour analyse : bien que j'ai pu étudier la composition botanique et le fourrage de 59 prairie, l'étude porte donc majoritairement sur 58 prairies permanentes (Figure 12).

Toutes les analyses ont été réalisées à l'échelle de la communauté végétale homogène qui représentait la plus grande part de la surface de la prairie, afin d'éviter les biais dus à de forts gradients d'humidité ou de sol à l'échelle de la parcelle. Dans un souci de simplicité, je parlerai de « prairie » plutôt que de « principale communauté végétale homogène » dans tout ce manuscrit.

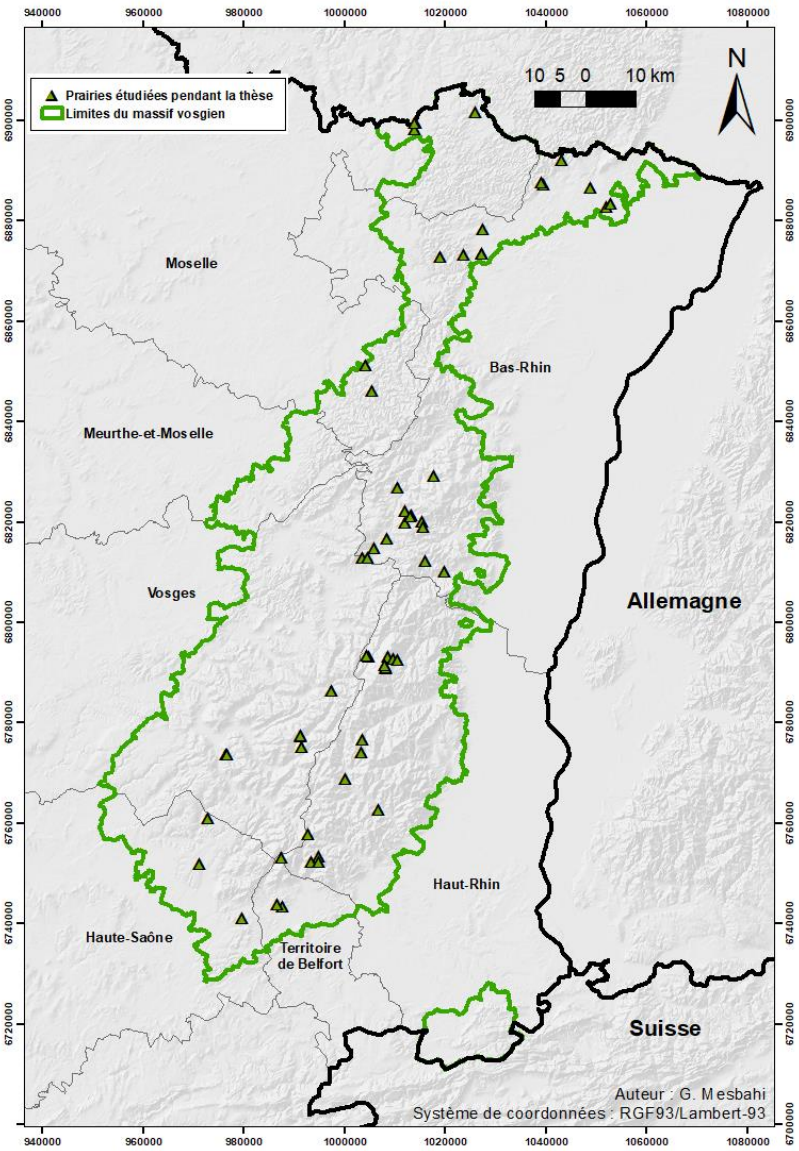


Figure 12 Répartition des 59 prairies précisément étudiées

Les 59 prairies sont réparties sur tout le massif vosgien, de manière à couvrir la diversité des milieux, des pratiques et des compositions botaniques.

3.2.1. Relevés botaniques

J'ai réalisé un inventaire floristique sur chaque prairie étudiée. Six quadrats de 0,5 m² ont permis l'identification des espèces principales et de leurs abondances (%). Puis j'ai parcouru la communauté végétale afin d'identifier des espèces trop ponctuelles pour être présentes dans les quadrats. Le pourcentage de sol nu a aussi été estimé dans chaque quadrat, de manière à ce que la somme des abondances spécifiques et le recouvrement du sol nu représente 100% du quadrat. Les pourcentages d'espèces et de sol nu sont attribués de 5 en 5, les abondances inférieures à 5% ont été ramenées à 0%. Enfin, la moyenne des abondances des 6 quadrats a été calculée, afin d'obtenir une valeur d'abondance à la prairie.

Pour les analyses statistiques, il faut pouvoir différencier les espèces absentes et les espèces présentes mais de très faible abondance. Pour cela, j'ai attribué une abondance de 0,00001% aux espèces présentes mais de très faibles abondances.

3.2.2. Analyses fourragères

A. Prélèvements

Afin de connaitre la qualité fourragère des prairies, nous avons prélevé de l'herbe avant chaque utilisation (fauche ou pâture) pendant les saisons 2018 et 2019. L'herbe a été récoltée sur au moins 3 m² (6 quadrats de 0,5 m², 5 cm au-dessus du sol) de façon à obtenir au moins 500 g de matière sèche (Figure 13). Cependant, en raison de ces deux étés secs et caniculaires, la croissance de l'herbe a été en deçà de la normale, souvent nulle à partir de juillet, et la majorité (78 %) des prélèvements ont été réalisés lors de la première utilisation (Tableau 4) : nous avons finalement pu collecter des fourrages sur 58 prairies sur un total de 60. Nous disposons donc d'un jeu quasi complet de mesure de la croissance de l'herbe printanière sur 2 années, mais l'estimation de la production annuelle n'a pas pu être effectuée.

J'ai réalisé les prélèvements en 2018 avec l'aide de Marie-Louise Coly, Fanette Haltel, Benjamin Pires et Sylvain Plantureux, et en 2019 avec l'aide de Pauline Barrier, Cécile Bayeur, Adrien Boillot, Fabien Dupont, Thierry Froelicher et Jean-Sébastien Laumond.

Figure 13 Quadrat, coupe et pesée de l'herbe

Tableau 4 Nombre d'analyses fourragères en 2018 et 2019 pour chaque utilisation

	2018	2019
1er utilisation	50	45
2ème utilisation	9	14
3ème utilisation	2	2

B. Analyses fourragères

Après prélèvements, les échantillons ont été séchés à l'étuve 72 heures à 70°C, puis pesés et stockés en chambre froide à -20°C jusqu'à être envoyés au laboratoire d'analyse. La masse des échantillons séchés permet d'estimer le rendement de la prairie, et les masses sèches et humides permettent de calculer la teneur en matière sèche du fourrage.

Les analyses fourragères ont été réalisées par le laboratoire UpScience (Tableau 5). J'ai utilisé ces données brutes pour calculer les teneurs en protéines digestibles dans l'intestin permises par l'énergie et par l'azote (respectivement PDIE et PDIN), les unités fourragères lait et viande

(UFL et UFV) et les unités d'encombrement lait, bovin et mouton (UEL, UEB et UEM), selon les équations de (INRA, 2010).

Grâce à ces nouvelles données, j'ai calculé la production laitière permise par les PDIE, PDIN et UFL de chaque prairie. J'ai réalisé ces estimations pour une vache standard (Tableau 6), selon la méthode décrite par Hulin et al. (2011) et les équations de INRA (2010).

Tableau 5 Détail des analyses fourragères

Valeur nutritive		
Analyse	Unité	Méthode
Matière azotée (MAT)	g/100g MS	Proche Infrarouge
Matière minérale	g/100g MS	Proche Infrarouge
Lignine insoluble dans les détergents acides (ADL)	g/100g MS	Proche Infrarouge
Fibres insolubles dans les détergents acides (ADF)	g/100g MS	Proche Infrarouge
Fibres insolubles dans les détergents neutres (NDF)	g/100g MS	Proche Infrarouge
Digestibilité de la Cellulose (DCs)	g/100g MS	Proche Infrarouge
Minéraux		
Analyse	Unité	Méthode
Calcium (Ca)	g/100g MS	Minerol 15
Magnésium (Mg)	g/100g MS	Minerol 15
Phosphore (P)	g/100g MS	Minerol 15
Potassium (K)	g/100g MS	Minerol 15
Sodium (Na)	g/100g MS	Minerol 15
Cendres Brutes	g/100g MS	CEND-H 13

Tableau 6 Description de la vache multipare et des objectifs de production utilisés pour les calculs de production laitière permise

Âge (mois)	38
Poids vif (kg)	650
Production laitière permise au pic (kg)	30
Note Etat Corporel (NEC)	2,5
Semaines de lactation	16
Semaine de gestation	3
Indice d'activité au pâturage	1,2
Taux Protéique	32
Taux Butyreux	40
Poids du veau à la naissance (kg)	35

3.2.3. Analyses de sol

Les analyses de sol ont été réalisées en deux temps. Premièrement, j'ai prélevé des échantillons pour en faire analyser la composition, puis 20 prairies ont été prélevées pour des analyses précises des stocks de carbone et de densité apparente du sol.

A. Composition du sol

J'ai prélevé des échantillons de sol sur 58 prairies (parmi les 60 sélectionné, je n'ai pas pu accéder à l'une et une autre a été détruite avant le prélèvement de sol). J'ai prélevé cinq échantillons par prairie et par horizon, grâce à une tarière (Figure 14). Les échantillons ont été prélevés au niveau de la communauté botanique dominante, le plus proche possible des emplacements des relevés floristiques et prélèvements d'herbe pour l'analyse qualité. Les horizons étudiés sont un horizon superficiel (de 0 à 10 cm de profondeur) et un horizon plus profond (de 10 à 30 cm). J'ai profité de chaque prélèvement pour estimer la profondeur du sol, en creusant avec la tarière jusqu'à 60 cm lorsque le sol le permettait.

Après prélèvement, les cinq échantillons de chaque horizon ont été homogénéisés, et seul 1 kg a été gardé pour les analyses en laboratoire. J'ai ainsi créé un échantillon superficiel et un échantillon profond par prairie. Les analyses ont été réalisées par le laboratoire SADEF, et les protocoles sont identiques selon la profondeur de l'horizon (Tableau 7).

Figure 14 Echantillon de sol prélevé à la tarière

B. Stock de carbone

Les analyses précédentes permettent de connaitre la teneur de carbone dans les horizon 0-10 et 10-30, exprimée en g/kg. Pour connaitre le stock de carbone, exprimé en tonne/ha, cette valeur relative doit être convertie en valeur absolue. Pour cela, il est nécessaire de connaitre la densité du sol, qui dépend de paramètre tels que la composition du sol ou des pressions qui y sont exercées.

Je n'ai pas pu mesurer les densités apparentes de 58 prairies sur les horizon 0-10 cm et 10-30 cm. J'ai donc estimé la densité apparente (BD, *Bulk Density*) du sol d'après les teneurs en matière organique, selon l'équation de Post and Kwon (2000) :

$BD = \frac{100}{\frac{\%MO}{0.244}+\frac{100-\%MO}{1.64}}$ où %MO est la teneur en matière organique.

La densité, exprimée en $g.cm^{-3}$, peut enfin permettre de calculer le stock de carbone Ct en $t.ha^{-1}$, selon l'équation de Guo and Gifford (2002) :

$Ct = BD\,.\,Cc\%\,.\,D$, où BD est la densité apparente du sol, Cc% la teneur en carbone, et D la profondeur de l'horizon (10 cm pour l'horizon superficiel 0-10, et 20 cm pour l'horizon profond 10-30).

La densité apparente de 20 prairies a été mesurée par Claire Laurent sur l'horizon superficiel (0-10 cm). Pour ces 20 prairies, j'ai calculé un coefficient de corrélation de Spearman entre les densités mesurées et celles calculées grâce à la formule de Post and Kwon (2000) : d'une valeur de 0,78, l'équation de de Post and Kwon (2000) a été jugée suffisamment fiable pour estimer les densité apparentes.

Tableau 7 Détail des analyses de sol

	Analyse	Unité	Méthode
Caractéristiques physiques	Argile (<2µm)	g/kg	NFX 31-107 sans décarbonatation
	Limons fins (2µm-20µm)	g/kg	NFX 31-107 sans décarbonatation
	Limons grossiers (20µm-50µm)	g/kg	NFX 31-107 sans décarbonatation
	Sables fins (50µm-200µm)	g/kg	NFX 31-107 sans décarbonatation
	Sables grossiers (200µm-2mm)	g/kg	NFX 31-107 sans décarbonatation
Statut calcique	pH eau	-	NF ISO 10 390
	Carbonates totaux	g/kg	NF ISO 10 693
Statut organique	C organique total	g/kg	NF ISO 10 694
	Matière organique	g/kg	NF ISO 10 694
	Azote N total	g/kg	NF ISO 13 878 (Dumas)
	Rapport C/N	-	NF ISO 13 878
Cations	Phosphore P_2O_5 assimilable	g/kg	NF ISO 11 263 (Olsen)
	Capacité d'Echange Cationique	mé/kg	NFX 31 130 (Metson)
		mé/kg	NF ISO 23 470 (Cobalti)
	Calcium CaO échangeable	g/kg	NFX 31 108 (ICP AES)
		g/kg	NF ISO 23 470 (Cobalti)
	Magnésium MgO échangeable	g/kg	NFX 31 108 (ICP AES)
		g/kg	NF ISO 23 470 (Cobalti)
	Manganèse Mn échangeable	mg/kg	NFX 31 108 (ICP AES)
		mg/kg	NFX 31 130 (Cobalti)
	Potassium K_2O échangeable	g/kg	NFX 31 108 (ICP AES)
		g/kg	NF ISO 23 470 (Cobalti)
	Sodium Na_2O échangeable	g/kg	NFX 31 108 (ICP AES)
		g/kg	NF ISO 23 470 (Cobalti)
	Aluminium Al échangeable	mg/kg	NF ISO 23 470 (Cobalti)
	Fer Fe échangeable	mg/kg	NFX 31 130 (Cobalti)

3.2.4. Activité antioxydante

Pour des raisons de complexité du protocole, la détermination des activités antioxydantes n'a pas pu être réalisée sur les 58 prairies. Les prairies appartenant à 20 combinaisons de types phytosociologiques et agronomiques, j'ai décidé d'étudier une prairie par combinaison, soit 20 prairies.

Le matériel végétal a été récolté au printemps 2019, au plus proche de la date de première utilisation de chaque prairie, par Sylvain Plantureux. Six quadrats de 0,5 m² ont été disposés aléatoirement dans la communauté végétale, et toute la végétation située dans ces quadrats a été prélevée. Nous avons ensuite rassemblé la végétation des quadrats deux à deux, afin d'obtenir trois échantillons par prairie. La masse de chaque échantillon devait être supérieure à 1 kg, sinon un/des quadrat(s) supplémentaire(s) ont été coupé(s) afin d'atteindre 1 kg.

Les antioxydants étant sensibles à la chaleur, les échantillons ont été stocké au frais dès leur récolte (en glacière à 4°C) et mis à l'étuve le jour même. Le séchage a été réalisé en étuve ventilée à 30 °C pendant 3 jours. Une fois sec, les échantillons ont été stocké à -20 °C afin de les stabiliser jusqu'à réaliser les analyses.

La végétation a été broyée dans l'azote liquide, puis analysée par Anne Poutaraud (UMR LAE INRAE) selon les méthodes DPPH (2,2-diphenyl-1-picryl-hydrazyl), TEAC (Trolox Equivalent Antioxidant Capacity) et ORAC (Oxygen Radical Absorbing Capacity) (Zou et al., 2011) :

- DPPH est un radical stable et coloré, réduit par les antioxydants. L'avancement de la réduction se lit par la décoloration de la solution par spectrophotométrie (517 nm).
- TEAC utilise le même principe avec un radical différent issu de la réaction de l'ABTS (acide 2,2′-azino-bis(3éthylbenz-thiazoline-6-sulfonique) avec le persulfate de potassium. La décoloration de la solution est lue par spectrophotométrie (734 nm).
- ORAC utilise la fluorescéine, qui s'oxyde en présence de deux radicaux libres. Il est donc possible d'estimer la teneur en antioxydants par la vitesse de dégradation, lue par spectrophotométrie (535 nm).

Ces méthodes sont complémentaires, et j'ai vérifié qu'elles donnaient des résultats similaires. Afin de simplifier les analyses, dans cette thèse je n'utiliserai que les valeurs fournies par la méthode DPPH. Les trois méthodes seront utilisées dans un article en préparation dédié à la prédiction des valeurs antioxydantes des prairies permanentes.

3.3. Pratiques agricoles

Afin de pouvoir caractériser les types, j'ai recueilli les pratiques agricoles associées à chaque prairie.

Avec l'aide de trois stagiaires de niveau Master 2 : Gaëlle Imbert, Louise Lobjois et Marc Bisset, j'ai interrogé les agriculteurs à propos de leurs pratiques agricoles moyenne sur les cinq dernières années. Les entretiens avec les agriculteurs étaient individuels et ont été anonymisés pour la réalisation des analyses. Nous avons utilisé un questionnaire, afin d'éviter tout biais dus à l'observateur. Ces enquêtes ont permis d'obtenir des informations sur le mode d'utilisation (fauche, pâture ou mixte), le nombre et les dates d'utilisation, le chargement, ainsi que les quantités, dates et natures des apports de produits fertilisants.

En plus de ces enquêtes, j'ai estimé l'âge des prairies grâce aux photos aériennes historiques du site *Remonter le temps* (IGN, 2020). J'ai pu différencier les prairies ayant plus de 60 ans, entre 60 et 20 ans et moins de 20 ans.

4. Description des prairies sélectionnées

Les 59 prairies étudiées peuvent être décrites par leurs compositions botaniques et des critères liés aux pratiques agricoles et au milieu.

La composition floristique des 59 prairies que j'ai suivies pendant cette thèse peut être comparée aux autre prairies précédemment étudiées sur le massif vosgien (Figure 15). Sur cette figure, les parties A, B et C montrent la diversité des compositions floristiques, grâce à une Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) du tableau des présences d'espèces, entre les prairies étudiées pour les typologies agronomiques (en rouge), pour le référentiel phytosociologique (jaune) et pour cette thèse (bleu). On peut voir que les prairies que j'ai suivies pendant cette thèse ont des compositions botaniques représentatives de la majorité des prairies du massif vosgien, mais que des prairies aux compositions plus originales n'ont pas été prises en compte, ce qui est particulièrement visible le long de l'axe 1 (Figure 15 A et B). Ces prairies plus originales sont composées d'espèces de sols très basiques et pauvres en nutriments telles que *Teucrium chamaedrys*, *Stachys recta* ou *Asperula cynanchica*. Concernant la richesse spécifique, les prairies suivies pendant la thèse sont une fois encore dans la moyenne. La richesse plus élevée dans les prairies des typologies agronomiques est certainement due à l'attribution de surfaces plus importantes aux communautés végétales, rassemblant donc plus d'espèces (effet de la surface d'échantillonnage).

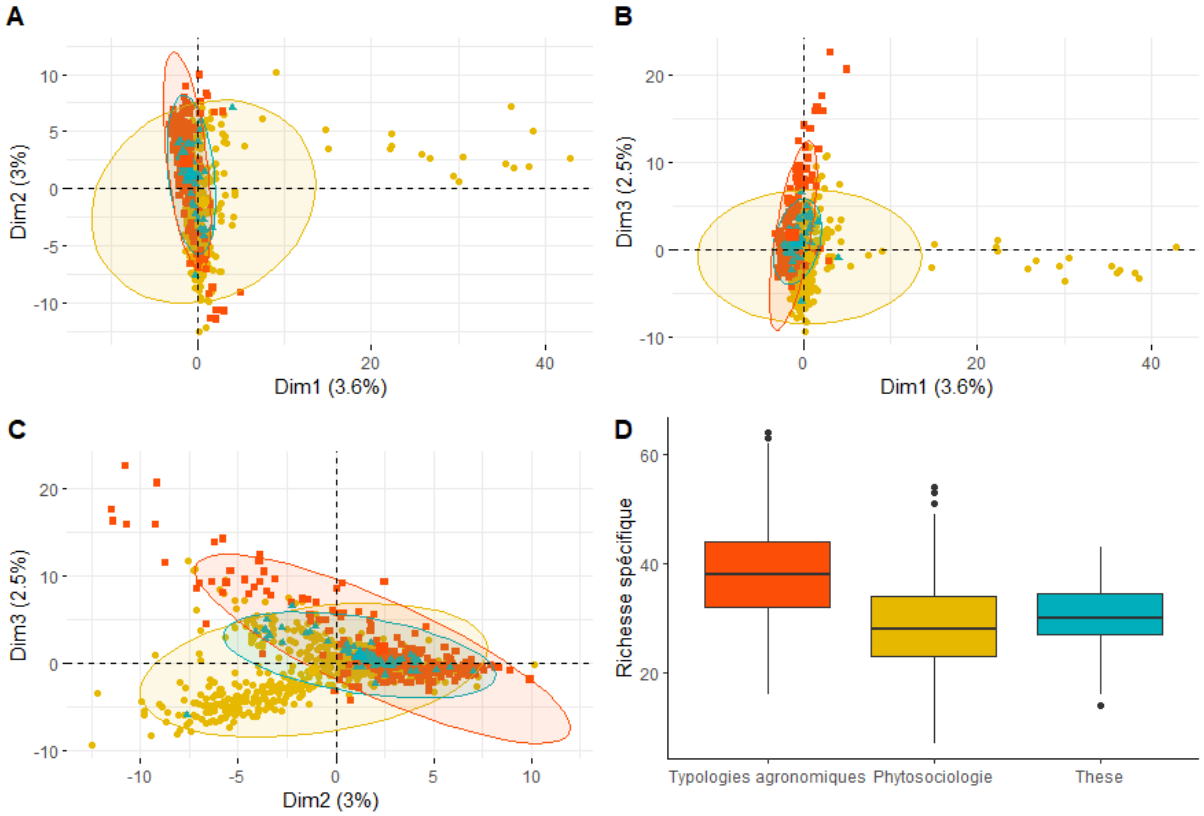


Figure 15 Graphiques des individus selon l'AFC regroupant toutes les prairies étudiées sur le massif vosgien, et comparaison des richesses spécifiques entre programmes d'étude.

Comparer les prairies de cette thèse selon des critères liés à la végétation, aux pratiques et au milieu permet de se rendre compte des différents gradients pris en compte (Tableau 8). On peut noter que les gradients d'altitude (de 184 à 1222 m), de pH du sol (4,2 à 8) et d'indices d'Ellenberg sont importants. On note cependant un déséquilibre entre prairies fauchées et pâturées (respectivement 23 et 14 prairies), ainsi qu'un nombre de jours de pâturage maximum assez faible peu comparable aux prairies à fort chargement d'autres régions de France (Michaud et al., 2012b).

Tableau 8 Minimums et maximums de descripteurs de la végétation, des pratiques et du milieu, observées sur les 59 prairies étudiées pendant cette thèse

Description de la végétation		
Richesse spécifique totale	13	42
Richesse en espèces oligotrophiles	1	15
Abondances graminées (%)	31,7	99,0
Abondance légumineuses (%)	0	34,2
Pratiques agricoles		
Nombre de prairies Fauchées / Mixtes / Pâturées	23 / 22 / 14	
Fertilisation organique (kg N / ha)	0	140
Fertilisation totale (kg N / ha, apportée sous forme organique, minérale et lors du pâturage)	0	259
Date de première utilisation (nb jour)	101	216
Date de première utilisation (°C.j cumulés depuis le 1er février)	280	1635
Nombre d'utilisations	1	5
Proportion de fauches (%)	0	100
Pâturage (nb de jours)	0	215
Chargement (j.UGB/ha)	0	855
Milieu		
Altitude (m)	184	1222
Température moyenne annuelle (°C)	6,2	11,0
Précipitations moyennes annuelles (mm)	791	2530
Textures (S% - L% - A%)	7,2 - 4,8 - 4,1	91 - 60 - 58
pH	4,2	8
Indices d'Ellenberg (calculés sur la présence)		
Indice de fertilité	3,07	6,31
Indice d'humidité	4,39	7,00
Indice d'état calcique	3,21	6,80

CHAPITRE 1
Liens entre pratiques, milieu, végétation et propriétés agroécologiques

De nombreux critères du milieu et des pratiques permettent potentiellement la prédiction de la composition botanique d'une prairie. Milieu, pratiques et végétations peuvent ensuite être utilisés pour prédire les propriétés agroécologiques des prairies.

L'analyse de la littérature a montré que parmi les critères du milieu, le climat, le sol et l'altitude sont des prédicteurs de la composition botanique et des propriétés agroécologiques. Cependant, de forts liens existent entre ces critères, il peut donc être difficile de les isoler les uns des autres : par exemple, le climat est plus frais et humide en altitude, et le sol y est généralement plus acide.

Les pratiques agricoles doivent également être prises en compte pour prédire la composition botanique et les propriétés agroécologiques, notamment grâce aux critères liés à la fertilisation, au mode d'utilisation (fauche, pâturage ou mixte des deux) et à l'intensification des pratiques (chargement en bétail, nombre d'utilisation). Par exemple, les prairies fortement fertilisées seront dominées par les graminées, et leur fourrage sera de meilleure quantité et qualité. Cependant, un nombre de fauches ou un chargement de pâturage trop important sélectionnera des espèces rampantes à faible valeur fourragère.

Enfin, l'analyse de la littérature montre que la composition botanique est aussi un élément à prendre en compte pour prédire les propriétés agroécologiques. Les graminées sont souvent associées à de forts rendements et une bonne qualité fourragère, mais les dicotylédones peuvent permettre d'améliorer l'appétence du fourrage et la qualité des produits laitiers et carnés. Connaitre l'abondance des différentes espèces, et pas seulement la composition floristique, permet de mieux estimer les propriétés agroécologiques. De plus, les associations botaniques, observables grâces aux typologies phytosociologiques, agronomiques ou fonctionnelles, peuvent permettre de prédire la qualité fourragère ou la valeur écologiques des prairies.

De nombreux critères permettent donc la prédiction de la végétation, et la prédiction des propriétés agroécologiques des prairies permanentes. Il est nécessaire d'identifier les critères les plus pertinents, afin de permettre des prédictions les plus précises possibles, sans perdre de temps à collecter des critères négligeables.

Ce premier chapitre est divisé en deux parties, répondant chacune à des objectifs propres. Il est entièrement basé sur les 58 prairies dont la composition floristique, la composition du sol, les pratiques agricoles, les rendements et les qualité fourragères ont été collectées pendant la thèse

La partie A est consacrée à l'identification des critères liés au sol, à l'environnement et aux pratiques qui permettent de prédire au mieux la composition botanique des prairies. Cette approche prédictive permettra de mieux comprendre les effets du milieu et des pratiques sur la végétation, avant de s'intéresser à leurs effets sur les propriétés agroécologiques. De plus, cette analyse peut permettre l'identification d'espèces indicatrices de milieux et/ou de pratiques, qui pourront aider à conseiller les agriculteurs du massif vosgien quant à l'optimisation de leurs prairies permanentes.

La partie B a pour objectif d'identifier les critères du milieu, des pratiques et de la végétation permettant la prédiction des propriétés agroécologiques des prairies. Ces liens étant méconnus, les analyses de cette partie permettront d'apporter de nouvelles connaissances scientifiques, qui seront elles aussi valorisables lors de conseils aux agriculteurs.

Partie 1.A Prédiction de la végétation par le milieu et les pratiques

1. Introduction

Les prairies permanentes sont parmi les milieux hébergeant la plus grande diversité floristique, la moitié de la flore européenne étant inféodées aux habitats prairiaux (Wilson et al., 2012). Les communautés prairiales dépendent de nombreux critères liés au sol, à l'environnement et aux pratiques agricoles, ce qui complique la prédiction de leur composition (Gaujour et al., 2012; Michaud et al., 2012b).

Dans cette première partie, j'ai tout d'abord étudié les corrélations entre critères prédictifs, afin de pouvoir identifier les principaux gradients et mieux discuter les prédictions des végétations et propriétés agroécologiques. J'ai ensuite identifié les critères permettant la bonne prédiction des compositions botaniques, décrites par la présence et l'abondance des espèces prairiales, et évalué la qualité des prédictions afin de connaitre la fiabilité des modèles créés. Enfin, j'ai observé plus précisément les liens entre les critères sélectionnés et les espèces les mieux prédites, pour identifier les gradients de critères qui influencent les compositions botaniques.

L'identification de critères prédictifs des compositions botaniques permettra de mieux comprendre les liens entre critères et propriétés agroécologiques, mais pourra aussi être utilisé pour identifier des espèces indicatrices de milieu (acidité, texture du sol) ou des pratiques agricoles (mode d'utilisation, intensification).

2. Matériels et méthodes

2.1. Corrélation entre critères prédictifs

Afin de pouvoir observer les corrélations entre critères prédictifs, j'ai réalisé une Analyse en Composantes Principales (ACP) rassemblant tous les critères prédictifs (Husson et al., 2020; R Core Team, 2019). Le grand nombre de critères pouvant rendre la lecture des cercles de corrélations difficile, les résultats sont présentés sous forme de tableaux.

J'ai ensuite réalisé une classification hiérarchique sur les composantes principales (HCPC), qui utilise les résultats de l'ACP pour rassembler en classes les prairies associées à des milieux et pratiques similaires. J'ai isolé les critères significativement associés à chaque classe ($p < 0,05$) afin d'illustrer les variations de milieu à travers le massif vosgien ainsi que les corrélations entre critères.

2.2. Prédiction des communautés prairiales

L'objectif de cette partie est d'identifier les critères permettant la meilleure prédiction de la composition botanique des prairies. La première analyse consiste à prédire la présence des espèces, et la seconde à prédire leur abondance.

La méthode statistique est la même pour ces deux analyses, il s'agit de l'Analyse de Redondance (RDA), selon le protocole de Borcard et al (2018), en utilisant le logiciel R et le package vegan (Oksanen, 2019; R Core Team, 2019). La RDA a l'avantage de pouvoir prédire un ensemble de variables (ici un ensemble d'espèces) par plusieurs ensembles de critères, et d'évaluer la contribution de chaque ensemble pour la prédiction des communautés.

J'ai tout d'abord créé trois ensembles de critères prédictifs : l'un rassemblant les critères du sol, un second rassemblant les critères environnementaux (topographie, climat, paysage) et un dernier rassemblant les critères des pratiques agricoles.

Avant de réaliser les analyses, le tableau des présences et celui des abondances ont été transformé selon la méthode Hellinger, qui consiste à linéariser les données pour améliorer la prédiction. Ensuite, j'ai réalisé une RDA sur chaque ensemble de critères suivi d'une sélection pas-à-pas en avant (*forward stepwise selection*), afin de sélectionner les critères permettant la meilleure prédiction de la composition botanique.

Enfin, j'ai réalisé une partition de la variance pour évaluer la capacité prédictive des critères sélectionnés, les colinéarités entre critères sélectionnés, et la capacité prédictive de l'ensemble de ces critères. La qualité de la prédiction s'évalue grâce au R^2 ajusté : cette valeur comprise entre 0 et 1 représente la part de la variance expliquée par le modèle, plus elle est proche de 1 plus le modèle est fiable. Pour finir, j'ai utilisé des analyses de variance (ANOVA) pour vérifier la significativité des prédictions.

2.3. Liens entre critères et espèces

Cette analyse a été réalisée pour les présences puis pour les abondances des espèces. Elle consiste à représenter dans un plan les corrélations entre critères prédictifs et les espèces les mieux prédites par la RDA, grâce au logiciel R et au package vegan (Oksanen, 2019; R Core Team, 2019),

Afin d'alléger les graphiques, je n'ai affiché que les espèces dont la qualité de la prédiction était d'au moins 0,4 sur les dimensions 1 et 2.

3. Résultats

3.1. Corrélations entre critères prédictifs

L'étude des corrélations entre critères prédictifs permet de mettre en évidence les liens entre critères. Ces liens permettront de mieux interpréter les critères qui seront sélectionnés dans les parties suivantes pour la prédiction de la végétation, des propriétés agroécologiques et des compromis entre ces propriétés.

3.1.1. Corrélations entre critères prédictifs

L'ACP entre critères (Annexe 6), montre de nombreuses corrélations entre critères prédictifs du milieu et des pratiques. Les cinq premières dimensions expliquent 33,0%, 12,9%, 10,3%, 8,0% et 5,5% de la variance, soit un total de 69,7%.

La première dimension de l'ACP montre un fort effet de l'altitude. Lorsque l'altitude augmente la pluviométrie augmente, et les températures et l'évapotranspiration diminuent. Concernant le paysage, on peut noter une corrélation positive entre l'altitude et la part de pelouses et pâturages naturels (CLC_321) et dans une moindre mesure avec la part de forêts de conifères (CLC_312) et de landes et broussailles (CLC_322). A l'inverse, les terres arables (CLC_211) et le tissu urbain (CLC_112) sont majoritairement présents à faible altitude. Les liens entre altitude et pratiques agricoles sont assez faibles : les prairies d'altitude sont légèrement plus fertilisées en N, P et K, plus pâturées, utilisées plus tardivement en terme de nombre de jours mais plus précocement en °C.j cumulés. Les sols d'altitude sont plus superficiels et acides (pH faible) et ont de fortes teneurs en aluminium et fer, mais faibles teneurs en CaO et MgO. Leur forte teneur

en carbone et matière organiques, ainsi qu'en azote total leur confère de forts CEC et rapport C/N. Les propriétés du sol et des pratiques s'expriment aussi via les indices d'Ellenberg, montrant un faible indice de fertilité et un faible état calcique des sols d'altitude, et une végétation légèrement plus adaptée au pâturage.

La deuxième dimension regroupe principalement des propriétés liées à la texture des sols. Elle est positivement corrélée à la teneur en argile et en limons, mais à de faibles teneurs en sables : ces textures permettent une CEC élevée ainsi qu'une forte réserve utile. Cette dimension montre aussi une corrélation positive avec le pH (sols basiques), et les teneurs en CaO, MgO et Na_2O. Les sols argileux et limoneux sont dans des paysages de cultures (CLC_211) mais sont peu liés aux pratiques agricoles : ils sont légèrement moins fertilisés et utilisés plus tardivement.

La troisième dimension est liée à de forte évapotranspirations en particulier entre les mois d'aout et d'octobre. Son paysage est riche en landes et broussailles (CLC_322) et en prairies de plaines (CLC_231), mais est peu lié aux pratiques agricoles : la troisième dimension est légèrement corrélée aux pâturages et à des utilisations plus précoces.

Les dimension 4 et 5 discriminent les prairies selon les pratiques agricoles. La dimension 4 est corrélée aux prairies de fauches peu fertilisées sur sols acides pauvres en MgO, K_2O et CaO échangeables. Son paysage est plutôt composé de tissu urbain (CLC_112) et de forêts de conifères (CLC_312). La dimension 5 est corrélée aux prairies pâturées ayant de forts chargement (j.UGB/ha), un nombre élevé de jours pâturés et un nombre élevé de sessions de pâturage dans l'année. Cette dimension est corrélée à des utilisations précoces en nombre de jours et en °C.j cumulés.

L'ACP montre donc principalement un effet de l'altitude et des variables qui lui sont corrélées, qui expliquent 33% de la variance, et un effet de la texture qui explique près de 13% de la variance. L'effet des pratiques est moins important, il est en partie corrélé à l'altitude (les prairies d'altitude sont plus pâturées) mais se voit principalement dans les dimensions 4 et 5 qui rassemblent respectivement les prairies de fauche peu fertilisées et les pâtures fertilisées. Cependant ces dimensions n'expliquent que 8,0% et 5,5% de la variance.

3.1.2. Classifications des prairies selon les critères prédictifs

La classification hiérarchique en composantes principales permet de classer les prairies selon leurs critères du milieu et des pratiques (Figure 16). L'étude des sauts d'inertie indique que les prairies doivent être séparées en trois classes pour obtenir la classification la plus solide, cependant l'identification de sept classes permet de maximiser le nombre de classes sans isoler de prairies.

Ces classes rassemblent les prairies ayant des critères du milieu (climat, sol, paysage) et des pratiques agricoles similaires. Tous les liens significatifs ($p < 0,05$) sont présentés en Annexe 8, et les principaux liens ainsi que leurs valeurs pour chaque critère et classe sont présentés dans le Tableau 9.

L'effet altitude (altitude mais aussi température, précipitations, évapotranspiration, teneur en matière organique, …) est bien visible avec un gradient partant des classes 1 et 2 (faible altitude) vers les classes 6 et 7 (forte altitude).

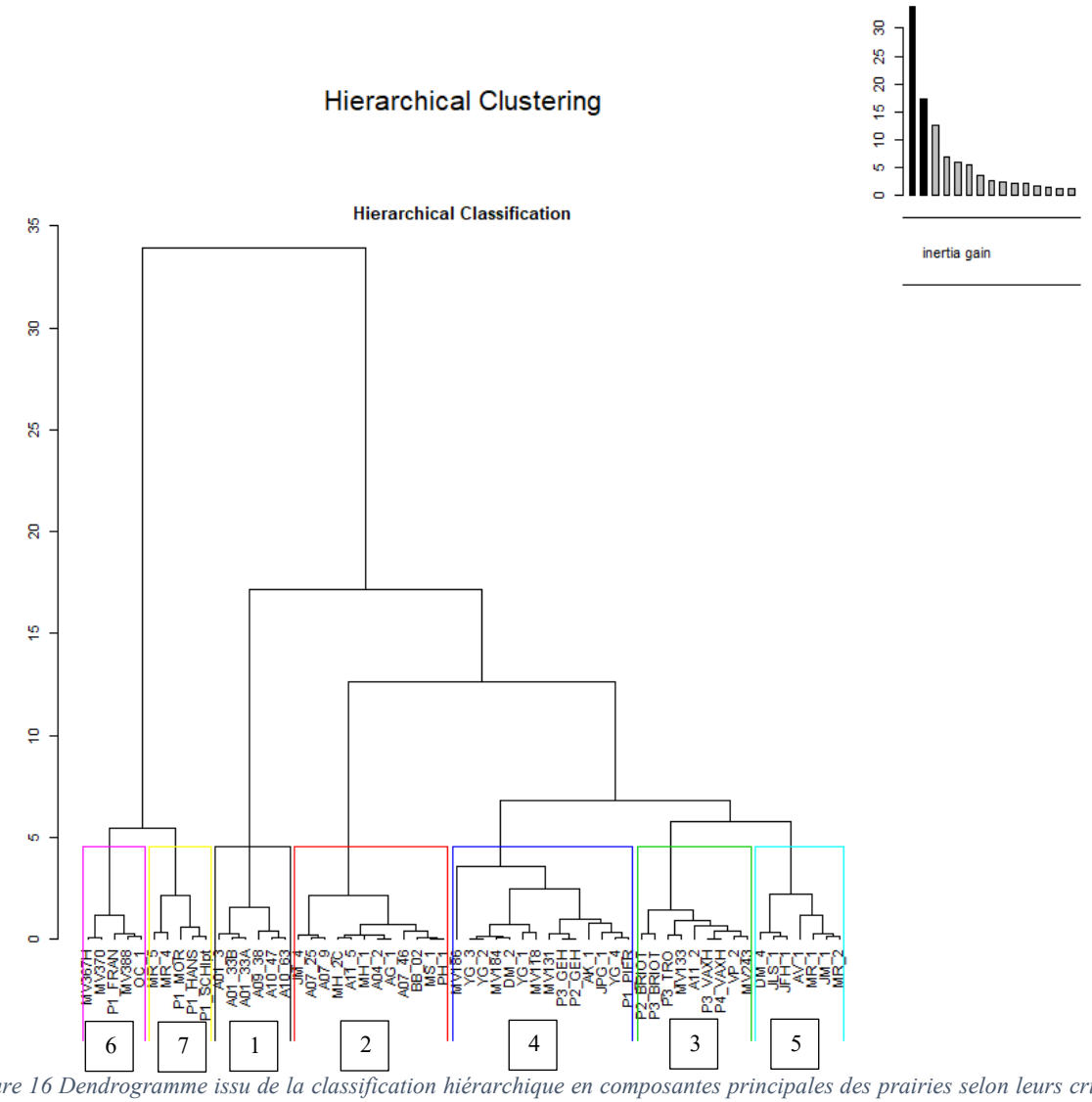


Figure 16 Dendrogramme issu de la classification hiérarchique en composantes principales des prairies selon leurs critères du milieu et des pratiques

L'effet texture (texture, mais aussi CEC, réserve utile, pH, teneur en aluminium, …) permet principalement de différencier les classes de prairies à une même altitude : les classes 1 et 2 ont des altitudes similaires (266 m et 278 m) mais la première est argileuse et limoneuse alors que la seconde est sableuse. Ainsi, la classe 1 rassemble les prairies de basses altitude plutôt calcaires typiques des bords du massif des Vosges du Nord, alors que la classe 2 rassemble les prairies de faible altitude sableuse et donc sur grès, typiques du centre des Vosges du Nord et des vallées des Vosges moyennes.

Enfin, l'effet des pratiques permet aussi de discriminer les classes de prairies. La classe 1 est plus fauchée et moins pâturée que la classe 2. De même, les classes 6 et 7 sont à des altitudes similaires (1067 m et 1117 m), mais ont des utilisations différentes : la classe 7 regroupe les prairies plutôt pâturées (193 J.UGB/ha) alors que la classe 6 regroupe les prairies plutôt fauchées (64 j.UGB/ha). Enfin, les classes 4 et 5 ont des altitudes et textures similaires mais des pratiques différentes : la classe 4 est plus pâturées, reçoit une fertilisation total azotée supérieure et est utilisée plus précocement.

Tableau 9 Principaux liens entre critères du milieu, pratiques agricoles et classes de critères

	Classe 1 (noir)	Classe 2 (rouge)	Classe 3 (vert)	Classe 4 (bleu)	Classe 5 (turquoise)	Classe 6 (violet)	Classe 7 (jaune)	**Moyenne**
Altitude	266	278	476	624	674	1067	1117	**578**
Température moyenne	10,4	10,4	9,8	9,2	8,7	7,5	6,8	**9,3**
Radiations cumulées	387883	379965	409090	407522	387462	443061	401324	**399476**
Précipitations cumulées	874	917	1429	1439	1551	2157	2188	**1415**
Evapotranspiration cumulée	653	644	659	627	601	603	553	**626**
Réserve utile cumulées	865	600	856	528	748	443	694	**675**
CLC_112 (tissu urbain)	3,8	14,6	16,9	11,0	7,1	0	2,5	**9,7**
CLC_211 (terres arables)	53,5	1,0	0	2,6	0	0	0	**6,2**
CLC_321 (prairies naturelles)	0	0	0	2,2	5,7	24,0	44,5	**7,2**
Argile	370,0	97,3	171,9	138,5	165,3	157,2	213,0	**171,9**
Limons fins	277,0	106,7	262,8	177,9	191,0	204,6	241,8	**197,9**
Limons grossiers	165,8	69,4	145,7	87,0	96,2	87,8	109,0	**105,0**
Sables fins	74,0	266,6	137,1	116,7	161,1	146,4	129,4	**157,4**
Sables grossiers	113,3	459,9	282,1	479,5	386,2	404,0	307,0	**367,7**
Carbone organique	43,3	28,4	53,2	43,8	69,0	94,0	130,1	**57,9**
C/N	9,9	11,0	11,5	10,7	12,0	13,6	15,0	**11,6**
CEC	242,3	85,3	197,2	175,9	223,2	268,4	349,4	**198,0**
pH	7,5	5,5	5,5	5,7	4,8	5,0	5,0	**5,6**
Aluminium échangeable	0,0	28,3	56,5	17,9	248,7	231,2	299,0	**103,3**
Date d'utilisation (jours)	155,7	152,6	150,6	129,2	148,5	177,6	183,8	**152,4**
Date d'utilisation (°C.jours)	1312,9	1221,1	1151,7	765,2	936,1	1148,0	1105,7	**1071,7**
Fertilisation total N	20,8	47,3	47,9	89,2	59,3	77,0	59,4	**58,0**
Fertilisation total P	14,5	27,4	22,2	48,2	29,8	37,4	31,4	**30,7**
Fertilisation total K	26,8	63,8	55,2	119,2	75,5	99,7	73,9	**74,8**
Nombre de fauches	1,8	1,2	2,1	1,5	0,8	0,8	0,6	**1,3**
Nombre de pâturages	0,3	0,7	0,5	1,8	1,4	0,4	1,2	**1,0**
Chargement (j.UGB/ha)	42	138	45	184	92	64	193	**112**
Ellenberg : fertilité	5,2	5,0	5,3	5,6	4,4	4,4	4,4	**5,0**
Ellenberg : état calcique	5,2	5,3	5,5	5,6	4,5	4,7	4,4	**5,1**

Les corrélations observées grâce à l'ACP permettent donc d'expliquer les classes de prairies construites grâces aux critères du milieu et des pratiques. Ces résultats montrent un fort effet altitude issu des corrélations entre altitude, climat, paysage et sol, mais une indépendance assez forte entre altitude et pratiques agricoles : les prairies peuvent être fauchées ou pâturées, recevoir des fertilisations plus ou moins fortes à toutes altitudes. Enfin, un fort gradient texture permet de discriminer les prairies, en particulier à faible altitude où les différences sont beaucoup plus forte qu'en altitude grâce à la présence de sols argileux et calcaires (classe 1) et de sols sableux plus acides (classe 2).

3.2. Sélection des meilleurs critères prédictifs de la végétation

La sélection pas-à-pas a identifié les critères permettant la meilleure prédiction des compositions botaniques (Tableau 10).

Tableau 10 Détail des critères sélectionnés pour la prédiction de la présence et de l'abondance des espèces botaniques

Afin de mieux les discerner, les critères servant à la fois à la prédiction des présences et des abondances sont soulignés. Les critères du sol peuvent concerner l'horizon 0-10 cm (1) et/ou l'horizon 10-30 cm (2). La composition du paysage a été estimé grâce à la nomenclature Corine Land Cover : zone urbanisée (CLC_112), terres arables non irriguées (CLC_211), vergers (CLC_222), prairies permanentes (CLC_231), forêts de conifères (CLC_312), forêts mixtes (CLC_313).

<table>
<tr><th></th><th colspan="3">Présences</th><th colspan="3">Abondances</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Sol</td><td rowspan="2">Al échangeable [1+2]
K_2O échangeable [1]
MgO échangeable [1]
Mn échangeable [2]
N total [1]
pH [2]
CEC Metson [2]
C/N [1]
Matière organique [1]
Carbone organique [2]</td><td rowspan="2">R² ajusté = 0,198</td><td rowspan="6">R² ajusté = 0,256</td><td rowspan="2">Al échangeable [1+2]
K_2O échangeable [1]
Na_2O échangeable [2]
P_2O_5 assimilable [1]
Carbonate total [2]
Limons grossiers [1]</td><td rowspan="2">R² ajusté = 0,226</td><td rowspan="6">R² ajusté = 0,310</td></tr>
<tr></tr>
<tr><td rowspan="2">Environnement</td><td rowspan="2">Précipitations février
Précipitations juin
Précipitations juillet
Températures juillet
CLC_211
CLC_312
CLC_313
Précipitations mars
Précipitations novembre</td><td rowspan="2">R² ajusté = 0,163</td><td rowspan="2">Précipitations février
Précipitations juin
Précipitations juillet
Températures juillet
CLC_211
CLC_112
CLC_222
CLC_231
Pente</td><td rowspan="2">R² ajusté = 0,218</td></tr>
<tr></tr>
<tr><td rowspan="2">Pratique</td><td rowspan="2">Première utilisation
Date de 1ère utilisation
Somme de température à la 1ère utilisation
Fertilisation organique N</td><td rowspan="2">R² ajusté = 0,109</td><td rowspan="2">Première utilisation
Date de 1ère utilisation
Somme de température à la 1ère utilisation</td><td rowspan="2">R² ajusté = 0,131</td></tr>
<tr></tr>
</table>

Les critères édaphiques sélectionnés par l'analyse concernent à la fois l'horizon superficiel (0-10 cm) et l'horizon profond (10-30 cm) (respectivement notés 1 et 2 dans le Tableau 10). De nombreux critères sont liés au type de sol, et notamment à son niveau d'acidité : pH bien sûr mais aussi taux d'aluminium ou de matière organique, CEC, rapport C/N ou encore carbonates totaux. Ces critères se retrouvent pour la prédiction des présences et des abondances. D'autres critères sont liés à la fertilité du sol comme la teneur en N (azote), en K_2O (oxyde de potassium) et en P_2O_5 (pentoxyde de phosphore). Trois critères du sol apparaissent pour la prédiction des

présences et des absences : la teneur en Al échangeable dans l'horizon 0-10, cette même teneur dans l'horizon 10-30 cm, et la teneur en K_2O échangeable dans l'horizon 0-10 cm.

Les critères édaphiques traduisent donc un effet de l'altitude : pH, N total, CEC Metson, C/N, matière organique et carbone organique sont tous bien corrélés à l'altitude. Les critères sélectionnés traduisent aussi un effet de la texture : MgO échangeable, N total, pH, CEC Metson, Na_2O échangeable, carbonate total, limons grossiers sont corrélés à la deuxième dimension de l'ACP principalement influencée par la texture des sols. Enfin, K_2O et P_2O_5 montrent plutôt un effet des pratiques agricoles telles que la fertilisation et le mode d'utilisation (Annexe 6).

Les critères environnementaux sélectionnés font principalement référence aux précipitations, aux températures et au paysage, mais la pente est aussi un bon prédicteur de l'abondance des espèces prairiales. Plus particulièrement, les précipitations des mois de février, juin et juillet ainsi que les températures du mois de juillet sont nécessaires à la bonne prédiction des présences et des abondances. La proportion de terres arables non irriguées dans le paysage (CLC_211) est aussi un prédicteur des présences et des abondances.

Ces variables traduisent donc l'effet altitude montré lors de l'analyse des corrélations entre critères : température, précipitations et proportion de prairies naturelles dans le paysage sont toutes corrélées à l'altitude. Dans une moindre mesure, la pente, la proportion de tissu urbain (CLC_112), de terres arables (CLC_211), de vergers (CLC_222) et de forêt de conifères (CLC_312) sont aussi corrélées à l'altitude.

Enfin, les critères liés aux pratiques agricoles sont : le mode de la première d'utilisation (fauche ou pâturage), la date de 1ère utilisation et la température cumulée (°C.j) lors de la première utilisation. La fertilisation azotée organique est uniquement liée aux présences botaniques.

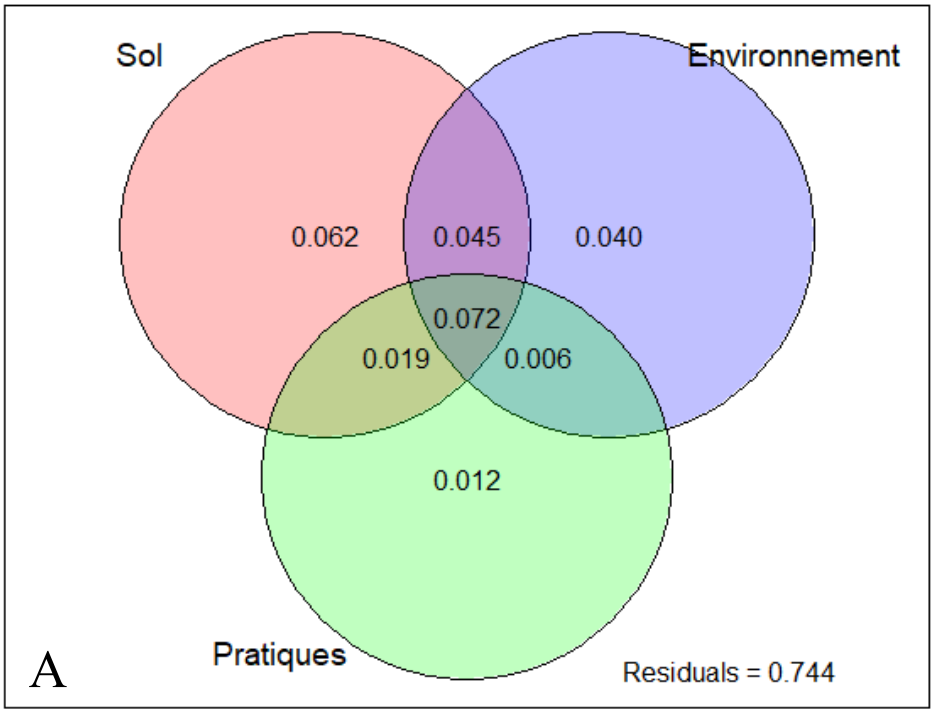
Ces critères montrent un effet des pratiques agricoles : les prairies utilisées précocement sont généralement des pâturages, mais la fertilisation organique N est indépendante de ces critères. On peut donc observer à la fois un impact du mode d'utilisation et de la fertilisation.

3.3. Qualité des prédictions

Les critères édaphiques sélectionnés sont de meilleurs prédicteurs des présences et des abondances que les critères environnementaux et ceux liés aux pratiques agricoles, ce qui se traduit pas des R^2 ajustés plus élevés (Tableau 10). Les pratiques sélectionnées n'expliquent qu'une faible part de la variation des présences et des abondances (respectivement 0,109 et 0,131). Réunir tous les critères sélectionnés ne permet d'expliquer que 25,6% de la variance des présences et 31,0% de la variance des abondances. Bien que la variance expliquée soit assez faible, tous les modèles sont significatifs selon les ANOVA.

Il est intéressant de noter qu'il existe des colinéarités entre variables édaphiques, environnementales et liées aux pratiques, à la fois pour la prédiction des présences que des abondances (Figure 17). C'est pourquoi la somme des R^2 ajustés individuels est supérieure aux R^2 ajustés de l'ensemble des critères sélectionnés. Les colinéarités sont légèrement plus élevées lors de la prédiction des abondances, où elles s'élèvent à un total de 0,169 contre 0,142 pour les présences. Grâce à l'étude des colinéarités, on peut s'apercevoir que les pratiques agricoles n'expliquent qu'une très faible part de la variabilité à elles seules : leurs R^2 ajustés ne sont que

de 0,012 pour les présences et 0,007 lorsque l'on omet les colinéarités déjà expliquées par les critères édaphiques et environnementaux. Les R^2 ajustés de ces derniers seuls sont de 0,246 pour les présences et 0,303 pour les abondances, contre 0,256 et 0,310 lorsque les pratiques sont inclues dans la prédiction.



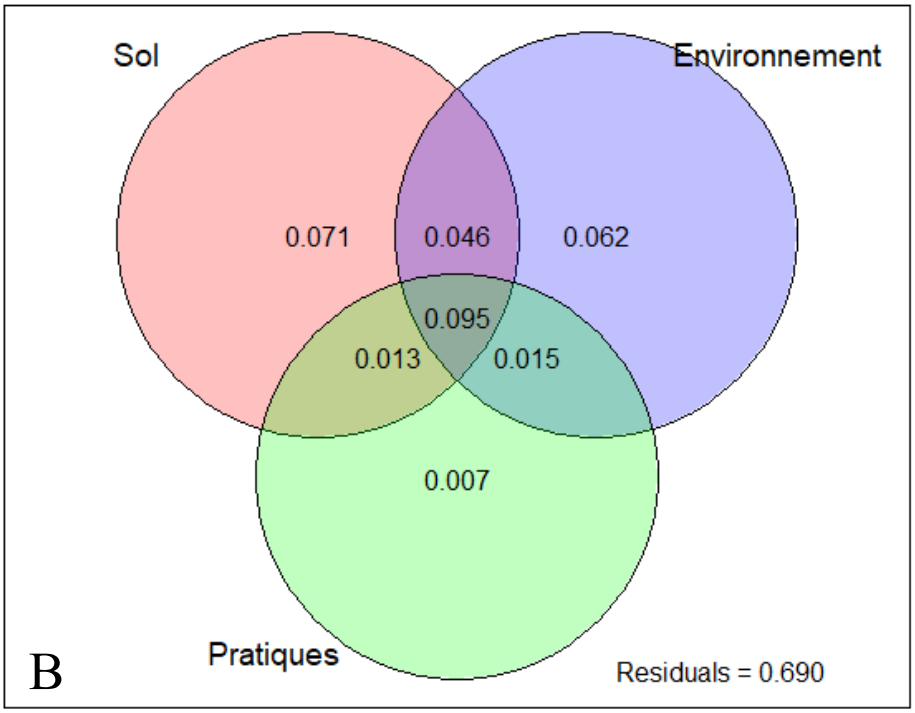


Figure 17 Parts de la présence (A) et de l'abondances (B) des espèces botaniques expliquées par le sol, l'environnement et les pratiques

La part non expliquée est donnée pour la présence et pour l'abondance sous le terme « residuals ».

Enfin, ces analyses nous montrent que 74,4 % de la présence et 69,0% des abondances restent inexpliquées par les critères étudiés. Cette part inexpliquée est très élevée, bien que de nombreux critères aient été étudiés pour affiner les prédictions. Cette faible part peut être due au manque de précision de certains critères. Par exemple l'humidité du sol a été modélisée de façon à obtenir une réserve utile mensuelle, mais les mailles de 1 km² ne peuvent pas prendre en compte les variations qui façonnent pourtant différentes communautés au sein d'une même parcelle. Certains critères n'ont pas pu être pris en compte, par exemple l'espèce et la race qui pâture participe à façonner les communautés prairiales (Pauler et al., 2019; Tóth et al., 2018). De même, des graines peuvent être transportées par les animaux au pâturage lors de changement de prairies (Römermann et al., 2005). Il faudrait donc connaitre la composition des autres prairies ou même des prairies proches pour affiner les modèles développés dans cette thèse. Enfin, l'âge de la prairie n'est pas apparu comme critère important à la prédiction de la végétation, mais l'historique des pratiques agricoles sur la prairie (historique des fertilisations et des chargements des pâturages par exemple) n'a pas pu être étudié.

3.4. Liens entre critères sélectionnés et espèces

Les deux premiers axes de la RDA expliquent 24 % de la variance des présences d'espèces (Figure 18A).

Le quart inférieur gauche montre les espèces des milieux ayant une forte fertilisation azotée organique et un sol riche en potassium échangeable. Ces espèces sont *Trifolium repens* (Trirepe), *Plantago lanceolata* (Plalanc), *Trifolium pratense* (Triprat), *Lolium perenne* (Lolpere), *Taraxacum* sp. (Taraxsp) et *Ranunculus acris* (Ranacri). A l'inverse, le quart supérieur droit rassemble donc des milieux peu fertiles et où la première utilisation est tardive en nombre de jours, dont les principales espèces sont du genre *Carex* (Carexsp). Cet axe montre donc un effet de la fertilisation mais aussi des mode d'utilisations car les prairies tardives sont généralement des prairies fauchées.

Le quart supérieur gauche regroupe les espèces *Bromus erectus* (Broerec*), Daucus carota* (Daucaro) et *Primula veris* (Priveri), caractérisées par des milieux secs et basiques, chauds, dont de nombreuses cultures sont présentes dans le paysage (CLC 211), mais aussi par des utilisations tardives en °C jour cumulées depuis le 1er février. Ces milieux s'opposent donc au quart inférieur droit, caractérisé par une forte pluviométrie, des sols riches en matière organique et en aluminium et dont la première utilisation est du pâturage. Cependant, ce quart inférieur droit ne semble pas lié à des espèces dont la qualité de prédiction est suffisamment bonne. Ces critères sont principalement liés à un effet de l'altitude : températures, précipitations, paysage, teneur en aluminium, carbone organique, matière organique et C/N du sol y sont tous liés. La date de première utilisation, légèrement corrélée à l'altitude indique surtout des prairies pâturées. *Bromus erectus* (Broerec*), Daucus carota* (Daucaro) et *Primula veris* (Priveri) sont donc des espèces associées à des prairies de fauches de faible altitude.

Enfin, les espèces *Galium saxatile* (Galsaxa), *Vaccinium myrtillus* (Vacmyrt), *Potentilla erecta* (Poterec) et *Cytisus scoparius* (Cytscop) sont fortement liées à l'axe 1, et donc aux critères tels que la teneur en aluminium, la teneur en carbone et matière organiques ou encore le pâturage. Ce sont donc des espèces de prairies pâturées d'altitude élevées.

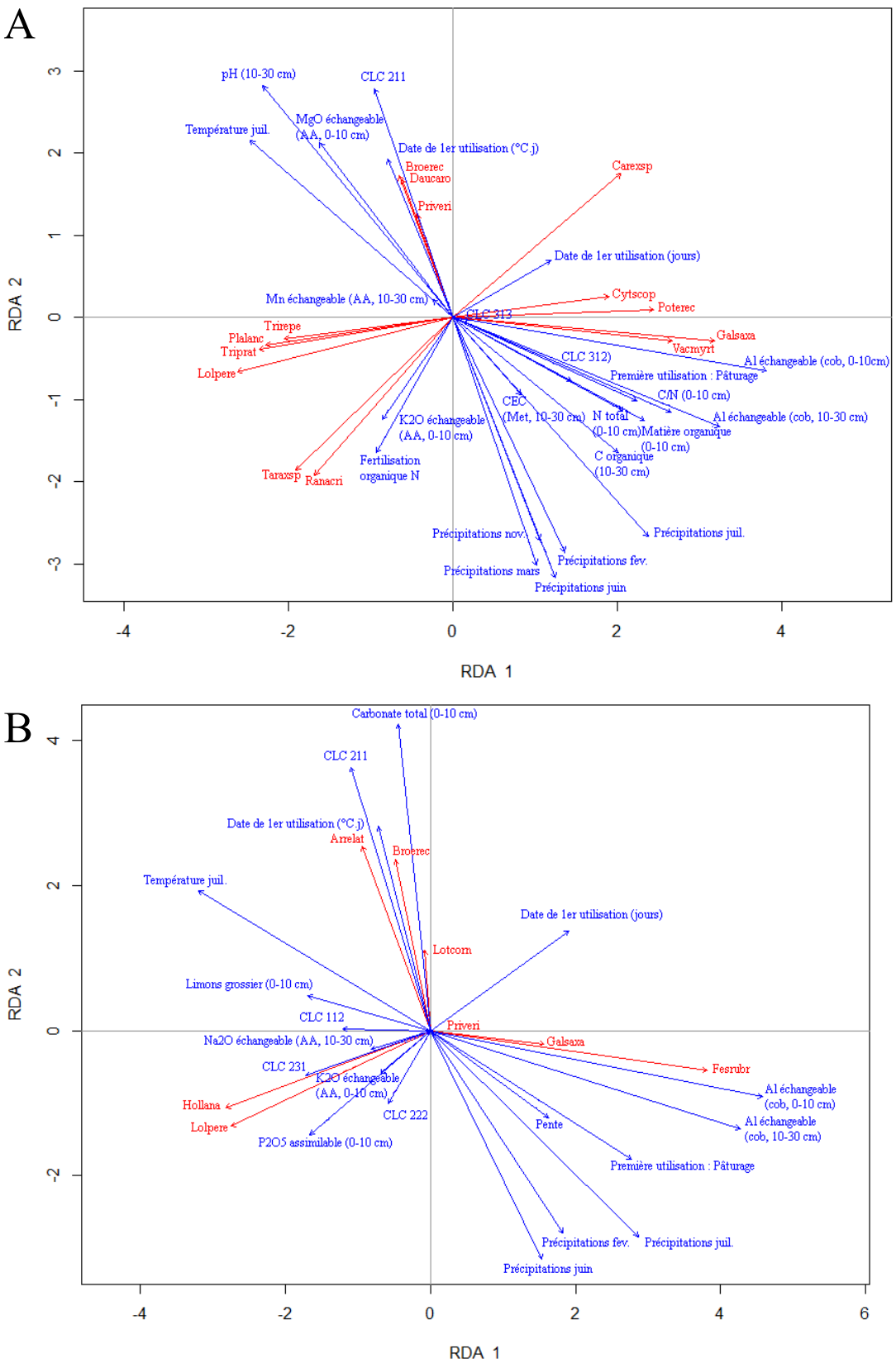


Figure 18 Projections des présences (A) et des abondances (B) des espèces les mieux prédites et des critères sélectionnés

Le détail des corrélations entre axes et critères, et entre axes et espèces est présenté en (Annexe 7)

Concernant la prédiction des abondances d'espèces (Figure 18B), les deux premiers axes de la RDA expliquent 24 % de la variance.

L'axe 1 montre un effet des pratiques agricoles et de l'altitude, avec des critères de fertilité à sa gauche (P_2O_5 assimilable et K_2O échangeable) et de fortes températures, et à sa droite des critères liés à la teneur en aluminium du sol, à de fortes précipitations et une première utilisation sous forme de pâturage tardif. Ce gradient d'intensification se vérifie par des espèces caractéristiques de milieux fertiles (*Lolium perenne* Lolpere, *Holcus lanatus* Hollana) et de milieux pauvres (*Festuca rubra* Fesrubr et *Galium saxatile* Galsax).

Le second axe montre un effet de la texture par la teneur en carbonates liée aux argiles et limons, un effet de l'altitude avec un paysage riche en terres arables (CLC 211) lié aux faibles altitudes, et un effet du mode d'utilisation par l'utilisation tardive liée aux prairies de fauches. Ce second axe est fortement lié aux espèces *Arrhenatherum elatius* (Arrelat), *Bromus erectus* (Broerec) et *Lotus corniculatus* (Lotcorn).

4. Conclusion

Cette première partie est dédiée à la prédiction des compositions botaniques par des critères édaphiques, environnementaux et liés aux pratiques.

La sélection des meilleurs critères montre que des gradients liés à l'altitude, à la texture, et à l'intensification des pratiques semblent gouverner les compositions botaniques. Bien que ne correspondant pas exactement, les critères sélectionnés pour la prédiction des présences et ceux pour la prédiction des abondances sont souvent similaires. Enfin, les critères liés aux pratiques agricoles ne jouent qu'un faible rôle dans la prédiction des compositions botaniques, et bien que de nombreux critères aient été étudiés les prédictions conservent une forte incertitude.

Nous avons ensuite pu observer les liens entre critères prédictifs et les espèces les mieux prédites. Ces liens semblent montrer des gradients d'intensifications, d'altitude et d'acidité du sol. Cependant, les espèces les mieux prédites ne sont pas les mêmes que l'on cherche à prédire la présence ou l'abondance des espèces.

Après avoir cherché à prédire les compositions botaniques, il est important de prédire les propriétés prairiales car c'est souvent elles qui intéresseront plus particulièrement les agriculteurs et autres gestionnaires des prairies.

Partie 1.B Prédiction des propriétés par le milieu, les pratiques et la végétation

1. Introduction

La prédiction de la végétation peut être utile aux écologues, en particulier pour mieux comprendre les effets du milieu et des pratiques agricoles sur la présence et l'abondance d'espèces, et sur les associations botaniques.

Bien que cette prédiction se soit montrée peu précise, elle a permis de mieux comprendre les liens entre critères du milieu et des pratiques, et de mettre en avant de potentielles espèces indicatrices : l'abondance de *Festuca rubra* est fortement liée aux sol acides, l'abondance d'*Arrhenatherum elatius* est liée à la date d'utilisation, … Cependant, cette prédiction s'est révélée peu précise à l'échelle de la communauté botanique, et prédire une liste de plante peut s'avérer peu utile aux agronomes et décideurs politiques. C'est pourquoi je me suis aussi intéressé à prédire des propriétés agroécologiques en m'appuyant sur des critères du milieu, des pratiques agricoles et de la végétation.

2. Matériels et méthodes

Afin de limiter le nombre d'analyses à réaliser, j'ai sélectionné les propriétés selon leurs corrélations et leurs intérêts. J'ai réalisé une Analyse en Composantes Principales (ACP) entre les propriétés agronomiques et entre les propriétés écologiques pour ne garder que les propriétés les mieux corrélées à chaque dimension, qui permettent d'étendre les résultats aux autres propriétés corrélées aux mêmes dimensions. Pour cela, j'ai utilisé le logiciel R et le package vegan (Husson et al., 2020; R Core Team, 2019). Je me suis assuré de garder des propriétés importantes pour les agriculteurs et leurs conseillers, j'ai donc sélectionné des propriétés agronomiques liées au rendement et à la qualité fourragère, et des propriétés écologiques liée à la diversité et à la présence d'espèces patrimoniales. Les propriétés ont été calculées et/ou mesurées selon diverses méthodes (Tableau 11 et Tableau 12).

Dans un second temps, j'ai modélisé chacune des propriétés sélectionnées par les critères du milieu (sol, climat, paysage), les pratiques agricoles et la végétation (présence et abondance des espèces, associations, et indices d'Ellenberg pour la fertilité, l'humidité et l'état calcique), soit 608 critères. Pour cela, j'ai réalisé pour chaque propriété une sélection des meilleurs critères prédictifs grâce à 50 forêts aléatoires d'arbres de régression (*Random Forest*), en utilisant le logiciel R et le package VSURF (Genuer et al., 2015; R Core Team, 2019). Chaque forêt est composée de 2000 arbres de régression basés sur 202 critères sélectionnés aléatoirement. Les meilleurs critères prédictifs sont sélectionnés selon leur importance pour la prédiction de la propriété (*preliminary step*), selon leur capacité à produire des forêts aléatoires de bonnes qualités (*selection step for interpretation*), puis afin d'éviter les critères corrélés entre eux (*selection step for prediction*). Afin d'éviter de prédire la végétation par la végétation, j'ai aussi modélisé les propriétés écologiques liées à la diversité botanique en n'utilisant que les critères du milieu et des pratiques. De même, j'ai modélisé le stock de carbone sans critères liés à la matière organique du sol (teneur en matière organique, en carbone organique, en azote, et rapport C/N). Afin d'estimer la fiabilité des critères sélectionnés, j'ai créé une nouvelle forêt

aléatoire uniquement composée des critères sélectionnés grâce package RandomForest du logiciel R (Breiman et al., 2018; R Core Team, 2019).

Enfin, pour chaque propriété, j'ai utilisé les critères sélectionnés pour créer un arbre de régression par propriété. Cet arbre a un pouvoir prédictif inférieur à celui d'une forêt aléatoire, mais permet d'avoir une idée des critères discriminants et de proposer de premiers outils à destination des conseillers agricoles et écologues.

Tableau 11 Méthodes de détermination des 12 propriétés agronomiques

Rendement	Mesuré lors de la première utilisation, d'après la matière fraiche et le pourcentage de matière sèche
Rendement (1100°C.j)	Rendement × 1100 / °C.j, où °C.j est le cumule de température entre le 1er février et le jour de récolte du fourrage
Valeur pastorale	Σ(Yk × valeur fourragère de l'espèce), où Yk est l'abondance relative de l'espèce k (0<Yk≤100). Pour chaque espèce, la valeur fourragère a été estimée à dire d'expert selon leur potentiel de rendement, valeur nutritive, appétence et digestibilité (Daget and Poissonet, 1971)
PDIN et PDIE	Calculées d'après les analyses fourragères, selon les formules de INRA (2010)
UFL, UFB, UFM	Calculées d'après les analyses fourragères, selon les formules de INRA (2010)
UEL, UEB, UEM	Calculées d'après les analyses fourragères, selon les formules de INRA (2010)
Production laitière	Calculé pour une vache standard (Tableau 6), selon les formules de INRA (2010)
Teneurs en minéraux	Calcium, Phosphore, Sodium, Magnésium et Potassium mesurés lors des analyses fourragères (Tableau 5)
Antioxydants	Mesurés par la méthode DPPH (Zou et al., 2011)
Souplesse	Calculée d'après les types fonctionnels de graminées et dicotylédones selon Theau et al. (2017) : %Gramb + %GramC + %Leg + %DivM2 + %DivM3
Précocité	Calculée d'après les types fonctionnels de graminées et dicotylédones selon Theau et al. (2017) : %GramA + %GramB + %GramC + %GramE + %Div1
Refus	Calculée d'après les types fonctionnels de graminées et dicotylédones selon Theau et al. (2017) : %GramD + %DivH

Tableau 12 Méthodes de détermination des 8 propriétés écologiques

Richesse spécifique	Nombre d'espèces vasculaires observées
Indice de Shannon	$-\Sigma(Yk \times \log_2 Yk)$, où Yk est l'abondance relative de l'espèce k ($0<Yk\leq1$)
Indice de Simpson	$1 - \Sigma(Yk^2)$, où Yk est l'abondance relative de l'espèce k ($0<Yk\leq1$)
Equitabilité	Indice de Shannon / log2(Richesse spécifique)
Richesse en familles	Nombre de familles d'espèces vasculaires observées
Richesse en espèces oligotrophiles	Nombre d'espèces vasculaires observées avec un indice d'Ellenberg de 1 à 3
Valeur nectarifère	Σ(Yk × valeur nectarifère individuel), où Yk est l'abondance relative de l'espèce k ($0<Yk\leq100$). Pour chaque espèce, la valeur nectarifère a été fournie par eFLORAsys et s'étend de 0 (mauvaise) à 4 (très bonne) (Plantureux and Amiaud, 2010, 2009)
Stock de carbone	$Stock = BD \times \%C \times Profondeur$ où $BD = \frac{100}{\frac{\%MO}{0.244}+\frac{100-\%MO}{1.64}}$ d'après Post & Kwon (2000)

3. Résultats

3.1. Sélection des propriétés

L'ACP entre les propriétés agronomiques représente 83,6% de la variance sur les 6 premières dimensions. J'ai sélectionné des propriétés exprimant la quantité de fourrage produite : le rendement normalisé à 1100°C.j et la valeur pastorale, tous deux corrélés positivement à la dimension 2 (Tableau 13). J'ai ensuite sélectionné des propriétés traduisant la qualité fourragère : l'énergie exprimé en Unité Fourragère Lait (UFL) et les protéines exprimées en Protéines Digestibles dans l'Intestin permise par l'azote (PDIN), fortement corrélées à l'axe 1 (Tableau 13). Enfin, j'ai sélectionné deux propriétés peu étudiées : la souplesse et la précocité de la végétation, respectivement corrélées à la deuxième et à la quatrième dimension (Tableau 13).

L'ACP entre les propriétés écologiques liées à la diversité botanique explique 84,6 % de la variance sur ces deux premières dimensions, et 99,3% sur les cinq premières dimensions. J'ai sélectionné une propriété traduisant la diversité et l'abondance des espèces botaniques (l'indice de Shannon, fortement corrélé à la première dimension) et une propriété traduisant la diversité des espèces botaniques patrimoniales (la richesse en oligotrophiles, fortement corrélée à la deuxième dimension) (Tableau 14).

Enfin, j'ai étudié des propriétés agroécologiques originales et peu étudiées, telles que la valeur nectarifère, la teneur en antioxydants et le stock de carbone dans le sol.

Tableau 13 Corrélation entre propriétés agronomiques

	Dimension 1	Dimension 2	Dimension 3	Dimension 4	Dimension 5
Rendement	-0,44	0,67	0,38	-0,02	-0,13
Rendement à 1100°C.j	-0,16	0,70	0,40	0,07	0,00
Valeur pastorale	0,04	0,79	-0,09	0,11	-0,26
Matière sèche (%)	-0,37	-0,73	0,17	-0,18	-0,40
Digestibilité (%)	0,96	0,06	0,01	0,02	-0,02
UFL	0,96	0,07	0,00	0,02	-0,01
UFV	0,96	0,07	0,00	0,01	-0,01
PDIE	0,72	0,05	0,50	0,34	0,19
PDIN	0,91	0,18	-0,22	-0,02	0,17
UEL	-0,77	0,50	-0,02	0,15	0,24
UEB	-0,80	0,47	-0,03	0,14	0,23
UEM	-0,80	0,47	-0,04	0,13	0,24
Production laitière	0,84	-0,13	0,42	0,23	0,09
Calcium	0,25	0,45	0,24	-0,47	-0,46
Phosphore	0,60	0,50	-0,37	-0,11	0,17
Sodium	0,02	0,29	0,24	0,56	-0,25
Magnésium	0,59	0,50	0,06	-0,34	-0,24
Potassium	0,59	0,52	-0,45	-0,11	0,25
Souplesse	-0,08	-0,70	0,13	-0,09	0,45
Précocité	0,20	-0,07	-0,43	0,63	-0,29
Refus	0,05	0,26	0,48	-0,33	0,40

Tableau 14 Corrélations entre propriétés liées à la diversité botanique

	Dimension 1	Dimension 2	Dimension 3	Dimension 4	Dimension 5
Richesse spécifique	0,75	0,52	-0,28	-0,02	0,28
Shannon	0,97	0,07	0,19	0,02	0,04
Simpson	0,96	-0,04	0,20	0,09	0,01
Equitabilité	0,89	-0,19	0,39	0,02	-0,09
Richesse en famille	0,46	0,78	-0,34	0,10	-0,25
Richesse en oligotrophiles	-0,30	0,83	0,39	-0,26	-0,02
Abondance des oligotrophiles	-0,74	0,48	0,32	0,32	0,09

J'ai donc choisi d'étudier la quantité de fourrage via le rendement à 1100°C.j et la valeur pastorale ; la valeur alimentaire via l'énergie (UFL), les protéines (PDIN) et la teneur en antioxydants ; la valeur fourragère via la souplesse et la précocité de la végétation ; et la valeur écologique via l'indice de Shannon, la richesse en espèce oligotrophiles, la valeur nectarifère et le stock de carbone.

3.2. Prédiction des propriétés agroécologiques

J'ai modélisé chacune des variables précédemment sélectionnées en utilisant les pratiques agricoles, le milieu et la végétation.

On peut voir que sur les 11 propriétés agroécologiques étudiées, 9 ont une variance fortement prédictible (> 50 %) : la valeur pastorale (75,75 %), la teneur en protéines PDIN (73,91 %), l'énergie UFL (65,82 %), la souplesse d'exploitation (65,95 %), l'indice de Shannon avec et sans critères de la végétation (73,07 % et 66,91 %), la richesse en oligotrophiles avec les critères de la végétation (70,45 %) et le stock de carbone avec et sans critères de la matière organique du sol (99,08 % et 80,96 %) (Tableau 15).

Les propriétés ont besoin d'un nombre variable de critères pour être prédites au mieux: d'un seul critère pour le stock de carbone à 11 critères pour l'indice de Shannon. Parmi les critères prédictifs sélectionnés, 35 sont liés à la végétation (en vert), 19 sont liés au sol (noir), 4 sont liés aux pratiques agricoles et 2 sont liés au climat. Certains de ces critères peuvent être utiles à la prédiction de plusieurs propriétés, par exemple la date d'utilisation est utilisé pour la prédiction de 4 propriétés (PDIN, UFL, richesse en oligotrophiles sans critère de la végétation et valeur nectarifère), ainsi que l'indice d'Ellenberg pour la fertilité (Rendement 1100°C.j, valeur pastorale, indice de Shannon, richesse en oligotrophiles) et Triprat *Trifolium pratense* (valeur pastorale, antioxydants, indice de Shannon et valeur nectarifère) (Tableau 15).

Tableau 15 Prédiction des propriétés agroécologiques par les pratiques, le milieu et la végétation

*Les propriétés en gras ont une variance prédictible à plus de 50%, les meilleurs critères prédictifs sont liés au sol (noir), au climat (bleu), aux pratiques agricoles (marron) et à la végétation (vert). Les analyses * ont été réalisées sans critère de la végétation (typologies, présences et abondances d'espèces, indices d'Ellenberg) et l'analyse ** sans critère de la matière organique du sol (matière organique, carbone organique, azote total et C/N). Le sens des corrélations entre critères prédictifs quantitatifs et propriétés est positif (+) ou négatif (-).*

Propriétés agroécologiques	Variances expliquées (%)	Critères prédictifs et sens des corrélations
Rendement 1100°C.j	48,02	Ellenberg N (+), Antsylv (+), Poatriv (+)
Valeur pastorale	**75,75**	Ellenberg EC (+), Ellenberg N (+), Lolpere (+), Fesrubr (-), Triprat (+), Poatriv (+), MgO échangeable (+), Triflav (+)
Protéines (PDIN)	**73,91**	Date d'utilisation (-), Ranacri (+)
Energie (UFL)	**65,82**	Date d'utilisation (-), Ranacri (+), K_2O échangeable (+)
Antioxydants	12,05	Sables grossiers (-), Argile (-), Triprat (+)
Souplesse	**73,02**	Types fonctionnels, pH (-), Fesrubr (+)
Précocité	28,12	CEC (-), Lolpere (+), Types fonctionnels, Types phytosociologiques, Agrcapi (-)
Indice de Shannon	**73,07**	Fesrubr (-), CaO échangeable (+), Ellenberg N (+), Galsaxa (-), pH (+), Types agronomiques, Fesprat (+), Types fonctionnels, Triprat (+), Hollana (+), MgO échangeable (+)
	66,91 *	CaO échangeable (+), pH (+), Evapotranspiration juillet (+), N total (-), Limons grossiers (+), Carbone organique (-), Matière organique (-)
Richesse en oligotrophiles	**70,45**	Ellenberg N (-), Poterec (+), Ellenberg H (-)
	31,14 *	Date d'utilisation (+), C/N (+)
Valeur nectarifère	45,29	Date d'utilisation (+), Triprat (+), Types fonctionnels, Hypradi (+), Sables fins (+), Staoffi (+), Hiepilo (-)
Stock de carbone	**99,08**	Matière organique (+)
	80,96 **	Précipitations février (+), CEC (+), Types phytosociologiques

Afin de pouvoir prédire au mieux toutes les propriétés, mais aussi d'éviter de prédire certaines propriétés par des critères trop proches, j'ai prédit l'indice de Shannon et la richesse en oligotrophiles sans critères de la végétation, et le stock de carbone sans les critères organiques du sol. Il en résulte une bonne prédictibilité de l'indice de Shannon et du stock de carbone, montrant une forte corrélation entre critères de la végétation et ceux du milieu sélectionnés dans un second temps. A l'inverse, la richesse en oligotrophiles perd fortement en précision (40 % de la variance expliquée en moins), montrant un lien faible entre cette propriété, le milieu et les pratiques.

3.3. Corrélations et causalités

Parmi les critères sélectionnés pour la prédiction des propriétés agroécologiques, certains impactent réellement les propriétés alors que d'autres sont simplement corrélés à d'autres critères ayant un impact sur les propriétés.

Afin d'identifier les impacts sur les propriétés agroécologiques, je me suis appuyé sur les effets mis en avant lors de l'étude des corrélations entre critères prédictifs (Chapitre 1 Partie A). En effet, l'étude des corrélations entre critères a permis de mettre en avant de nombreuses corrélations, qui peuvent se résumer en un effet altitude, un effet texture et un effet des pratiques. Afin de compléter cette étude, j'ai observé les indices d'Ellenberg des espèces sélectionnées comme bons prédicteurs.

Antsylv (*Anthriscus sylvestris*), Poatriv (*Poa trivialis*), Lolpere (*Lolium perenne*) indiquent des sols fertiles : leurs indices de fertilité d'Ellenberg sont respectivement de 9, 9, 8. De plus, Lolpere et Poatriv sont de bonnes espèces fourragères (valeur fourragère de 10 et 7) alors que Antsyl a une faible qualité (2). A l'inverse, Fesrubr (*Festuca rubra*) indique des sols pauvres, son indice d'Ellenberg pour la fertilité est de 2, et sa qualité fourragère est elle aussi faible (3). Ranacri (*Ranunculus acris*), Triprat (*Trifolium pratense*), Triflav (*Trisetum flavescens*) et Agrcapi (*Agrostis capillaris*) sont des espèces de fertilité moyenne (indice d'Ellenberg entre 4 et 6) mais sont toutes des espèces appréciant la lumière (indice d'Ellenberg entre 7 et 8). Elles indiquent donc une préférence pour les milieux régulièrement fauchés ou pâturés, elles sont donc des indicatrices de pratiques. Enfin, l'indice d'Ellenberg pour la fertilité a montré une légère corrélation négative avec l'altitude et une corrélation positive avec la fertilisation totale et la densité de pâturage.

Les liens entre propriétés agroécologiques et effets de l'altitude, de la texture et des pratiques sont synthétisés dans le Tableau 16. Ces liens mettent en avant que de nombreux critères, bien qu'ayant un rôle important dans la prédiction des propriétés, sont corrélés aux propriété sans pour autant montrer de liens de causalité.

Les arbres de régression associés à chaque propriété agroécologique sont présentés dans l'Annexe 10. On peut y voir que toutes les variables sélectionnées par les forêts aléatoires ne sont pas présentes dans les arbres de régressions : par exemple la valeur pastorale nécessite 8 critères pour être prédite au mieux, alors que l'arbre de régression n'en compte que 4 : l'indice de fertilité, l'indice d'état calcique, l'abondance de *Festuca rubra* et l'abondance de *Lolium perenne*. Ce résultat s'explique par le fait qu'une forêt aléatoire sélectionne aléatoirement quelques critères parmi ceux proposés, et ne dispose donc pas forcément des meilleurs. Cette

astuce permet d'éviter d'utiliser un unique arbre de régression, parfois trop lié au jeu de données qui a permis de le construire, ne pouvant donc pas être utilisé sur de nouvelles prairies.

Tableau 16 Synthèse des liens entre principaux effets et propriétés agroécologiques

Propriétés agroécologiques	Variances expliquées (%)	Principaux effets impactant les propriétés		
		Altitude	Texture	Pratiques
Rendement	48,02			
Valeur pastorale	**75,75**			
Protéines (PDIN)	**73,91**			
Energie (UFL)	**65,82**			
Antioxydants	12,05			
Souplesse	**73,02**			
Précocité	28,12			
Shannon	**73,07**			
	66,91 *			
Richesse en oligotrophiles	**70,45**			
	31,14 *			
Valeur nectarifère	45,29			
Stock de carbone	**99,08**			
	80,96 **			

4. Conclusion

Dans cette troisième partie, nous avons vu qu'il est possible de prédire les propriétés agroécologiques à l'aide des pratiques, du milieu et de la végétation. Comme pour la prédiction de la végétation, les résultats montrent une faible importance des critères des pratiques agricoles sur la majorité des propriétés, mais un fort pouvoir prédictif des critères liés à la végétation et au sol. Cependant, grâce à l'étude des corrélations entre critères, j'ai pu montrer un fort effet altitude, texture et/ou des pratiques pour chaque propriété, mettant en avant qu'il n'existe pas forcément de lien de causalité entre critères prédictifs et propriétés agroécologiques. Enfin, les arbres de régression peuvent être facilement pris en main, mais la qualité de leur prédiction est inférieure à celle des forêts aléatoires.

Nous avons vu que la végétation joue un rôle important dans la prédiction des propriétés agroécologiques, grâce à des connaissances liées à des espèces précises ou aux associations d'espèces. Dans le chapitre suivant nous nous interrogerons sur l'utilisation des seules typologies prairiales pour prédire diverses propriétés agroécologiques.

CHAPITRE 2
Prédiction des propriétés par les typologies prairiales

Prédire les propriétés prairiales peut s'avérer difficile, car chaque prairie est soumise à des contraintes environnementales et agronomiques uniques. Comme nous l'avons vu précédemment, cette prédiction peut être faite en utilisant des modèles statistiques comme les forêts aléatoires d'arbres de régression. Cependant, pour utiliser ces outils, il est nécessaire de disposer de données précises sur le climat, la composition du sol ou la composition floristique. De plus, nous avons pu voir que les typologies phytosociologiques, agronomiques et fonctionnelles sont souvent utilisées pour parfaire la prédiction des propriétés agroécologiques.

Ces typologies sont construites avec des méthodologies différentes, car elles répondent à des objectifs différents. Les typologies phytosociologiques ont pour but de caractériser les associations végétales et d'évaluer leur état de conservation. Les typologies agronomiques permettent principalement de prédire les rendements et les qualités fourragères mais aussi l'impact des pratiques agricoles sur ces propriétés et la biodiversité. Les classifications fonctionnelles s'intéressent aussi aux rendements et qualités fourragères mais avec une approche basée sur les traits fonctionnels. Enfin, les typologies phytosociologiques sont principalement construites sur la présence des espèces, les typologies agronomiques sur l'abondance des espèces, et les typologies fonctionnelles sur les abondances de quelques espèces clés.

Ces méthodes de construction de typologies n'ont pas été développée pour les mêmes objectifs : la phytosociologie cherche principalement à estimer des propriétés écologiques, alors que les typologies agronomique et fonctionnelle ont pour but premier d'estimer les propriétés agronomiques. Elles diffèrent donc potentiellement dans leurs capacités prédictives des propriétés agroécologiques. Comparer ces typologies aidera à identifier celle(s) permettant la meilleure prédiction possible des propriétés prairiales. S'il n'est pas possible d'identifier une seule typologie polyvalente, il est peut-être possible de les combiner afin d'améliorer leurs pouvoirs prédictifs, ce qui nécessite le développement d'une nouvelle approche des typologies prairiales.

Afin de couvrir la plus grande diversité possible, cette étude a été réalisée sur les 230 prairies précédemment étudiées lors des typologies agronomiques (Bayeur et al., 2013; Collectif, 2006). Pour chacune des prairies, on connait la composition botanique, les pratiques agricoles et le niveau des facteurs environnementaux. J'ai donc pu utiliser ces données pour associer un type phytosociologique, un type agronomique et un type fonctionnel à chaque prairie, ainsi que des propriétés écologiques, agronomiques et environnementales. Enfin, j'ai utilisé les typologies seules et combinées pour prédire chaque propriété, puis j'ai comparé la qualité de leurs prédictions pour isoler les meilleures typologies et les propriétés qui peuvent être correctement prédites.

Une première version de ce chapitre a été publiée dans la revue *Fourrages* (Mesbahi et al., 2019), puis une version complète dans la revue *Ecological Indicators* (Mesbahi et al., 2020). Le texte qui suit est une adaptation en français de ce second article.

1. Introduction

Les prairies permanentes sont associées à de nombreuses propriétés agronomiques et écologiques, mais ces propriétés sont les conséquences d'interactions complexes entre les pratiques agricoles, le milieu et la végétation (Dumont et al., 2018; Michaud et al., 2012b). Les gestionnaires ont besoin de pouvoir estimer les propriétés des prairies, mais ces besoins peuvent être différents : les agriculteurs et agronomes doivent principalement estimer les rendements et la qualité fourragère, les écologues sont intéressés par les propriétés liées à la biodiversité, et les décideurs politiques doivent pouvoir estimer les compromis entre rentabilité économique et protection de l'environnement. Pour aider à la prédiction de ces propriétés, agronomes et écologues ont développé des typologies prairiales, basée sur des méthodes différentes.

Depuis le début du 20ième siècle, les écologues utilisent des typologies phytosociologiques pour classer les communautés et estimer leurs états de conservation (Dengler et al., 2008). Pour créer une classification phytosociologique, il faut connaitre toutes les espèces vasculaires d'une communauté et attribuer à chaque espèce un coefficient d'abondance-dominance (Braun-Blanquet, 1964). Une fois la typologie développée, pour connaitre le type d'une nouvelle prairie il suffit de réaliser un relevé botanique complet, ce qui demande moins d'une heure de travail. Les typologies phytosociologiques peuvent être utilisées pour estimer les propriétés agronomiques grâce aux espèces indicatrices (Petrovic et al., 2013), mais l'utilisation de coefficients d'abondance-dominances assez peu précis, peut biaiser les estimations (Daget and Poissonet, 1971; Pittarello et al., 2018).

Les agronomes développent des typologies agronomiques depuis les années 1950, afin de pouvoir rapidement estimer la production et la qualité fourragère, ainsi que les impacts des pratiques agricoles et du milieu sur le fourrage (Michaud et al., 2013). Pour développer ces typologies, il est souvent nécessaire de connaitre l'abondance précise de chaque espèce vasculaire, afin d'estimer au mieux le bol alimentaire du bétail (Diquélou et al., 2003). Pour replacer une prairie dans une typologie agronomique existante, il est généralement nécessaire de connaitre les pratiques agricoles (fauche ou pâture, fertilisation, …) et le milieu (altitude, humidité, acidité, …), mais les relevés botaniques sont souvent dispensables. Recueillir les pratiques agricoles peut être chronophage, mais permet de créer une discussion entre agriculteurs et conseillers. Enfin, certaines typologies agronomiques peuvent aussi être utilisées pour estimer des propriétés écologiques comme la diversité floristique et la valeur pollinisateurs, et des propriétés environnementales comme la séquestration de carbone (Hulin et al., 2011; Launay et al., 2011).

Plus récemment, dans les années 1990, les écologues se sont intéressés aux traits fonctionnels afin d'expliquer la réponse des communautés prairiales aux pratiques agricoles et au milieu (Lavorel and Garnier, 2002; Mouillot et al., 2013; Violle et al., 2007). Les agronomes se sont ensuite emparés de ces connaissances pour développer des typologies fonctionnelles utiles à la prédiction de la production et de la qualité fourragère, de la précocité de la végétation et de la souplesse d'exploitation. Ainsi, les graminées (Cruz et al., 2019, 2010) et les dicotylédones (Theau et al., 2017) dominantes ont été classées d'après leurs traits fonctionnels, et peuvent être utilisées pour classer les prairies. A l'inverse des précédentes typologies, les typologies fonctionnelles ne sont pas limitées à leur région d'origine, leurs zones de validité sont donc plutôt étendues (Cruz et al., 2010). Enfin, pour utiliser une typologie fonctionnelle il suffit d'identifier les espèces déjà classées, et d'estimer leurs abondances relatives.

Il existe donc différentes méthodes de typologie, répondant à des besoins différents. Carrère et al. (2012) ont combiné ces différentes méthodes afin d'améliorer la compréhension de l'évolution des prairies lors de changements de pratiques agricoles ou de conditions climatiques, mais ils n'ont pas comparé le pouvoir prédictif de cette association au pouvoir prédictif des typologies seules. Macedo et al. (2010) ont comparé trois méthodologies de typologie : l'une utilisation la phytosociologie, la deuxième les stratégies de Grime, et la dernière s'appuyant sur des traits fonctionnels. Cependant, l'étude s'est concentrée sur la végétation dunaire, et est donc éloignée des problématiques des prairies.

Le premier objectif de ce chapitre est de comparer les méthodes de typologie, mais aussi les combinaisons de deux ou trois méthodes, en évaluant leur capacité à prédire des propriétés liées à la diversité, à la production fourragère et l'environnement de ces prairies. Le second objectif est, si possible, d'identifier une méthode ou une combinaison de méthode suffisamment polyvalente pour prédire un vaste panel de propriétés agroécologiques.

Les hypothèses sont que la phytosociologie permet de bien prédire les propriétés écologiques, et les typologies agronomiques permettent de prédire les propriétés agronomiques. La typologie fonctionnelle pourrait être combinée aux approches précédentes afin d'améliorer la prédiction des propriétés prairiales.

2. Matériels et méthodes

Cette étude s'appuie sur les 250 prairies précédemment étudiées: 115 prairies issues de la typologie agronomique des Ballons des Vosges (Collectif, 2006), 121 prairies de la typologie agronomique des Vosges du Nord (Bayeur et al., 2013) et 14 prairies de la typologie nationale (Launay et al., 2011).

2.1. Attribution des types agronomiques, fonctionnels et phytosociologiques

Lors des précédentes études, 25 types agronomiques ont été identifiés, basés sur des relevés botaniques aussi exhaustifs que possible (Bayeur et al., 2013; Collectif, 2006). Les 250 prairies étudiées recouvrent les 25 types agronomiques existants, composés de 4 à 24 prairies (Tableau 17).

Les types fonctionnels ont été développés par Cruz et al. (2010), qui ont attribué un type (A, B, b, C et D) à 38 des graminées (Poaceaes) les plus communes des prairies françaises. Le type de la prairie dépend de l'abondance de chaque type de graminées. J'ai attribué 20 types fonctionnels aux 250 prairies étudiées, composés de 1 à 40 prairies chacun (Tableau 17). La part de graminées dans chaque relevé était de 64.8 ± 13.5% [min-max = 24.0-96.7%].

Enfin, j'ai développé une clé de détermination des types phytosociologiques, afin de permettre une détermination simplifiée *a posteriori* des types décrits par Ferrez et al. (2017). Grâce à cette clé j'ai pu attribuer 17 types phytosociologiques aux 230 prairies de cette étude, chaque type contenant 3 à 61 prairies (Tableau 17).

Tableau 17 Nombre de prairies attribuées à chaque type phytosociologique, agronomique et fonctionnel

Typologie phytosociologique		Typologie agronomique				Typologie fonctionnelle	
Phy_12	61	BV_02	24	VN_09	14	C	41
Phy_05	25	BV_01	17	VN_07	13	A	40
Phy_01	24	BV_10	13	VN_12	11	AC	38
Phy_02	21	BV_06	12	VN_13	11	CA	31
Phy_11	20	BV_07	11	VN_05	9	AB	26
Phy_20	20	BV_08	11	VN_08	9	Ab	15
Phy_07	14	BV_03	10	VN_14	9	B	10
Phy_09	12	BV_04	10	VN_01	8	BA	8
Phy_25	9	BV_09	10	VN_02	8	Cb	8
Phy_04	8	BV_11	6	VN_06	8	CB	6
Phy_06	8	BV_05	5	VN_03	6	CD	6
Phy_08	8			VN_11	6	BC	5
Phy_16	6			VN_10	5	Bb	4
Phy_18	5			VN_04	4	bB	3
Phy_29	3					DC	3
Phy_30	3					bC	2
Phy_31	3					AE	1
						b	1
						bA	1
						E	1

2.2. Calculs des propriétés prairiales

J'ai sélectionné 9 propriétés écologiques afin de pouvoir étudier la diversité taxonomique (richesse spécifique, richesse en familles, indice de Shannon, indice de Simpson), la diversité fonctionnelle (abondance des formes de vie, valeur pollinisateurs, richesse et moyenne pondérée des indices d'Ellenberg pour la profondeurs racinaires) et la fonction patrimoniale (richesse en espèces oligotrophiles, qui peuvent être utilisées pour estimer la valeur écologique des prairies car ce sont des espèces sensibles à l'intensification des pratiques). J'ai sélectionné 3 propriétés agronomiques afin de pouvoir étudier le rendement réel (rendement), le rendement et la qualité fourragère potentielle (valeur pastorale) et la phénologie de la végétation (précocité). Enfin, j'ai sélectionné 4 propriétés environnementales, pour étudier la sensibilité des classifications aux contraintes environnementales et anthropiques (moyenne des indices

d'Ellenberg pour l'humidité et la fertilité, altitude et mode d'utilisation de la prairie). Ces propriétés ont été obtenues lors de la réalisation des typologies agronomiques, par calculs ou par enquêtes auprès des agriculteurs (Bayeur et al., 2013; Collectif, 2006).

2.3. Analyses statistiques

J'ai tout d'abord identifié la typologie, ou la combinaison de typologies, permettant de prédire au mieux chaque propriété. Ensuite, j'ai calculé la qualité des meilleurs modèles, afin de ne garder que les propriétés qui peuvent être correctement estimées par les typologies.

2.3.1. Modélisation de chaque propriété

J'ai réalisé des analyses statistiques nommées « sélection de modèle », afin de calculer la probabilité que chaque classification seule (Phytosociologie (P), Agronomie (A) ou Fonctionnelle (F)), ou combinaison de classifications, permette de créer le meilleur modèle. Pour cela, j'ai modélisé chaque propriété prairiale par un modèle contenant l'effet principal (*main effect*) des trois typologies (A+P+F), puis j'ai créé tous les sous modèles possibles jusqu'au modèle nul (Burnham and Anderson, 2002; Grueber et al., 2011). J'ai ensuite répété cette méthode depuis un modèle contenant toutes les interactions (A×P×F). J'ai ainsi pu créer 12 modèles prédictifs pour chaque propriété (Annexe 9).

Combiner les types agronomiques et phytosociologiques a permis la création de 116 combinaisons (ex : le type agronomique BV_01 avec le type phytosociologique Phy_05 pour une même prairie). Similairement, j'ai observé 136 combinaisons entre types agronomiques et fonctionnels, 93 combinaisons entre types phytosociologiques et fonctionnels, et 202 combinaisons entre les trois typologies. Ces grands nombres de combinaisons montrent que les typologies diffèrent dans leur mode de classifications des prairies.

Toutes les propriétés représentées par des variables continues ont été modélisées grâce à des modèles linéaires généralisés (glm) de familles gamma. J'ai modélisé chacune de ces propriétés par les 12 modèles possibles.

Les abondances de formes de vie et les précocités ont aussi été modélisées par des modèles linéaires généralisés (glm). Cependant, comme j'ai utilisé un seul modèle pour prédire l'ensemble des formes de vie (herbes, légumineuses et diverses) et un seul modèle pour les trois précocités (précoce, moyenne, tardive), ces modèles sont de familles binomiales.

Enfin, le mode d'utilisation des prairies (fauche, pâturage ou mixte) est une variable qualitative, j'ai donc créé un modèle logit multinomial grâce au package mlogit (Croissant, 2015). Ce type de modèle ne prend pas en compte les interactions, j'ai donc uniquement modélisé le mode d'utilisation par 8 modèles : les typologies seules et les effets principaux de toutes les combinaisons possibles.

Tableau 18 Méthodes de détermination des 16 propriétés écologiques, agronomiques et environnementales

Propriétés		Méthode d'obtention
Ecologiques	Richesse spécifique	Nombre d'espèces vasculaires observées sur la prairies
	Richesse en espèces oligotrophiles	Nombre d'espèces vasculaires observées sur la prairies avec un indice d'Ellenberg de 1 à 3
	Richesse en familles	Nombre de familles botaniques observées sur la prairies
	Indice de Shannon	$-\Sigma(Yk \times \log_2 Yk)$, où Yk est l'abondance relative de l'espèce k ($0<Yk\leq1$)
	Indice de Simpson	$1 - (\Sigma\ Yk^2)$, où Yk est l'abondance relative de l'espèce k ($0<Yk\leq1$)
	Valeur pollinisateurs	Abondance relative (%) des espèces botaniques entomophiles observes dans la prairies
	Richesse des indices de profondeur racinaires	Nombre d'indices d'Ellenberg pour le système racinaire observés dans la prairie
	Moyenne pondérée des indices de profondeur racinaires	Σ(Yk × indice d'Ellenberg pour le système racinaire), où Yk est l'abondance relative de l'espèce k ($0<Yk\leq1$)
	Abondance des formes de vie	Abondance relative (%) de chaque forme de vie : herbes (Cyperaceae, Juncaceae, Liliaceae , Poaceae), légumineuses (Fabaceae) et les diverses
Agronomiques	Rendement	Estimé par le nombre de balles de foin, le chargement des pâturages, ou directement mesuré dans la prairie
	Valeur pastorale	Σ(Yk × valeur fourragère de l'espèce), où Yk est l'abondance relative de l'espèce k ($0<Yk\leq100$). Pour chaque espèce, la valeur fourragère a été estimée à dire d'expert depuis leur potentiel de rendement, valeur nutritive, appétence et digestibilité (Daget and Poissonet, 1971)
	Précocité	Abondance relative (%) des espèces précoces, moyennes et tardives selon Cruz et al. (2010) et Theau et al. (2017)
Environnementales	Humidité	Σ(Yk × indice d'Ellenberg pour l'humidité), où Yk est l'abondance relative de l'espèce k ($0<Yk\leq1$)
	Fertilité	Σ(Yk × indice d'Ellenberg pour la fertilité), où Yk est l'abondance relative de l'espèce k ($0<Yk\leq1$)
	Altitude	Altitude moyenne de la prairie
	Mode d'utilisation	"Fauche", "Pâturage", ou "Mixte" des deux, obtenu par enquête auprès des agriculteurs

2.3.2. Sélection des meilleurs modèles

Après avoir créé tous les modèles, j'ai pu sélectionner le meilleur modèle pour chaque propriété.

Les modèles ont été sélectionnés selon les critères d'information d'Akaike de second ordre (AICc) calculés grâce au package MuMIn (Barton, 2018), à l'exception du mode d'utilisation des prairies dont le meilleur modèle a été sélectionné par le critère d'information d'Akaike (AIC), calculé par le package qpcR (Spiess, 2014). Ce critère attribue une note à chaque modèle de chaque propriété, et plus cette note est faible, meilleur est le modèle.

Basé sur ces critères, le poids d'Akaike (appelé « poids » dans le reste de l'étude) est calculé pour chaque modèle. Il s'agit de la probabilité que le modèle soit le meilleur, la somme des poids est donc de 1 entre les modèles d'une même propriété (Symonds and Moussalli, 2011). Plus le poids d'un modèle est proche de 1, meilleur est ce modèle. Si un modèle à un poids > 0,8, alors il est possible d'admettre immédiatement que ce modèle est le meilleur, mais si plusieurs modèles ont des poids similaires il est nécessaire de comparer les modèles à la main pour peut-être identifier un modèle meilleur que les autres. Il est aussi important de vérifier que le modèle nul à un poids proche de 0.

2.3.3. Identification des modèles de bonnes qualités

« Meilleur » ne signifie pas forcément « bon », mais parfois le « moins mauvais » modèle : le meilleur modèle parmi un lot de mauvais reste un mauvais modèle. De plus, un modèle peut être bon pour certaines propriétés mais pas pour d'autres. Il est donc important d'évaluer la qualité des modèles précédemment sélectionnés.

Les critères AIC et AICc permettent de comparer des modèles construits pour une même propriété (Burnham and Anderson, 2002). Il faut donc calculer une nouvelle valeur pour estimer la qualité des modèles et pouvoir comparer ces qualités entre propriétés : le pseudo-R^2 (Tjur, 2009).

Pour les modèles linéaires généralisés de famille gamma, j'ai calculé le pseudo-R^2 de Cox et Snell (Cox and Snell, 1989). Cependant ce calcul n'est pas optimal pour les modèles linéaires généralisés de famille binomial ni pour les modèles logit, pour lesquels j'ai calculé des pseudo-R^2 de McFadden. Ces deux approches sont basées sur des méthodologies similaires de vraisemblance (*likelihood*) (Hoetker, 2007). Enfin, j'ai calculé le factor de variance-inflation pour vérifier les colinéarités entre modèles de chaque propriété.

Les modèles ayant un pseudo-R^2 > 0,5 peuvent être déclarés comme suffisamment fiables.

3. Résultats

3.1. Sélection des meilleurs modèles

Pour 15 des 16 propriétés étudiées, les modèles ayant les poids les plus élevés sont basés sur des typologies. Seule la prédiction de la richesse des systèmes racinaires est mieux prédite par le modèle nul (Figure 19). Parmi ces 15 modèles, 4 ont un faible poids et nécessitent donc une analyse plus détaillée pour essayer d'identifier un meilleur modèle : l'indice de Shannon (0,66), la valeur pollinisateur (0,52), la moyenne pondérée des indices de profondeurs racinaires (0,73) et la fertilité (0,59).

	A	P	F	A+P	A+F	P+F	A+P+F	A*P	A*F	P*F	A*P*F	Nul	Qualité
Richesse spécifique	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19
Indice de Shannon	0.00	0.66	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38
Indice de Simpson	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46
Richesse en espèces oligotrophiles	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.83
Richesse en familles	0.05	0.00	0.00	0.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.54
Abondance des formes de vie	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	n.c.	0.00	0.87
Valeur pollinisateurs	0.52	0.10	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	0.20
Richesse des indices de profondeur racinaire	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
Moyenne pondérée des indices de profondeur racinaire	0.00	0.11	0.01	0.00	0.16	0.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36
Rendement	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.51
Valeur pastorale	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60
Précocité	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	n.c.	0.00	0.67
Mode d'utilisation	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	0.00	0.72
Humidité	0.00	0.00	0.00	0.09	0.89	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70
Fertilité	0.00	0.00	0.00	0.41	0.00	0.00	0.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80
Altitude	0.99	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.88

Figure 19 Poids d'Akaike et qualité (pseudo-R^2) des 16 modèles basés uniquement sur les typologies agronomique (A), phytosociologique (P) et fonctionnelle (F), leur combinaisons et les modèles nuls.

Les typologies ont été combinées par les effets principaux (A+P, A+F, P+F et A+P+F) et par les interactions (A×P, A×F, P×F et A×P×F). Le terme « n.c » (non considéré) indique les modèles qui n'ont pas pu être réalisés. Seule la qualité du modèle ayant le poids d'Akaike le plus élevé est indiquée ici.

Quatre propriétés sont modélisées au mieux par une seule classification. Trois propriétés sont mieux modélisées par la typologie agronomique (A) : le rendement, le mode d'utilisation et l'altitude. La richesse spécifique est mieux modélisée par la phytosociologie (P).

Pour deux propriétés, le modèle avec le poids le plus élevé est basé sur une seule classification mais n'est pas assez élevé pour affirmer que le modèle est meilleur. L'indice de Shannon est modélisé par la classification phytosociologique, mais son poids (0,66) ne diffère pas assez du second modèle avec un poids de 0,25). De même, pour la valeur pollinisateur la typologie agronomique permet de produire le modèle avec le poids le plus élevé (0,52) mais le poids du modèle nul est trop similaire (0,35) pour identifier un meilleur modèle.

Six propriétés sont modélisées au mieux par les effets principaux de deux ou trois typologies : l'agronomie et la phytosociologie (A+P) pour la richesse en famille, les typologies agronomiques et fonctionnelles (A+F) pour l'humidité, les typologies phytosociologique et fonctionnelle (P+F) pour l'indice de Simpson et la valeur pastorale, et enfin les trois typologies (A+P+F) pour la précocité. Le modèle associé à la moyenne des indices de profondeur racinaire est basé sur les typologies phytosociologique et fonctionnelles (P+F), mais son poids est inférieur à 0,8. Cependant, le modèle avec le deuxième poids est suffisamment différent pour affirmer que le modèle P+F est le meilleur. Il n'est pas possible d'identifier un meilleur modèle pour la fertilité, car les modèles A+P+F et A+P ont des poids très similaires (respectivement 0,59 et 0,41).

Enfin, deux propriétés sont modélisées au mieux par des modèles contenant des interactions : les abondances de formes de vie par les typologies agronomiques et phytosociologiques (A×P) et la richesse en espèces oligotrophiles par les typologies phytosociologiques et fonctionnelles (P×F).

De manière générale, les poids les plus élevés étaient égaux à 1 pour 7 propriétés, entre 0,7 et 1 pour six propriétés, et inférieurs à 0,7 pour l'indice de Shannon, la valeur pollinisateur et l'indice de fertilité. Les modèles nuls ont des poids de 0, à l'exception de ceux de la valeur polinisateur (0,35) et de la richesse des indices de profondeurs racinaires (1).

3.2. Identification des modèles fiables

La qualité des modèles ayant les poids les plus élevés (pseudo-R^2) varie fortement entre les propriétés de (0,20 à 0,88) (Figure 19). Par ailleurs, la qualité de la modélisation de la richesse des indices de profondeur racinaire est de 0, car le meilleur modèle est le modèle nul. Les modèles sélectionnés pour les propriétés agronomiques et environnementales ont des poids et/ou des qualités élevées. A l'inverse, la plupart des modèles sélectionnés pour les propriétés écologiques sont de faible qualité, à l'exception de l'abondance des formes de vie, de la richesse en espèces oligotrophiles, et dans une moindre mesure de la richesse en familles (pseudo-R^2 = 0,87, 0,83 et 0,54 respectivement).

J'ai pu identifier 10 propriétés prairiales dont la qualité de la modélisation est supérieure à 0,5 (Figure 20) : la richesse en espèces oligotrophiles, la richesse en famille et l'abondances des formes de vie (propriétés écologiques), le rendement, la valeur pastorale et la précocité (propriétés agronomiques), la fertilité, l'humidité, l'altitude et le mode d'utilisation (propriétés environnementales).

Je n'ai pas pu identifier une typologie ou combinaison de typologies suffisamment polyvalente et fiable pour prédire à la fois les propriétés écologiques, agronomiques et environnementales. Seule la classification agronomique permet de modéliser correctement des propriétés sans être combinée à d'autres typologies, et la majorité des modèles permettant de prédire correctement les propriétés sont basé au moins en parti sur la typologie agronomique. Enfin, la combinaison de typologies phytosociologique et fonctionnelle permet de modéliser correctement la richesse en espèces oligotrophiles et la valeur pastorale. Ces résultats sont cohérents avec les résultats du Chapitre 1 Partie B, dans la mesure où ces derniers montraient un rôle important des typologies pour la prédiction de certaines propriétés (souplesse d'exploitation, précocité de la végétation, indice de Shannon, valeur nectarifère), mais que ces typologies doivent systématiquement être associée à d'autre critères pour permettre une prédiction maximale.

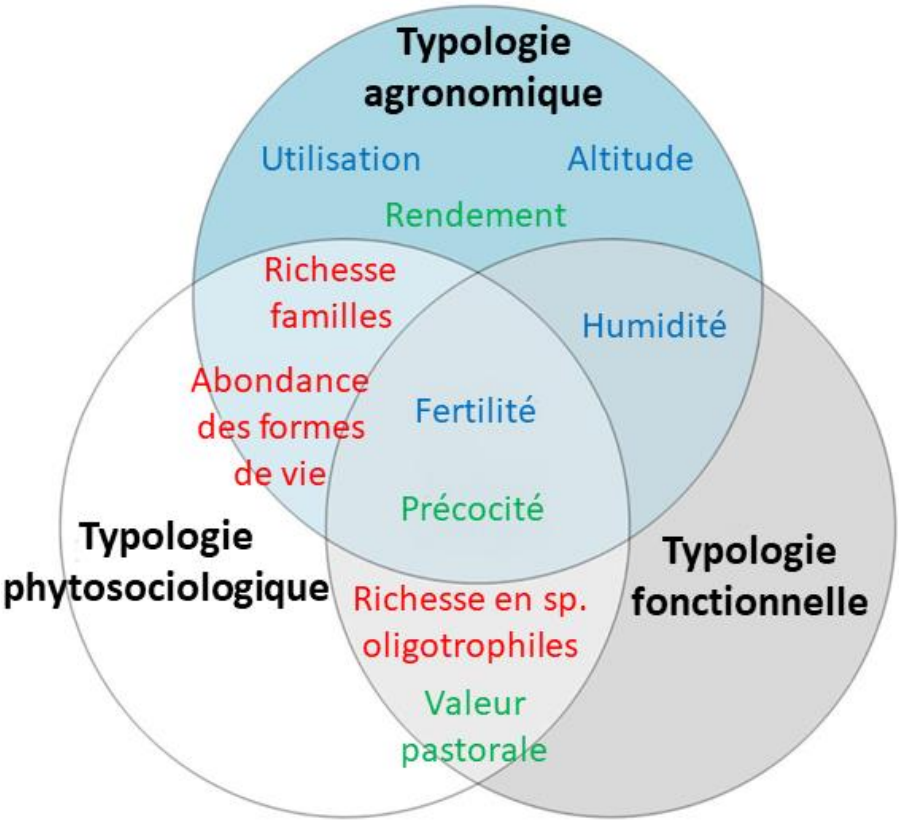


Figure 20 Sélection des meilleurs modèles de bonnes qualités

4. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était d'étudier les capacités prédictives de typologies prairiales pour 16 propriétés écologiques, agronomiques et environnementales. Nous avons vu que les typologies peuvent être combinées pour améliorer leurs pouvoirs prédictifs, mais que certaines propriétés restent difficiles à prédire. En particulier, seules trois propriétés écologiques sur les neuf étudiées ont pu être correctement modélisées.

Nous avons donc vu que les propriétés prairiales peuvent être prédites par des critères environnementaux, les pratiques agricoles et la végétation (Chapitre 1 Partie B) et par les typologies seules (Chapitre 2). Les résultats du chapitre 1 montrent que les typologies peuvent

être utilisées comme critères prédictifs, mais elles sont toujours utilisées avec d'autres critères du milieu, des pratiques et/ou de la végétation pour maximiser la qualité des prédictions. Ici, mes résultats montrent qu'utiliser uniquement des typologies permet de prédire efficacement certaines propriétés, mais cette prédiction est de qualité inférieure.

Cependant, il est généralement établi qu'il n'est pas possible d'avoir des prairies à la fois à fortes propriétés écologiques et agronomiques. Le prochain chapitre est donc dédié à l'étude des synergies et antagonismes entre propriétés agronomiques et écologiques.

CHAPITRE 3
Synergies et antagonismes entre propriétés agroécologiques

1. Introduction

Dans les chapitres précédents, j'ai prédit les propriétés agroécologiques des prairies grâce à des critères du milieu, des pratiques agricoles et/ou de la végétation. Il est en effet important de connaitre les propriétés agroécologiques des prairies, afin de pouvoir répondre aux attentes des différents acteurs, agronomes et écologues. En particulier, identifier un type prairial permettant une production importante de fourrage de bonne qualité, tout en maintenant une riche biodiversité pourrait faire converger un grand nombre d'acteurs. L'observation des liens entre propriétés agroécologiques sur une même parcelle permet de mieux comprendre les synergies et antagonismes entre propriétés.

Aujourd'hui, la conservation de la biodiversité est souvent vue comme un frein à l'expression des propriétés agronomiques, principalement vis-à-vis du rendement. Je fais ici l'hypothèse que prendre en compte de nouvelles propriétés de la valeur fourragère, telles que la souplesse d'exploitation, la teneur en antioxydants et les teneurs en différents oligoéléments, permettra de nuancer l'antagonisme entre propriétés agronomiques et écologiques. J'ai aussi pris en compte de nouvelles propriétés écologiques encore peu étudiées, telles que la valeur nectarifère et le stock de carbone, afin de connaitre leurs liens avec les autres propriétés écologiques. Enfin, j'ai utilisé des critères du milieu, des pratiques et de la végétation pour identifier de potentiels critères prédictifs des synergies et antagonismes.

Pour étudier ces synergies et antagonismes, je me suis appuyé sur les 58 prairies étudiées pendant cette thèse, car j'ai pu y mesurer et calculer un grand nombre de propriétés dont certaines indisponibles sur de plus grand jeux de données telles que la valeur antioxydante, la qualité fourragère et les connaissances du sol. Les compositions botaniques, rendements et qualités fourragères ont été mesurés sur ces prairies et permettent de calculer les propriétés agronomiques et écologiques. Enfin, des analyses de sol, des enquêtes et des modèles climatiques permettent de connaitre les critères du milieu et des pratiques liés à ces prairies.

2. Matériels et méthodes

L'étude se concentre sur les 58 prairies étudiées pendant cette thèse, où j'ai pu collecter à la fois des informations sur la composition botanique, le milieu, les pratiques agricoles, les rendements et les qualités fourragères. 24 propriétés agronomiques et 6 propriétés écologiques ont été étudiées (Tableau 19). Les valeurs antioxydantes n'étant disponibles que pour 20 prairies (sur les 58), j'ai imputé les teneurs des prairies manquantes de façon à ne pas déséquilibrer ni influencer le jeu de données (Husson and Josse, 2020).

Dans un premier temps, j'ai étudié les corrélations entre propriétés, pour voir si de grands ensembles se créent. Pour cela j'ai créé une matrice des corrélations où les variables sont automatiquement ordonnées selon leurs corrélations, grâce au logiciel R et au package corrplot (R Core Team, 2019; Wei et al., 2017).

Ensuite, j'ai réalisé une Classification Hiérarchique sur Composantes Principales (HCPC), analyse qui se réalise en deux temps. Tout d'abord j'ai réalisé une Analyse en Composantes Principales (ACP) en utilisant les 58 prairies, décrites par les 30 propriétés agroécologiques, puis j'ai classé les prairies d'après les résultats de l'ACP. Le nombre de classes a été sélectionné automatiquement selon les pertes d'inerties (Husson et al., 2020).

Tableau 19 Méthodes de mesures et calculs des propriétés agroécologiques

Propriétés		Méthode d'obtention
Ecologiques	Richesse spécifique	Nombre d'espèces vasculaires observées sur la prairies
	Richesse en espèces oligotrophiles	Nombre d'espèces vasculaires observées sur la prairies avec un indice d'Ellenberg de 1 à 3
	Abondance des espèces oligotrophiles	Abondance (%) des espèces vasculaires observées sur la prairies avec un indice d'Ellenberg de 1 à 3
	Richesse en familles	Nombre de familles botaniques observées sur la prairie
	Indice de Shannon	$-\Sigma(Yk \times \log_2 Yk)$, où Yk est l'abondance relative de l'espèce k ($0<Yk\leq1$)
	Indice de Simpson	$1 - (\Sigma\ Yk^2)$, où Yk est l'abondance relative de l'espèce k ($0<Yk\leq1$)
	Indice d'équitabilité	Indice de Shannon / log2(Richesse spécifique)
	Valeur nectarifère	Σ(Yk × valeur nectarifère individuel), où Yk est l'abondance relative de l'espèce k ($0<Yk\leq100$). La valeur nectarifère individuelle (de 0 à 4) est donnée par eFLORAsys (Plantureux and Amiaud, 2009)
	Stock de carbone	$Stock = BD \times \%C \times Profondeur$ où $BD = \frac{100}{\frac{\%MO}{0.244}+\frac{100-\%MO}{1.64}}$ d'après Post and Kwon (2000)
Agronomiques	Teneur en matière sèche	Taux de matière sèche dans le fourrage, après 3 jours de séchage à 75°C
	Rendement	Mesuré lors de la première utilisation, d'après le % de matière sèche
	Rendement (1100)	Rendement mesuré lors de la première utilisation, projeté de façon linéaire à 1100°C.jours cumulés depuis le 1er février
	Valeur pastorale	Σ(Yk × valeur fourragère de l'espèce), où Yk est l'abondance relative de l'espèce k ($0<Yk\leq100$). Pour chaque espèce, la valeur fourragère a été estimée à dire d'expert depuis leur potentiel de rendement, valeur nutritive, appétence et digestibilité (Daget and Poissonet, 1971)
	Digestibilité	Mesurée sur le fourrage selon la méthode proche infrarouge
	PDIN et PDIE	Calculées d'après les analyses fourragères, selon les formules de INRA (2010)
	UFL, UFV	Calculées d'après les analyses fourragères, selon les formules de INRA (2010)
	Production permise	Production de lait quotidienne permise par les PDIE, PDIN et UFL
	UEL, UEB et UEM	Calculées d'après les analyses fourragères, selon les formules de INRA (2010)
	Ca, P, Na, Mg et K	Teneur en minéraux, mesuré sur le fourrage selon la méthode Minerol 15
	Souplesse	Calculée d'après les types fonctionnels de graminées et dicotylédones selon Theau et al. (2017) : %Gramb + %GramC + %Leg + %DivM2 + %DivM3
	Précocité	Calculée d'après les types fonctionnels de graminées et dicotylédones selon Theau et al. (2017) : %GramA + %GramB + %GramC + %GramE + %Div1
	Refus	Calculée d'après les types fonctionnels de graminées et dicotylédones selon Theau et al. (2017) : %GramD+%DivH
	Antioxydants	Mesurés par la méthode DPPH (Zou et al., 2011)

Enfin, j'ai identifié les meilleurs prédicteurs des classes de propriétés grâce à un ensemble de forêts aléatoires d'arbres de décision (*Random Forest*), avec le logiciel R et le package VSURF (Genuer et al., 2015; R Core Team, 2019). L'analyse a pour objectif de prédire les classes de propriétés créées par la HCPC, grâce aux critères du milieu (sol, climat, paysage), aux pratiques agricoles et à la végétation (présences et abondances des espèces, associations, indices d'Ellenberg), soit 605 critères. Pour cela, j'ai créé 50 forêts aléatoires composées de 2000 arbres basés sur 202 critères du milieu, des pratiques et de la végétation, sélectionnés aléatoirement. Les meilleurs critères prédictifs sont sélectionnés selon leur importance pour la prédiction de la

propriété (*preliminary step*), selon leur capacité à produire des forêts aléatoires de bonnes qualités (*selection step for interpretation*), puis afin d'éviter les critères corrélés entre eux (*selection step for prediction*).

Afin d'estimer la fiabilité des critères sélectionnés, j'ai créé une nouvelle forêt aléatoire uniquement composée des critères sélectionnés, et j'ai calculé la part moyenne de prairies mal classées, exprimée en pourcentage (valeur appelée « OOB estimate error rate »). Enfin, pour chaque critère prédictif j'ai calculé la perte moyenne en précision du modèle lorsque le critère n'est pas pris en compte (MeanDecreaseAccuracy). Pour cela, j'ai utilisé le package RandomForest du logiciel R (Breiman et al., 2018; R Core Team, 2019).

Afin de permettre une prédiction simple des compromis, j'ai créé un unique arbre de décision. Cet arbre permet de prédire les classes de propriétés grâce aux critères précédemment sélectionnés. Il a généralement un pouvoir prédictif inférieur à celui de toute la forêt d'arbres de décision, mais a l'avantage d'être facilement utilisable même sans connaissances statistiques.

3. Résultats

3.1. Corrélations positives et négatives entre propriétés

Il existe de nombreuses corrélations, positives et négatives, entre propriétés agroécologiques (Figure 21). Plusieurs groupes sont mis en avant.

Un premier groupe rassemble des variables liées à la qualité fourragère : énergie (UFL et UFV), protéines (PDIE et PDIN), digestibilité, certains minéraux (P, K, Mg). La précocité de la végétation y est aussi positivement corrélée, mais faiblement. Ce groupe est négativement corrélé à l'encombrement du fourrage (UEL, UEB et UEM).

Un second groupe rassemble des propriétés liées à la production fourragère (rendement réel, rendement 1100 °C.j et valeur pastorale), à la diversité (richesse spécifique et en familles, indices de Shannon, Simpson et d'équitabilité), ainsi que quelques minéraux du fourrage (Ca et Mg). Ce groupe est négativement corrélé à la souplesse d'exploitation et à la richesse en espèces oligotrophiles.

Enfin, un dernier groupe lie des propriétés agronomiques (souplesse d'exploitation et teneur en matière sèche) et des propriétés écologiques (richesse et abondance en oligotrophiles, et valeur nectarifère dans une moindre mesure).

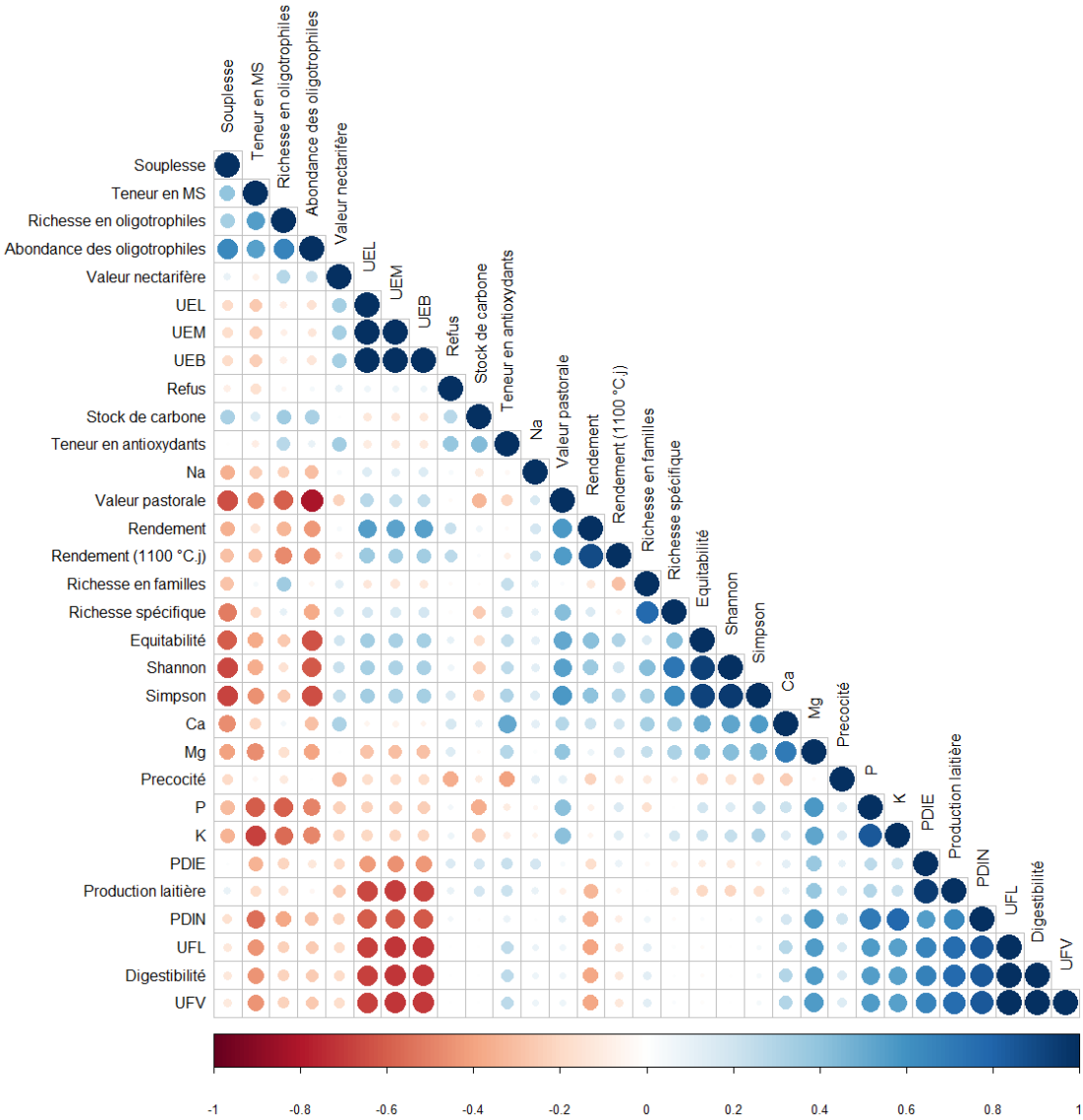


Figure 21 Matrice des corrélations entre propriétés agroécologiques

La taille du disque est proportionnelle à la valeur absolue de la corrélation, corrélation qui peut être négative (bleue) ou positive (rouge)

3.2. Classification et description des classes de propriétés

J'ai réalisé l'ACP sur les 5 premières dimensions, qui expliquent 76% de la variance.

La classification HPCP a identifiée trois classes de prairies, basées sur les propriétés agroécologiques (Figure 22). La première classe (vert) rassemble 10 prairies, la seconde classe (violet) rassemble 13 prairies, et enfin la troisième et dernière classe (orange) rassemble 35 prairies.

La première classe regroupe des prairies à forte qualité fourragère, mais faible valeur patrimoniale (Tableau 20). Elle est significativement liée à de fortes valeurs d'énergie (UFL et UFV), de protéine (PDIE et PDIN) et de digestibilité, ce qui lui permet d'avoir un haut potentiel de production laitière. De plus, cette classe est liée à de fortes teneurs en minéraux (P, K, Mg et Ca), mais de faibles valeurs d'encombrement (UEL, UEB et UEM) et de teneurs en matière

sèche. Par contre, cette classe est significativement décrite par une faible valeur patrimoniale, démontrée par de faibles richesses et abondances en oligotrophiles.

La deuxième classe rassemble des prairies à faible intérêt agronomique, mais forte valeur patrimoniale. Elles sont significativement associées à de faibles productivités (rendements, valeurs pastorales), de faibles teneur en minéraux (P, K, Mg, Ca) et un faible encombrement (UEL, UEB et UEM). Cependant, ce sont des prairies à forte souplesse d'exploitation, ce qui peut compenser la faible qualité du fourrage. La diversité y est faible, mais à l'inverse ce sont des prairies à forte valeur patrimoniale (richesses et abondance en oligotrophiles élevées).

Enfin, la troisième classe est constituée de prairie à faible valeur fourragère mais forte diversité. Elle rassemble des prairies de faible qualité fourragère, autant sur le plan de l'énergie (UFL et UFV), que des protéines (PDIE et PDIN), ou de certains minéraux (P et K), ce qui induit une faible production laitière potentielle. De plus, ces prairies sont associées à une faible souplesse d'exploitation et précocité. Cependant, ce sont des prairies à fortes valeurs écologiques puisqu'elles hébergent une importante diversité spécifique sans forte dominance de quelques espèces (indices de Shannon, de Simpson et d'équitabilité), mais elles sont aussi d'importantes productrices de nectar.

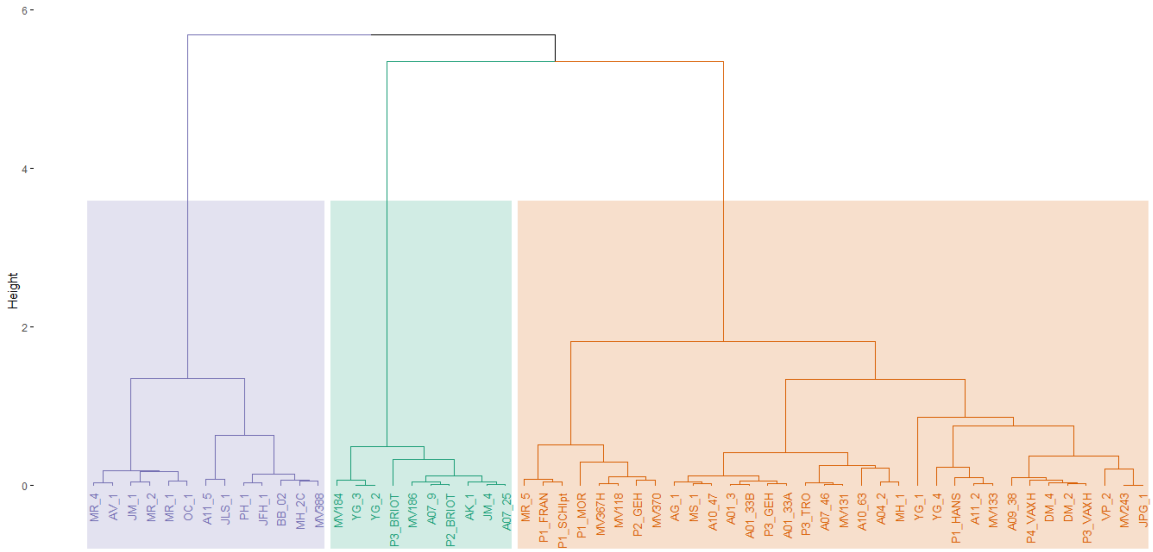


Figure 22 Classification des prairies selon leurs propriétés agroécologiques

L'observation de la matrice de corrélation et de la classification hiérarchique sur composantes principales (HPCP) apporte des résultats similaires. On peut identifier dans les deux cas des corrélations positives entre propriétés nutritives (énergie, protéines, digestibilité et minéraux), et des corrélations positives entre rendement et biodiversité générale (richesse spécifique et indices de Shannon, de Simpson et d'Equité). Cependant, la matrice des corrélations laisse voir des corrélations positives entre espèces oligotrophiles et stock de carbone qui n'apparaissent pas dans la HCPC.

L'utilisation de la matrice de corrélation permet de voir toutes les propriétés étudiées, alors que la HCPC se limite aux propriétés significativement corrélées à au moins une classe. Par exemple, l'indice de refus, la teneur en antioxydants et le stock de carbone n'apparaissent pas dans les résultats de la HPCP : d'après la matrice de corrélation, ils sont positivement corrélés.

Tableau 20 Liens entre propriétés écologiques et classes de prairies

Les cases rouges indiquent des valeurs moyennes de propriétés significativement (p < 0,05) inférieures à la moyenne, les cases vertes des valeurs moyennes de propriétés significativement supérieures à la moyenne, et les cases blanches ne sont pas significativement différentes de la moyenne.

		Classe 1	Classe 2	Classe 3	Moyenne
Rendement	Rendement (t/ha)	1,95	0,99	3,43	2,73
	Rendement à 1100 °C.j (t/ha)	1,62	1,35	3,20	2,80
	Valeur pastorale	47,85	24,61	49,55	44,21
Qualité	Energie (UFV)	0,91	0,74	0,72	0,77
	Energie (UFL)	0,96	0,81	0,80	0,84
	Protéines (PDIE)	61,70	55,08	54,18	56,42
	Protéines (PDIN)	104,04	66,23	64,67	74,96
	Encombrement (UEM)	1,00	0,99	1,15	1,09
	Encombrement (UEB)	1,00	0,99	1,11	1,07
	Encombrement (UEL)	0,98	0,97	1,04	1,02
	Digestibilité (%)	72,50	64,03	63,12	65,71
	Teneur en MS (%)	20,83	38,64	26,75	27,92
	P (g/100g MS)	0,32	0,16	0,20	0,22
	K (g/100g MS)	2,50	1,12	1,58	1,74
	Mg (g/100g MS)	0,27	0,15	0,21	0,20
	Ca (g/100g MS)	0,68	0,29	0,60	0,55
	Souplesse	49,6	91,8	48,9	56,4
	Précocité	65,1	63,54	58,5	61,6
Production	Production laitière permise	13,99	11,42	10,20	11,46
Diversité	Richesse spécifique	33,2	19,63	31,4	29,7
	Indice de Shannon	2,37	1,53	2,40	2,26
	Indice de Simpson	0,87	0,69	0,87	0,84
	Indice d'équitabilité	0,47	0,36	0,48	0,46
	Richesse en familles	15,7	12,0	14,4	14,2
Patrimonialité	Richesse en oligotrophiles	5,1	9,0	6,57	7,0
	Abondance en oligotrophiles	19,4	62,1	26,27	32,7
Pollinisation	Valeur nectarifère	0,48	0,46	0,58	0,49

3.3. Prédiction des synergies et compromis

Afin de prédire ces classes de synergies et compromis, j'ai tout d'abord sélectionné les meilleurs critères prédictifs grâce à un ensemble de forêts aléatoires d'arbres de classifications en utilisant le milieu, les pratiques et la végétation.

Seuls 4 critères sont nécessaires à la meilleure prédiction des classes de propriétés (Figure 23). Les meilleurs critères prédictifs sont la date de première utilisation (en nombre de jours), la teneur en CaO dans l'horizon superficiel (0-10 cm), cette même teneur dans l'horizon profond (10-30 cm), et l'indice d'Ellenberg pour la fertilité. L'erreur estimée « OOB » de la forêt aléatoire basée sur ces critères est de 8,62 %.

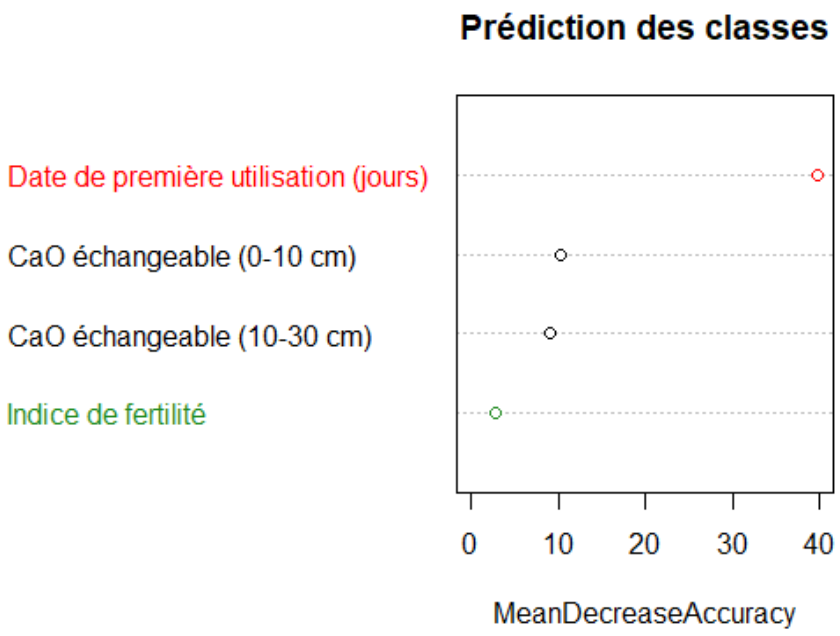


Figure 23 Résultat de la forêt aléatoire permettant la prédiction des classes de propriétés grâce aux critères sélectionnés

Les critères sont liés aux pratiques agricoles (rouge), au sol (noir) ou à la végétation (vert). MeanDecreaseAccuracy exprime la perte moyenne en qualité lorsque le critère n'est pas pris en compte.

L'étude des corrélations entre critères (Annexe 6) a montré un lien entre la date d'utilisation et le mode d'utilisation : les utilisations précoces sont liées à la présence de pâturage et une fertilisation plus élevée. La teneur en CaO échangeable est liée aux textures fines (argileuses et/ou limoneuses) ayant de fortes CEC. Enfin, l'indice de fertilité est légèrement négativement corrélé à l'altitude et positivement corrélé au chargement des pâturages. Les classes de compromis sont donc influencées par les pratiques agricoles (date et mode d'utilisation), la texture des sols et dans une moindre mesure par l'altitude.

Afin de pouvoir réaliser une prédiction simplifiée des synergies et compromis, mais aussi de mieux comprendre le rôle des différents critères sur la détermination des classes de propriétés, j'ai représenté un arbre de décision basé sur les critères sélectionnés (Figure 24).

Cet arbre permet de classer correctement 54 prairies sur les 58 étudiées, soit 92,6 % de prairies bien classées et un taux d'erreur de 7,4 %. La classe 2, liée à des prairies de faibles valeurs fourragères et faible diversité générale se distingue par des sols acides, ayant moins de 0,6 g de CaO échangeable par kg de terre. La classe 1, caractérisée par les prairies à forte valeur nutritive, peut être prédite par un sol peu acide (plus de 0,6 g/kg de CaO échangeable) et une utilisation précoce, avant 139 jours (soit avant le 19 mai). Enfin, la classe 3 caractérisée par des prairies à forte diversité générale peut être prédite par des sols peu acides et une utilisation tardive, après le 19 mai.

Cet arbre de décision a une qualité supérieure à la moyenne de la forêt aléatoire, on peut donc affirmer que teneur en CaO et date d'utilisation sont de bons prédicteurs des classes de synergies et compromis.

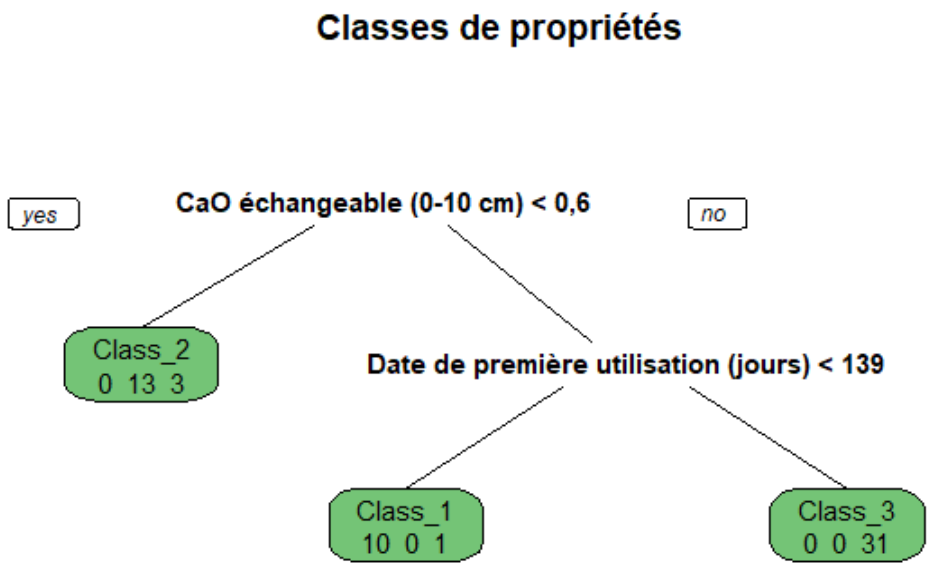


Figure 24 Arbre de décision pour la prédiction des classes de synergies et compromis

Chaque « feuille » de l'arbre de décision comporte trois chiffres : la somme de ces chiffres est le nombre de prairies menées à cette feuille grâce à l'arbre de décision ; le premier chiffre est le nombre de prairie de la feuille appartenant à la classe 1, le deuxième chiffre le nombre de prairie appartenant à la classe 2, et le troisième le nombre de prairies appartenant à la classe 3. Ainsi, la première feuille « Class_2 » rassemble 0+13+3=16 prairies, dont 0 appartiennent à la classe 1, 13 à la classe 2 et 3 à la classe 3 : 13 prairies sont donc correctement classées, et 3 prairies ont été classées ici par l'arbre mais appartiennent à une autre classe.

4. Conclusion

Il n'existe pas de prairies cumulant à la fois de bons rendements, une bonne qualité fourragère et un fort intérêt pour la biodiversité. Cependant, j'ai pu identifier une classe de prairies à très fortes valeurs fourragères, une classe de prairies à forts enjeux écologiques car hébergeant de nombreuses espèces oligotrophiles en forte abondance, et une dernière classe répondant à des enjeux de biodiversité et de pollinisation.

L'hypothèse que les antagonismes entre production et diversité pouvaient être diminués avec la prise en compte de nouvelles propriétés a été partiellement vérifiée : la souplesse d'exploitation entre en synergie avec la patrimonialité, mais la teneur en antioxydants n'est liée à aucune des classes.

Enfin, les classes de synergies et antagonismes peuvent être prédites simplement, grâce à des connaissances sur la date de première utilisation des prairies, la teneur en calcium du sol et l'indice d'Ellenberg pour la fertilité. Cependant, ces critères mettent en avant de nombreux autres effet sur les compromis, qui sont principalement des effets des pratiques, de la texture et dans une moindre mesure de l'altitude.

CHAPITRE 4
Transmission des savoirs scientifiques aux acteurs de terrain

Cette thèse a une vocation scientifique, puisqu'elle cherche à mieux comprendre les déterminants des propriétés agroécologiques, en particulier de propriétés encore méconnues. Elle a cependant aussi une finalité sociotechnique, puisque les résultats de cette thèse et des travaux annexes seront utilisés pour conseiller les agriculteurs, plus particulièrement pour démontrer l'intérêt des prairies diversifiées et de la diversité des prairies.

Afin de transmettre les connaissances scientifiques aux acteurs du terrain, un/des outils sont développés en parallèle de cette thèse grâce à une collaboration entre parcs naturels régionaux, communautés de communes, chambres d'agricultures régionale et départementales, conservatoires botaniques, université de Lorraine et Inrae. Cependant, les outils peuvent prendre de multiples formes et doivent répondre aux attentes de tous leurs potentiels utilisateurs. Ce défi est particulièrement élevé pour les prairies permettent, car elles répondent à de fortes attentes à la fois agronomiques et écologiques.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier les attentes des agriculteurs et de leurs conseillers vis-à-vis des prairies permanentes, puis de discuter de la réponse que les outils existants peuvent apporter à ces attentes.

Ce chapitre s'appuie sur les résultats des enquêtes que j'ai réalisées en 2017 avec l'aide de trois stagiaires (Gaëlle Imbert, Louise Lobjois et Marc Bisset) auprès de 54 agriculteurs (Figure 25). Les agriculteurs ont été interrogés individuellement : nous avons utilisé un questionnaire afin d'éviter les biais entre enquêteurs. L'objectif de cette enquête était double : étudier la diversité des pratiques agricoles sur les prairies permanentes du massif vosgien et recueillir les attentes des agriculteurs vis-à-vis des prairies permanentes. Ce questionnaire est composé de questions portant sur l'exploitation agricole, sur les prairies permanentes en général, et plus précisément sur les prairies permanentes utilisées pour évaluer la diversité des végétations et des pratiques agricoles sur le massif vosgien. Certaines questions étaient ouvertes pour pouvoir obtenir toute la diversité des réponses des agriculteurs, tandis que la majorité des questions était fermées pour éviter les biais entre enquêteurs et faciliter les comparaisons entre agriculteurs.

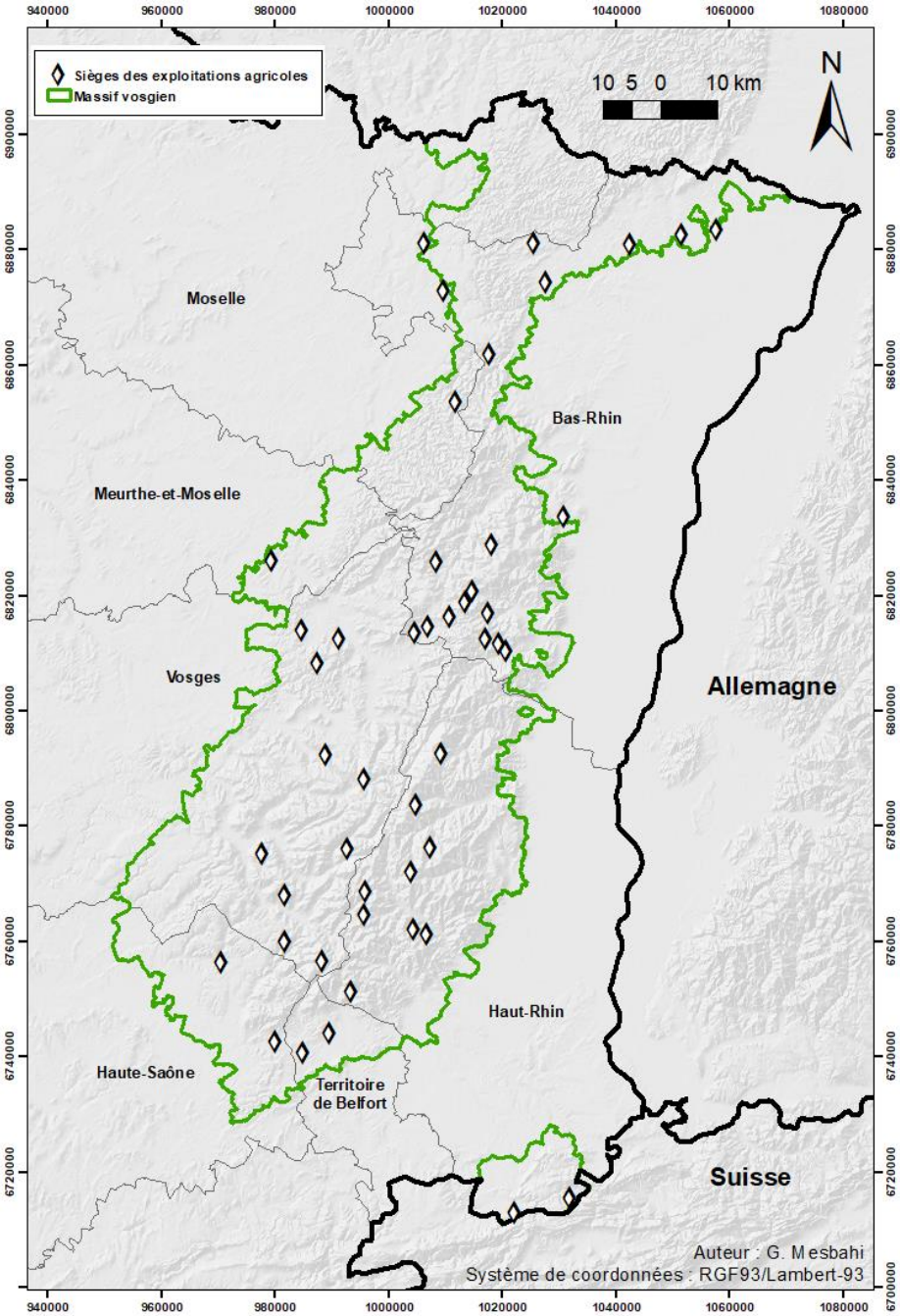


Figure 25 Sièges d'exploitation des 54 agriculteurs ayant répondus à l'enquête

1. Des attentes différentes entre acteurs

Afin d'être facilement pris en main par les conseillers et les agriculteurs, les outils doivent répondre aux attentes de tous. Pour cela, il est avant tout nécessaire de connaître la définition de la prairie permanente : cette définition peut être variable selon les acteurs, cette étape permet donc de vérifier qu'une même définition est partagée par tous. Discuter la définition de la prairie permanente peut aussi permettre de mettre en avant les valeurs qui y sont associées et la diversité de prairies à travers le massif vosgien. Une fois la définition établie, j'ai pu analyser les attentes des agriculteurs et conseillers vis-à-vis des prairies permanentes et les comparer entre agriculteurs, mais aussi entre agriculteurs et conseillers.

1.1. Quelle définition de la prairie permanente ?

La définition de la prairie permanente varie selon les acteurs : agriculteurs, agronomes, écologues et représentants de l'administration ont des définitions qui leurs sont propres (Plantureux et al., 2012). Par exemple, la réglementation de la PAC définit la prairie permanente comme ayant plus de 5 ans et non intégrée dans un système de rotation : une prairie permanente détruite puis immédiatement ressemée d'herbe restera donc une prairie permanente. A l'inverse, les écologues définissent la prairie permanente par la présence d'une végétation spontanée et diversifiée, induisant le développement d'autres organismes vivants (micro et macro faune, bryophytes…). Il s'agit donc de prairies qui n'ont pas été semées ni retournées depuis au moins 10 ans.

Lors de la réalisation des enquêtes, nous avons demandé aux agriculteurs leurs définitions de la prairie permanente, grâce à une question ouverte (Figure 26). L'expression la plus citée est « jamais labourée » (28 agriculteurs), qui peut être rapprochée de « jamais semée » (9 agriculteurs) et de la notion de temporalité : 6 agriculteurs ont exprimé la « longue durée » et le fait que les prairies permanentes soient « toujours » en place. Le terme « naturel » a été énoncé par 14 agriculteurs ainsi que les termes « flore » (6 agriculteurs), « herbes » (3), « fleurs » (1) et « plantes » (1). Enfin, certains agriculteurs ont exprimé que les prairies permanentes nécessitent peu d'entretien à l'exception de la fertilisation (optionnelle ou pas).

On peut donc voir que la définition de la prairie permanente par les agriculteurs est plus proche de la définition des écologues que de la définition administrative de la PAC : la prairie permanente n'est jamais labourée ni semée et héberge la biodiversité végétale.

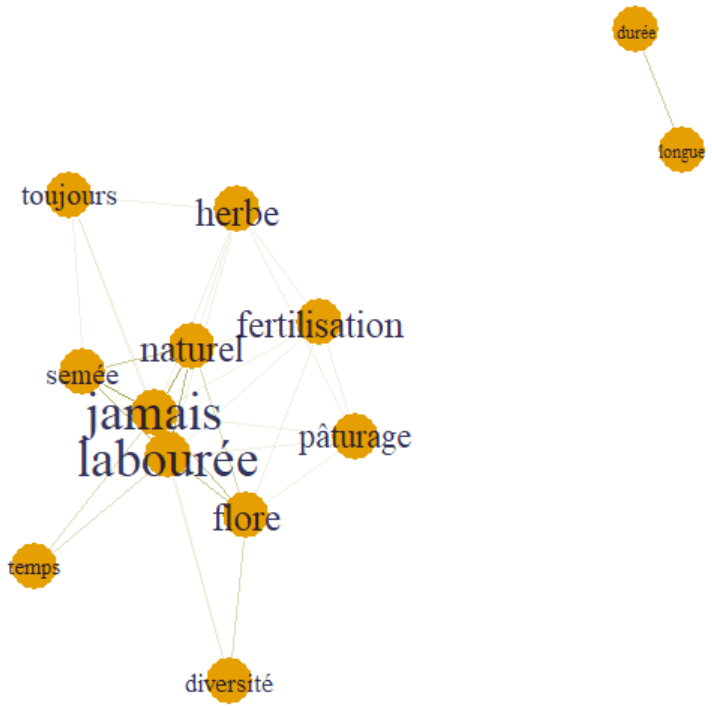


Figure 26 Principales définitions de la prairie permanente selon les agriculteurs du massif vosgien

Graphique issu des enquêtes auprès de 54 agriculteurs du massif vosgien. La taille des réponses est proportionnelle au nombre de fois que la réponse a été apportée. Seules les réponses données par au moins 2 agriculteurs sont montrées. Graphique construit grâce au package igraph du logiciel R (Csárdi, 2020; R Core Team, 2019)

1.2. Les attentes agroécologiques des différents acteurs

Afin de transmettre efficacement les connaissances scientifiques aux acteurs de terrain, il est important de savoir ce que ces acteurs veulent connaitre. Pour cela, nous avons identifié les attentes des agriculteurs lors des enquêtes individuelles, et plusieurs réunions ont été organisées avec des conseillers agronomes et écologues.

1.2.1. Attentes des agriculteurs

Nous avons obtenu les attentes des agriculteurs grâce à deux questions : une première question ouverte, où les agriculteurs ont pu donner spontanément leurs trois principales attentes (Figure 27A), puis une seconde question fermée où nous avons demandé aux agriculteurs de sélectionner les trois attentes les plus importantes à leurs yeux parmi une liste de 15 (Figure 27B).

Les réponses spontanées et proposées sont semblables : elles sont principalement liées à la production fourragère (quantité et qualité) et à la diversité. Spontanément, les agriculteurs attendent principalement de bons « rendements », mais quand ils ont à choisir parmi une liste, on voit qu'ils demandent un rendement en général (18), mais attendent aussi une bonne repousse estivale (16) et automnale (5), trois attentes d'ailleurs liées et donc exprimées ensemble par les mêmes agriculteurs (Figure 27B). Concernant la qualité, les agriculteurs ont exprimé spontanément et sélectionné des attentes à propos de la qualité fourragère en général mais aussi plus spécifiquement à propos de l'appétence ou de la digestibilité. Appétence et digestibilité n'ont pas été exprimées par les mêmes agriculteurs, ce qui montre des attentes de qualité fourragère propres à chaque agriculteur (Dobremez et al., 2015). La souplesse d'exploitation, qui est la capacité de la prairie à perdre lentement sa qualité fourragère, a été exprimée spontanément par 4 agriculteurs puis sélectionnée par 13. Liée à la fois à la quantité et à la qualité fourragère, les agriculteurs ont exprimé des attentes pour la résistance face aux aléas climatiques (8 et 14 agriculteurs). Cependant, les agriculteurs ont été interrogés en 2017, et les étés 2018 et 2019 ont été particulièrement chauds et secs induisant de fortes pertes de fourrage pendant l'été et l'automne. Il est donc possible que les attentes à propos de la résistance aux aléas climatiques soient plus fortes aujourd'hui.

Des attentes de diversité ont été fortement exprimées, spontanément (26) et sur sélection (20). Les agriculteurs ont aussi parlé de « paysage » (3 et 4 agriculteurs), qui peut être indirectement lié à la diversité floristique. Cependant, ils ont un aspect critique sur certaines espèces jugées invasives, qui peuvent diminuer le rendement comme les rhinanthes (Davies et al., 1997), la qualité fourragère comme les rumex ou les grandes ombellifères (Theau et al., 2017) ou les surfaces exploitables comme le genêt à balais et la fougère aigle. Ces résultats se rapprochent des observations de Larrère (2007), qui montrent que les éleveurs évaluent les espèces végétales selon leurs productions fourragères : même si les agriculteurs veulent ici des prairies diversifiées, toutes les espèces ne sont pas forcément attendues. On peut noter une volonté des agriculteurs à maintenir des prairies permanentes sans produits phytosanitaires (sélectionnée par 6 agriculteurs), bien que les agriculteurs exprimant des attentes sur les espèces invasives et sur l'utilisation de produits phytosanitaires ne soient pas les mêmes.

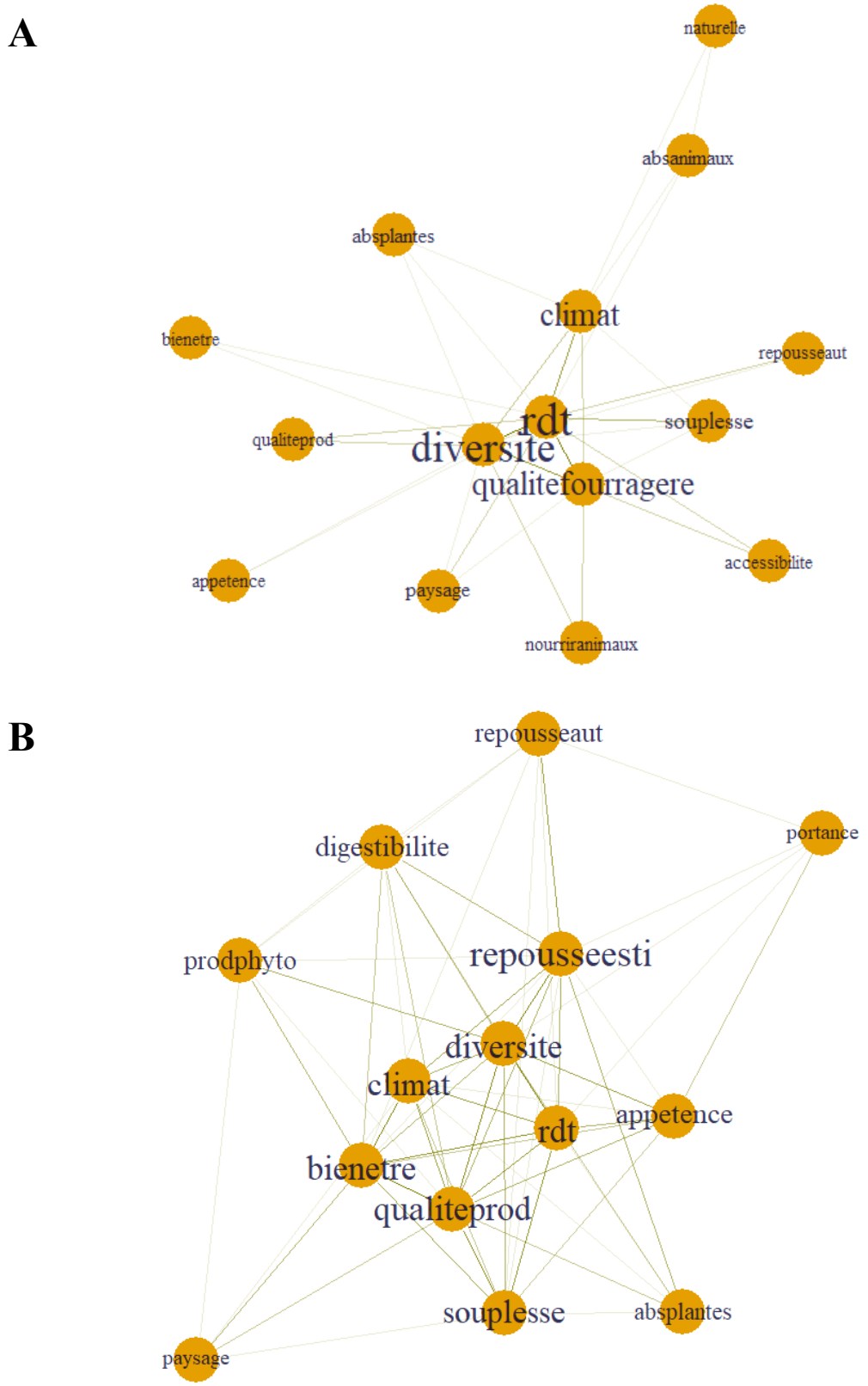


Figure 27 Principales attentes exprimées spontanément (A) ou sélectionnées dans une liste (B) par les agriculteurs.

Le détail des réponses et des abréviations est disponible dans l'Annexe 11. Graphique issu des enquêtes auprès de 54 agriculteurs du massif vosgien. La taille des réponses est proportionnelle au nombre de fois que la réponse a été apportée. Seules les réponses données par au moins 2 agriculteurs sont montrées. Graphique construit grâce au package igraph du logiciel R (Csárdi, 2020; R Core Team, 2019)

Le bien-être animal a été exprimé spontanément (2) et fortement sélectionné (20). Cependant, le bien-être englobe différentes notions : ne pas souffrir de la faim et de la soif, ne pas souffrir de contraintes physiques, être indemne de douleur, de blessure et de maladie, avoir la liberté d'exprimer des comportements normaux, être protégé de la peur et de la détresse (Farm Animal Welfare Council, 1993). Le questionnaire n'a pas permis de mettre en avant les attentes plus précises des agriculteurs sur cette thématique.

Enfin, il est important de noter que 2 agriculteurs ont exprimé des attentes vis-à-vis des animaux sauvages, que nous n'avions pas proposées dans la liste des attentes à sélectionner. Or, les dégâts causés par les sangliers sont en forte augmentation ces dernières années, et deviennent une problématique majeure pour les agriculteurs du massif vosgien (Figure 28). On peut donc s'attendre à une augmentation de cette attente entre la réalisation de l'enquête en 2017 et aujourd'hui.

Figure 28 Prairie retournée par les sangliers en décembre 2018

Les principales attentes spontanées des agriculteurs sont en lien avec la diversité spécifique, la production fourragère, la qualité fourragère et la résistance aux aléas climatiques qui rejoint indirectement les précédentes attentes. Les attentes sélectionnées sont semblables : elles sont en liens avec la production fourragère (rendement, repousse estivale, résistance aux aléas climatiques), avec la qualité fourragère (appétence, digestibilité, souplesse, résistance aux aléas climatiques) et la diversité. Le bien-être animal a aussi souvent été sélectionné.

1.2.2. Attentes des conseillers

Les conseillers, agronomes et écologues, ont été sollicités lors de multiples réunions à propos du fond des outils à développer pour pouvoir conseiller les agriculteurs. Il ressort des réunions l'importance de traiter la quantité et la qualité du fourrage, la protection de la biodiversité, ainsi qu'une valorisation socio-économique de l'utilisation des prairies permanentes. Les principaux thèmes sont détaillés ci-dessous.

Les conseillers ayant participé à ces réunions venaient d'horizons variés : 5 conseillers des Chambres d'Agricultures départementales (67, 70 et 88), 1 chargé de mission

agroenvironnement de l'Association Mosellane d'Economie Montagnarde, 2 chargés de mission agriculture des Parcs Naturels Régionaux (Ballons des Vosges et Vosges du Nord), 2 chargés de mission paysage, environnement et aménagement du territoire fortement impliqués dans le maintien des prairies permanentes (Communauté de Communes de la Vallée de la Bruche et Communauté de Communes de la Vallée de Villé), 4 conseillers Natura 2000 (PNR et Communautés de Communes précédemment cités), 1 chargé de mission du Conservatoire Botanique de Franche-Comté et 1 chercheur de l'Université de Lorraine et INRA.

Figure 29 Réunion d'échange entre conseillers d'horizons variés

Les attentes de chaque conseiller ont été obtenues lors de plusieurs réunions d'échange à propos du programme d'étude des prairies permanentes du massif vosgien dans lequel cette thèse est incluse, et les attentes ont été plus particulièrement synthétisées lors d'une réunion où la question centrale était « Quels leviers activer dans l'outil [de médiation] pour concilier agronomie et écologie ». Afin d'obtenir et synthétiser les réponses, la méthode du métaplan a été utilisée pendant la réunion (Figure 29). La synthèse de cette réunion est présentée ci-dessous :

Stratégie herbagère :

- Prédiction des rendements, qualités fourragères et compositions botaniques
- Conseils de gestion : date de première utilisation, fertilisation, chargement, …

Les nouvelles qualités fourragères :

- Valeur aromatique, valeur organoleptique
- Santé animale (tanins, oligoéléments, …)

Résilience :

- Définir une notion de « risque » économique, sanitaire et pour l'autonomie fourragère
- Doit prendre en compte le changement climatique, la souplesse d'exploitation de la prairie et la stabilité dans le temps des rendements et qualités fourragères.

Economie :

- Bénéfices et coûts de production des prairies, en fonction des pratiques agricoles et de la composition botanique
- Comparaison entre prairies permanentes et prairies temporaires sur le long terme
- Valoriser l'image commerciale des prairies
- Développer ou mettre en avant des filières basées sur la production de lait et/ou viande à l'herbe

Diversité :

- Composition botanique
- Estimation de la diversité et/ou de l'abondance des insectes pollinisateur, prédiction du potentiel de production de miel
- Liens entre composition botanique et valeur alimentaire
- Mettre en avant les atouts de la biodiversité

Social :

- Temps de travail
- Qualité de vie
- Reconnaissance de l'entretien des prairies, par exemple grâce au « Concours des Pratiques Agro-Ecologiques Prairies & Parcours », anciennement « Concours Prairies Fleuries »

1.2.3. Confrontation entre les attentes des agriculteurs et des conseillers

Les attentes sur la stratégie herbagère sont assez proches entre agriculteurs et conseillers : tous cherchent à pouvoir prédire le rendement, la qualité fourragère ou la diversité botanique. Les conseillers ont aussi exprimé vouloir plus de données sur l'impact des pratiques agricoles (date d'utilisation, fertilisation, chargement) sur les propriétés des prairies, ce qui n'a pas été exprimé par les agriculteurs. Cependant, les agriculteurs n'ont pas été directement interrogés sur cette problématique et leurs questions étaient plus fermées, ce qui peut expliquer cette différence. L'importance de l'autonomie fourragère a pourtant été mise en avant dans les exploitations de montagne, en particulier en zone AOP ou pour les exploitations labélisées (Agriculture Biologique par exemple), car l'achat de fourrage est limité et/ou se fait à des coûts élevés (Dobremez et al., 2015).

Les attentes sur les nouvelles qualités fourragères (valeur aromatique, organoleptique et santé animale) ont été exprimées par les conseillers et les agriculteurs. Ces derniers sont demandeurs de prairies permettant de produire des produits de qualité, et de maintenir un niveau satisfaisant de bien-être animal. La valorisation des prairies par le pâturage peut apporter des réponses à ces attentes, car les fourrages pâturés ont une valeur organoleptique supérieure à celle des prairies fauchées (Farruggia et al., 2008), et le pâturage est favorable au bien-être des animaux (Arnott et al., 2017). Enfin, les prairies diversifiées participent à la flaveur des produits (lait, fromage et viande), et peuvent aider à la bonne santé des animaux par l'apport d'antioxydants et de tanins (Bovolenta et al., 2014; Buchin et al., 1999; Jeangros et al., 1997; Poutaraud et al., 2017).

Concernant la résilience, les agriculteurs n'ont pas demandé d'estimation des risques sanitaires ou économiques selon le climat et les pratiques qu'ils adoptent, mais l'effet du changement climatique est bien l'une de leur préoccupation et ils ont exprimé des attentes vis-à-vis de la souplesse d'exploitation. De précédentes enquêtes ont mises en avant de fortes préoccupations des agriculteurs face au changement climatique : les exploitations ayant peu de surface fauchée et/ou peu de surface de pâturage au printemps sont les plus menacées par le manque de fourrage (Dobremez et al., 2015). En effet, les sécheresses qui touchent nos régions aujourd'hui pourront devenir la norme avant la fin du 21ième siècle (Calanca, 2007).

Les attentes économiques n'ont par contre que peu été exprimées par les agriculteurs directement, seul un agriculteur attend spontanément une meilleure rentabilité. Ce résultat peut être dû à l'utilisation d'un vocabulaire différent, car les agriculteurs sont demandeurs de rendement, qualité fourragère et qualité des produits, qui affectent le chiffre d'affaire des exploitations agricoles. De plus, aucune attente directement liée aux coûts de production ou au chiffre d'affaire n'était proposée dans l'enquête. Pourtant, les coûts de production peuvent varier de 50 à 150 €/tMS entre types de prairies (Bayeur et al., 2013).

Les attentes de biodiversité entre agriculteurs et conseillers sont plus hétérogènes. De nombreux agriculteurs ont des attentes vis-à-vis de la diversité botanique et de l'amélioration de la qualité de leurs produits (qui passe entre autres par la végétation des prairies). Cependant, seul un agriculteur a exprimé vouloir accueillir plus de pollinisateurs et aucun n'a demandé une meilleure mise en avant des atouts de la biodiversité. Ce dernier point est important, car la mise en avant des atouts de la biodiversité pour améliorer la production agricole est un objectif souvent mis en avant pour concilier les propriétés agroécologiques et maintenir des prairies permanentes diversifiées. Enfin, des agriculteurs attendent une diminution de la part des plantes indésirables (2 spontanément, et 5 sur proposition) sans utilisation de produit phytosanitaire (6 sur proposition), et une diminution des animaux indésirables (2 spontanément), problématiques qui n'ont pas été énoncées par les conseillers lors de la synthèse des attentes. Bien que n'apparaissant pas dans cette synthèse, ces problématiques sont tout de même régulièrement soulevées par les conseillers en dehors de ces réunions : les conseillers ont peut-être estimé que ce n'était pas le rôle de ce programme d'étude des prairies permanentes. En effet, la lutte contre les espèces animales indésirables doit être réglée en accord avec les sociétés de chasse, et la lutte contre les ligneux indésirables peut être gérée grâce à des politiques plus favorables à la réouverture paysagère.

Enfin, seul un agriculteur a exprimé spontanément une volonté de diminution de la charge de travail estival. La reconnaissance de l'entretien des prairies a été indirectement exprimée par un agriculteur via une volonté d'augmenter les aides versées par les MAEC (Mesure Agro Environnementales et Climatiques). Cependant, ces problématiques ont été très peu évoquées par les agriculteurs du massif vosgien.

Si les attentes sont similaires, on voit tout de même que des thèmes abordés par les conseillers ne l'ont pas été par les agriculteurs : les agriculteurs n'ont pas ou peu parlé spontanément d'économie ou de social, et nous n'avions pas ciblé ces attentes parmi la liste d'attentes proposées. Cependant, les agriculteurs ont exprimé des attentes sur la production et la qualité fourragère, la résistance aux aléas climatiques ou encore la qualité des produits laitiers et carnés, qui sont indirectement des composantes de la valeur économique. De mêmes, certaines attentes

exprimées par les agriculteurs n'ont pas été précisées par les conseillers, telles que la lutte contre les espèces végétales et animales indésirables.

2. Des outils pour transmettre les savoirs

L'analyse des attentes des agriculteurs et de leurs conseillers a permis d'identifier les thèmes à mettre en avant lors d'échanges entre agriculteurs et conseillers. Il est ensuite nécessaire de se questionner sur la forme des outils permettant la transmission de connaissances : les outils de médiation tels que les typologies ont pour principal objectif de créer un dialogue entre conseillers et agriculteurs, alors que les outils d'aide à la décision sont basés sur des modèles pour prédire précisément les propriétés agroécologiques. Ces différentes formes ont des forces et faiblesses qui doivent être identifiées et confrontées aux attentes des agriculteurs et conseillers.

2.1. Les typologies de prairies : valorisables seules ?

Les prairies permanentes peuvent être classées selon différentes méthodologies, répondant à différents objectifs. Les principales méthodes de classification sont les typologies phytosociologiques, les typologies agronomiques et les typologies fonctionnelles. Les typologies en elles-mêmes elles sont uniquement des classifications, elles ne sont pas utilisables pour le conseil. Par contre elles sont généralement intégrées à des outils de conseils pour permettre l'estimation de nombreuses propriétés agroécologiques à l'échelle de la parcelle ou de l'exploitation agricole. Dans les paragraphes suivants, lorsque je parle de « typologie » j'entends la classification et les outils de conseil associés (ex : Annexe 1 à Annexe 5).

Les typologies phytosociologiques permettent une description précise de la végétation et des liens entre espèces végétales. Elles ont aussi l'avantage de permettre d'estimer l'état de conservation des prairies (Dengler et al., 2008), qui permet de cibler les prairies à conserver et celles à améliorer. Cependant, la phytosociologie est une science difficile à maitriser, et qui demande tout d'abord de fortes connaissances en botanique : elle n'est pas valorisable directement par la majorité des agriculteurs et de leurs conseillers agricoles. Les phytosociologues se sont récemment emparés de ce problème en développant des clés permettant une détermination simplifiée des types (Ferrez et al., 2017), ou des applications informatiques permettant de prédire le type phytosociologique le plus probable grâce à une liste d'espèces observées (Plantureux and Amiaud, 2009; Tichý and Chytrý, 2019). L'application libre de droit développée par Tichý et Chytrý (2019) pourrait donc être adaptée au massif vosgien, et permettre à toute personne ayant des connaissances en botanique de pouvoir s'initier à la phytosociologie. Les typologies phytosociologiques permettent de prédire l'intérêt écologique de la prairie, mais sont peu efficaces pour prédire les propriétés agronomiques : elles ne permettent donc pas de répondre aux attentes de tous les acteurs des prairies permanentes.

De nombreuses typologies agronomiques ont été développées, principalement en France et dans les pays voisins tels que la Suisse, l'Italie et la Belgique (Michaud et al., 2013). Ces typologies ont pour objectifs d'estimer les rendements et qualités fourragères des prairies. Les prairies ont été regroupées selon leurs végétations, mais il n'est pas toujours nécessaire d'avoir des connaissances botaniques pour attribuer un type à chaque prairie : certaines typologies permettent une prédiction des types grâce à des connaissances du milieu et des pratiques

agricoles (Bayeur et al., 2013; Collectif, 2006; Launay et al., 2011; Reboul Salze et al., 2018). De plus, ces typologies intègrent une description des propriétés écologiques, elles permettent par exemple d'estimer la richesse spécifique, la richesse en espèces oligotrophiles, ou encore l'intérêt de la prairie pour les pollinisateurs. Ces typologies permettent donc de répondre aux principales attentes des agriculteurs, qui sont d'estimer les rendements, la qualité fourragère et la biodiversité, sans avoir de connaissances scientifiques particulières.

Les typologies fonctionnelles s'appuient sur des connaissances de l'écologie fonctionnelle. Ses objectifs sont de prédire des propriétés agronomiques telles que le rendement, la valeur nutritive, mais aussi la souplesse d'exploitation ou la précocité de la végétation (Cruz et al., 2010; Theau et al., 2017). Ces typologies n'ont pas été spécifiquement développées pour le massif vosgien, mais elles peuvent théoriquement être utilisées sur toute la France Métropolitaine. Bien que ces typologies intègrent de nombreuses espèces dispersées le long d'un fort gradient d'altitude, elles se sont surtout basées sur des prairies de la moitié sud de la France (Alpes, Massif Central, Pyrénées). Vérifier ou adapter ces résultats au massif vosgien pourrait permettre d'augmenter la fiabilité des typologies. Pour déterminer le type fonctionnel d'une prairie, il est nécessaire de savoir reconnaitre certaines espèces, et donc d'avoir des connaissances en botanique, en particulier pour la typologie des graminées (Cruz et al., 2010) qui peuvent être plus difficile à déterminer que les dicotylédones. Le calcul des propriétés agronomiques peut se faire à la main grâce aux équations proposées par Theau et al. (2017), ou de façon automatisée à l'aide d'un tableur tel que Herb'type (Duru et al., 2010). Cependant, seuls des indices sont calculés, et non des rendements exprimés en tonnes de MS par hectare. Adapter ce tableur au massif vosgien pourrait peut-être permettre de mieux répondre aux attentes agronomiques.

Enfin, les méthodes de classification peuvent être combinées. Hulin et al. (2011) ont par exemple attribué des types phytosociologiques à des prairies, puis ont interrogé les agriculteurs pour connaitre précisément les pratiques agricoles et mesurer les rendements et qualité fourragère. Cette combinaison de méthode a l'avantage de créer des types pouvant répondre aux attentes agronomiques et écologiques : elle permet d'attribuer des propriétés agronomiques et écologiques aux prairies. Elle peut donc identifier des prairies avec de faibles valeurs agronomiques et écologiques, dont l'amélioration satisfera à la fois agriculteurs, agronomes et écologues. Mes résultats présentés dans le chapitre 2 vont aussi dans ce sens : j'ai montré que l'estimation de 9 propriétés agroécologiques sur 15 est améliorée lorsque les méthodes de classification sont combinées. Pour cela, j'ai utilisé les approches agronomique, phytosociologique et fonctionnelle. Cependant, malgré cette nouvelle approche, les propriétés écologiques en particulier demeurent difficiles à estimer.

Les typologies ont l'avantage de pouvoir répondre à des nombreuses attentes agroécologiques, en particulier lorsque les méthodes de classification sont combinées. De plus, les typologies agronomiques peuvent être facilement prises en main par les agriculteurs et les conseillers agronomiques, lorsque les clés de déterminations s'appuient sur les pratiques agricoles. Cette approche peut être une limite aux yeux des écologues souhaitant ne s'appuyer que sur des relevés botaniques, plus rapides à réaliser qu'un entretien avec l'agriculteur, mais elle permet aux conseillers d'entamer une discussion avec l'agriculteur. Enfin, la dernière principale limite est que les typologies ne permettent pas une prédiction précise des propriétés, car elles se basent sur des moyennes sans prendre en compte les légères variations de pratiques, de milieu ou de

végétations entre prairies d'un même type, ni la météo réelle de l'année pouvant impacter les propriétés agroécologiques (variations intra et inter-annuelles).

La typologie parfaite pourrait donc être issue d'un mélange des approches phytosociologiques, agronomiques et fonctionnelles, dont le type serait déterminable grâce aux pratiques agricoles et à la végétation. Enfin, un support informatique permettrait de corriger et améliorer la typologie, mais aussi de calculer automatiquement les propriétés agroécologiques.

2.2. La cartographie : voie d'amélioration des typologies ?

Réaliser une cartographie des typologies à l'échelle du paysage ou de l'exploitation permet de valoriser les types phytosociologiques, agronomiques et fonctionnels attribués à des communautés. La cartographie permet par exemple aux écologues d'étudier la diversité des prairies à l'échelle du paysage, et aux agriculteurs d'adapter leurs pratiques aux potentiels de leurs prairies.

L'échelle de précision de la cartographie nécessite d'être murement réfléchie. En effet, la phytosociologie se base sur des surfaces de quelques dizaines de mètres carrés, alors que les typologies agronomiques se basent souvent sur des communautés plus grandes. Cependant, les communautés végétales sont souvent de faible intérêt pour l'agriculteur, généralement intéressé par des données à la parcelle (correspondant à l'unité de gestion), ou à l'exploitation agricole (correspondant à l'échelle permettant de réaliser des bilans fourragers et économiques). Afin de répondre au mieux aux attentes des agriculteurs, les typologies agronomiques sont réalisées sur la communauté dominante en terme de surface de chaque prairie, généralisé à l'ensemble de la prairie. Mais en phytosociologie, les différents types au sein d'une même prairie sont tous considérés tant qu'ils ont une taille significative, qui est à déterminer avant la réalisation de la cartographie.

Cartographier les prairies et leurs types permet de se rendre compte de la dispersion des prairies, et donc de réfléchir à leur utilisation. Par exemple, les pâturages utilisés par les vaches laitières peuvent être rapprochés de l'étable alors que les pâturages utilisés pendant de long mois par les génisses peuvent être éloignés s'il n'est pas nécessaire de leur amener de l'eau en été. De même, les prairies de fauches peuvent être éloignées car il n'est pas nécessaire de les visiter très régulièrement. D'un point de vue écologique, la cartographie peut permettre aux écologues de réfléchir à la connectivité entre les milieux, mais aussi de mesurer la diversité des associations au sein des parcelles. Enfin, elle peut permettre une gestion agroécologique en montrant que les surfaces à très haute valeur écologique sont souvent faibles, il est donc possible de les protéger sans impacter le bilan fourrager de l'exploitation.

Enfin, les cartographies peuvent être réalisées par des observations de terrain (relevés botaniques pour les typologies phytosociologiques et fonctionnelles, enquêtes auprès des agriculteurs pour les typologies agronomiques), mais la télédétection par satellites ou drones se développe. La plupart des télédétections se font à grande échelle, mais la télédétection de communautés végétales (géosigmetum) à l'échelle de quelques mètres est désormais possible (Rapinel et al., 2015; Xie et al., 2008).

La cartographie peut donc augmenter l'intérêt des typologies, en apportant une dimension paysagère attendue et valorisable par les agriculteurs et écologues.

2.3. Les suivis « au jour le jour »

Les éleveurs ont besoin de mesurer régulièrement la croissance et/ou la qualité de la végétation afin d'adapter les dates de fauches ou de pâturages et la fertilisation à apporter. A l'inverse, la composition botanique des prairies est relativement stable dans le temps et ne nécessite donc pas d'être réévaluer au cours de la saison pour juger de ses propriétés écologiques.

Plusieurs outils ont été développés pour que les agriculteurs puissent estimer eux-mêmes la production des prairies. Ces outils, dont le plus connu est l'herbomètre, mesurent la hauteur et la densité de la végétation grâce à des plateaux ou à des ultrasons, qui peuvent ensuite être convertis en rendement à l'hectare. Schori (2020) a montré que ces outils donnent des valeurs similaires malgré des méthodes parfois différentes, mais que la qualité de la prédiction est faible : la conversion de la densité au rendement nécessite un calibrage (Pottier et al., 2017; Schori, 2020), en particulier pour les prairies permanentes ayant des compositions botaniques différentes les unes des autres. Créer des tables de conversion propre à chaque type de prairie peut aider à améliorer la fiabilité de ces outils. Enfin, ces outils sont simples à utiliser et l'herbomètre à plateau n'utilisant pas d'électronique est peu cher (autour de 100€). Cependant, ils sont généralement uniquement utilisables sur les pâturages car leurs mesures perdent en qualité lorsque la végétation verse (Duru and Bossuet, 1992), et plus particulièrement pour du pâturage tournant. Cette technique est peu utilisée dans le massif vosgien, en particulier dans les prairies d'altitude dont la configuration (proximité avec l'étable, découpage du parcellaire) et la vitesse de croissance ne la permettent pas. De plus, les prairies du massif vosgien sont généralement hétérogènes ce qui complique la mesure de l'herbe à l'échelle de la parcelle, en particulier dans les prairies où de petits ligneux comme les myrtilliers (*Vaccinum myrtillus*) sont très présents. Ce type d'outil est donc assez peu adapté aux agriculteurs du massif vosgien, à l'exception d'agriculteurs uniquement en plaine et misant principalement sur le pâturage.

Si l'agriculteur n'a pas besoin d'une précision maximale de la croisse de la végétation, il peut utiliser les « bulletins de pousse de l'herbe », réalisés par de nombreux observatoires à l'échelle départementale ou régionale. Les informations récoltées sont variées (hauteur et rendement de la végétation, somme de températures, nombre de jours d'avance) et peuvent permettre aux agriculteurs d'optimiser leurs pratiques grâce à des conseils directement fournis par les observatoires tels que des dates de mise à l'herbe ou de fauche (Desmonière et al., 2019). Cependant, les prairies utilisées pour les mesures doivent avoir des conditions pédoclimatiques, des pratiques et une végétation représentative des prairies des agriculteurs. Par exemple, la région Grand Est possède un observatoire (Figure 30), mais aucune prairie d'altitude n'est suivie (Chambre d'agriculture Grand Est, 2020). Augmenter le nombre de prairies suivies, ou réaliser des tables de conversion entre moyenne régionale et types de prairies pourrait aider les agriculteurs du massif vosgien à optimiser leurs prairies. Enfin, ces bulletins donnent des informations sur la croissance de l'herbe, il serait intéressant de compléter ces informations grâce à des mesures de qualité fourragère. En effet, mesurer la qualité fourragère peut être difficile pour les agriculteurs, car les outils disponibles sont peu nombreux et peuvent être très chers : un spectroradiomètre coûte environ 100.000 € à l'achat (Pottier et al., 2017). Des « pinces à chlorophylle » peuvent être utilisées pour estimer le taux d'azote de la végétation, mais des études sont encore nécessaire pour convertir ces valeurs en qualité fourragère.

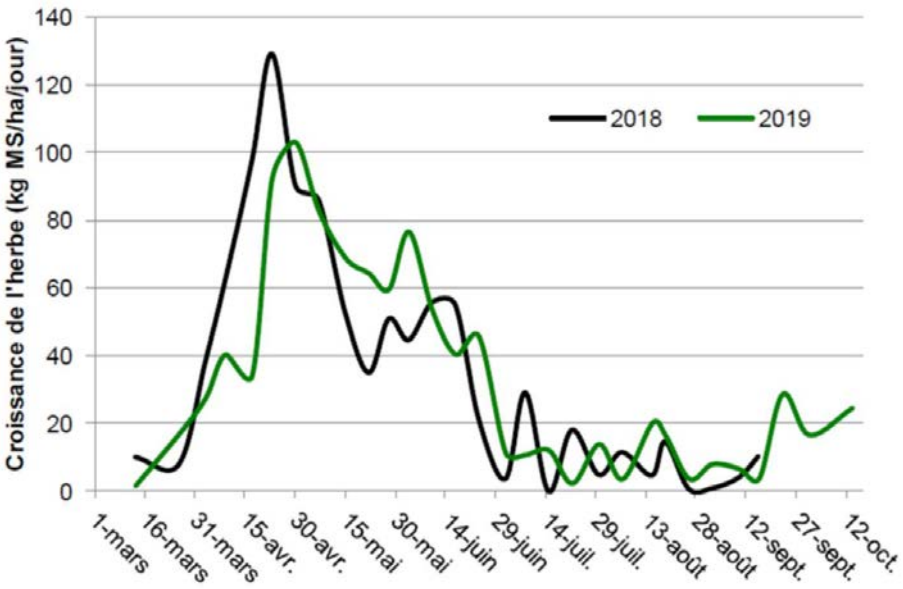


Figure 30 Pousse de l'herbe en région Grand Est en 2018 et 2019 (Chambre d'agriculture Grand Est, 2020)

2.4. Les espèces indicatrices

Les espèces indicatrices sont des espèces dont la présence ou l'abondance fournissent des informations sur la condition de la communauté et des autres espèces. Dans le but de prédire les propriétés agroécologiques des prairies, le plus important est d'identifier des indicateurs de rendement, de qualité fourragère, de biodiversité générale et de biodiversité d'intérêt (espèces patrimoniales, rares ou menacées). Cependant, des indicateurs de pratiques agricoles peuvent être utilisés afin de montrer l'effet de l'intensification des pratiques ou du mode d'utilisation sur la végétation, et des indicateurs de milieu peuvent permettre de réaliser un diagnostic du sol et du climat.

Les indices d'Ellenberg peuvent être utilisés comme variables indicatrices. De nombreuses espèces ont été notées pour leur réaction à des facteurs comme la fertilité, le pH et l'humidité du sol, le pâturage, le climat, etc. (Ellenberg et al., 1992) (Figure 31). Ces indices sont utilisés pour estimer les rendements (Hill and Carey, 1997) et les communautés végétales (Chytrý et al., 2009; Michaud et al., 2012b), en particulier lorsque des moyennes pondérées sont calculées à l'échelle de la communauté végétale (Diekmann, 2003; Schaffers and Sýkora, 2000). Mes résultats (Chapitre 1 Partie B et Chapitre 3) ont en effet permis de montrer que les indices d'Ellenberg pour la fertilité, l'humidité et l'état calcique sont utiles à la bonne prédiction des rendements, valeurs pastorales, indices de Shannon, richesses en oligotrophiles, ainsi qu'à la prédiction des classes de synergies et antagonismes entre propriétés. Mais pour maximiser les qualités des prédictions il est nécessaire de les utiliser avec d'autres critères du milieu, des pratiques et/ou de la végétation.

Les espèces indicatrices sont principalement utilisées pour estimer les propriétés écologiques telle que la richesse générale, en espèces oligotrophiles et en espèces menacées (Kaiser et al., 2010; Matzdorf et al., 2008; Wittig et al., 2006), ou pour estimer l'intérêt d'une communauté pour les polinisateurs (Hegland and Totland, 2005). L'estimation des propriétés agronomiques nécessite généralement de connaitre les abondances relatives des espèces indicatrices, comme par exemple pour le calcul de la valeur fourragère (Daget and Poissonet, 1972) ou de la

productivité et de la souplesse d'exploitation (Theau et al., 2017). Les espèces indicatrices de types prairiaux peuvent être assimilées aux « combinaisons caractéristiques » : il est donc possible d'attribuer un type en s'appuyant sur ces espèces. Si les types prairiaux sont liés à des propriétés agroécologiques, les espèces de la combinaison caractéristique peuvent donc indirectement être des indicatrices de ces propriétés.

Figure 31 La rhinanthe et le pissenlit, des indicateurs de sols peu et très fertiles

L'identification de bonnes espèces indicatrices est un travail long, car il est nécessaire de valider les indicateurs sur de nouveaux jeux de données (Kaiser et al., 2010). Du point de vue de l'utilisateur, des connaissances en botanique sont souvent nécessaires. Si l'on souhaite toucher un public avec peu de connaissances, il faut donc choisir des espèces voir des genres facilement reconnaissables. Enfin, une simple liste d'espèces ne suffit pas, il faut ajouter un outil permettant d'interpréter la présence ou l'abondance des espèces observées, ou donnant des conseils de gestion adaptés pour répondre aux espèces. Par exemple, *Rumex crispus* (oseille crépus) et *Capsella bursa-pastoris* (capselle bourse-à-pasteur) sont à la fois de faibles intérêts écologiques et agronomiques, et sont indicatrices de prairies très fertiles : une diminution de l'intensification des pratiques permet donc de diminuer l'abondance de ces espèces et d'améliorer les propriétés agroécologiques de la prairie.

2.5. Les modèles

Lorsque l'on évoque la prédiction de propriétés agroécologiques, les « modèles » peuvent être rapidement évoqués.

Plus de 1 900 articles scientifiques ont utilisé des modèles appliqués aux prairies (chiffre mis à jour pour cette thèse, d'après van Oijen et al. (2018)). Cependant, les modèles développés pour des études scientifiques permettent de mieux comprendre les liens entre pratiques, milieux, végétation et/ou propriétés agroécologiques, mais ils sont rarement valorisés pour être utilisés par des acteurs de terrain. Pour cela, il est nécessaire de développer des logiciels permettant des interfaces homme-machine ergonomiques.

Le principal avantage des modèles par rapport à d'autres approches est qu'ils permettent de prédire des propriétés réelles, et pas seulement des potentiels comme les typologies et espèces

indicatrices. Mais pour cela, les modèles doivent intégrer de nombreuses variables liées à la météo, au milieu, aux pratiques agricoles, à la végétation (Käding et al., 2005) qui peuvent être difficile à obtenir. En particulier la végétation des prairies permanentes demande des connaissances en botanique ou le déplacement d'un écologue, ce qui peut expliquer qu'elle soit rarement utilisée ou simplifiée à quelques espèces (Pottier and Jabot, 2017). Cependant, la végétation peut être simplifiée grâce aux types prairiaux, et si ces types sont simplement identifiables ils peuvent être intégrés au modèle.

La majorité des modèles permettent la prédiction des propriétés agronomiques ou des propriétés écologiques, mais rarement des deux à la fois (van Oijen et al., 2018). Le modèle Stics permet d'estimer le rendement quotidien des prairies, et le modèle PaSim permet de prédire les rendements des prairies, les productions animales, les flux de carbone, … (Martin et al., 2011; Ruget et al., 2006). Ces deux modèles utilisent des critères de la végétation, du sol, du climat et des pratiques agricoles, mais ne permettent pas la prédiction de propriétés écologiques (richesse spécifique, richesse en espèces oligotrophiles, intérêt pour les pollinisateurs). Afin de répondre aux attentes des agriculteurs et de leurs conseillers, il semble donc nécessaire de développer de nouveaux modèles plus polyvalents. Enfin, un modèle optimal doit aussi donner des conseils de gestion, ou être interprétable par un conseiller qui donnera des conseils de gestion, par exemple sur la date et la dose de fertilisant à apporter, des dates d'utilisation optimales, un chargement à respecter pour valoriser la prairie sans la dégrader, …

Pour prédire à la fois les propriétés agronomiques et les propriétés écologiques et être régulièrement utilisés, les modèles doivent donc être faciles à prendre en main et intégrer de nombreux critères des pratiques, du milieu et de la végétation. Si la prise en compte de la végétation peut être simplifiée grâce aux typologies de prairie, le prix d'un tel modèle risque de limiter l'engagement des agriculteurs vers cette solution.

2.6. Une part du conseil peut échapper aux conseillers

S'il est important de vouloir développer des outils pour aider les agriculteurs, il ne faut pas oublier qu'une part non négligeable des conseils se font directement entre agriculteurs.

Une méfiance peut même s'installer envers les conseillers, qui peuvent être associés à des commerciaux (conseillers envoyés par les coopératives ou les fournisseurs d'aliments pour animaux) ou à des représentants d'un mouvement politique (conseillers des chambres d'agriculture). Les conseillers en écologie ou en agroécologie (conseillers des parc nationaux ou naturels, Natura 2000 ou des Conservatoires Botaniques) peuvent être perçus comme détachés du monde agricoles et leurs conseils comme des freins à la production agricole et donc à la rentabilité des exploitations agricoles. Il est donc important de trouver des personnes en qui les agriculteurs pourront avoir confiance : il peut s'agir bien sûr d'un conseiller parmi ceux cités précédemment, mais aussi d'un agriculteur ou d'un groupe d'agriculteurs qui échangent sur un thème et obtient donc une légitimité vers les agriculteurs externes au groupe. Les conseils peuvent alors se transmettre lors de journées portes ouvertes sur la ferme d'un agriculteur ou lors de réunions plus classiques. Il existe aussi des groupes d'échange entre agriculteurs sur les réseaux sociaux : les agriculteurs y échangent leurs questions et leurs conseils, gratuitement et tous les jours de la semaine. Cependant, le principal groupe d'échanges à propos de la prairie sur le réseau Facebook (près de 12 000 membres) est non-officiellement géré par des conseillers d'une entreprise vendant des conseils et du matériel d'élevage.

Enfin, les agriculteurs ont différents processus d'apprentissage, issus de la théorie et de la pragmatique (Cristofari et al., 2018). Les agriculteurs profitent des conseils qui leurs sont fournis, mais aussi d'expériences imprévues, par exemple une évolution des rendements suite à des phénomènes météorologiques, ou du comportement des animaux face au manque d'herbe en été.

Afin de diffuser les connaissances parmi les agriculteurs, il semble donc intéressant de pouvoir identifier des agriculteurs qui pourront à leur tour jouer un rôle de diffusion de la connaissance. Mais il reste important d'avoir des conseillers disponibles, pour pouvoir animer des visites d'exploitation ou des groupes d'échange, en présentiel ou sur les réseaux sociaux. Enfin, l'apprentissage se fait principalement par proximité via des échanges avec des agriculteurs ou des conseillers, mais environ 20% de l'apprentissage se fait en autonomie (Chantre et al., 2014).

3. Conclusion

Les résultats des enquêtes ont montré de nombreuses correspondances entre les agriculteurs, mais aussi entre agriculteurs et conseillers, à propos de la définition des prairies permanentes et des attentes vis-à-vis des prairies permanentes. Diverses formes d'outils permettent de transmettre les connaissances scientifiques aux agriculteurs : les typologies prairiales ont l'avantage d'être faciles à utiliser et de prédire une grande variété de propriétés agroécologiques, en plus d'être peu chères pour l'utilisateur. De plus, les types décrits peuvent être reliés à de la cartographie, à des espèces indicatrices, ou utilisés dans des modèles pour améliorer la prédiction des propriétés. Cependant, les typologies ont pour principal inconvénient de prédire des propriétés potentielles, principalement parce qu'elles ne peuvent pas prendre en compte le climat de l'année en cours. Il est difficile d'identifier un outil parfait : il faut trouver des compromis entre le coût, la facilité d'utilisation et la qualité des prédictions, mais il faut aussi valoriser les synergies entre utilisation des outils par les agriculteurs seuls ou accompagnés de conseillers, et échanges d'expériences entre agriculteurs.

Les résultats de cette thèse permettent de répondre à une partie des attentes des acteurs des prairies permanentes. Dans le chapitre 1, j'ai pu identifier les principaux critères du milieu permettant la prédiction des présences et abondances d'espèces dont le genêt à balais (*Cytisus scoparius*) souvent non désiré par les agriculteurs ou à l'inverse le raygrass anglais et le trèfle blanc (*Lolium perenne* et *Trifolium repens*) recherchés pour leurs rendements et qualités nutritives. J'ai pu prédire de manière fiable plusieurs propriétés : valeur pastorale, protéines PDIN, énergie UFL et souplesse d'exploitation, ainsi que l'indice de Shannon, la richesse en espèces oligotrophiles et le stock de carbone. La prédiction de ces propriétés nécessite cependant de nombreuses connaissances de la composition botanique et du sol principalement, qui peuvent être difficiles ou couteuses à obtenir pour chaque prairie. La prédiction des propriétés par les typologies uniquement (chapitre 2) est plus simple, mais avec une qualité de prédiction plus faible. Ces propriétés permettent de répondre à de nombreuses attentes des agriculteurs et conseillers, mais il n'est pas encore possible de répondre à toutes les attentes. Si les coûts de productions et la valeur organoleptique sont étudiés en parallèle de cette thèse, la lutte contre les animaux indésirables, l'évaluation du temps de travail, ou le rôle de la prairie dans l'esthétique du paysage ne seront probablement pas étudiés dans un futur proche sur le massif vosgien. Enfin, le chapitre 3 montre que des compromis entre propriétés agroécologiques

sont indispensables, il faut donc réfléchir l'utilisation des prairies à l'échelle de l'exploitation agricole grâce à des outils comme la cartographie.

Enfin, ce chapitre 4 présente des outils permettant de transmettre la connaissance des chercheurs vers les agriculteurs, mais il serait intéressant de chercher à développer des outils permettant aussi aux agriculteurs de faire remonter leurs savoirs.

DISCUSSION GENERALE

La conservation des prairies permanentes est un enjeu majeur car elles produisent une grande diversité de propriétés agroécologiques, permettant la production de produits animaux de qualité, l'accueil d'une forte biodiversité ou encore le stockage de carbone. L'objectif de cette thèse est de prédire ces propriétés agroécologiques, grâce à des critères du milieu (sol, climat, paysage), des pratiques agricoles (mode d'utilisation, intensification) et de la végétation (présence et abondance d'espèces, types prairiaux, indices d'Ellenberg).

Mes résultats montrent que les pratiques agricoles jouent un très faible rôle pour la prédiction des compositions botaniques des prairies permanentes (présences et abondances d'espèces). Seules la date de 1ère utilisation est importante pour la prédiction de la qualité fourragère (énergie, protéines, précocité), de la richesse en espèces oligotrophiles et de la valeur nectarifère. L'environnement (climat et paysage) est un prédicteur important des compositions botaniques, mais est peu utilisé pour la prédiction des propriétés : il apparait seulement comme prédicteur de l'indice de Shannon et du stock de carbone, respectivement lorsque les critères de la végétation et de la matière organique ne sont pas utilisés pour la prédiction. Enfin, les critères du sol jouent un rôle majeur dans le déterminisme des compositions botaniques et, de même que la végétation, sont des prédicteurs principaux des propriétés agroécologiques. Cependant, l'utilisation des typologies seules ne permet pas de prédire correctement les propriétés écologiques, il est nécessaire de les associer à d'autres critères du milieu.

L'étude des compromis entre ces propriétés montre que les prairies peuvent soit produire un fourrage de bonne qualité nutritive, soit produire de hauts rendements tout en hébergeant une forte diversité générale, soit héberger une forte diversité en espèces oligotrophiles et permettre une forte souplesse d'exploitation. Les classes de compromis peuvent être prédites grâce à la date de première utilisation, au calcium du sol et à l'indice d'Ellenberg pour la fertilité.

Enfin, parmi les outils développés pour transmettre les connaissances scientifiques aux acteurs de terrain, les typologies peuvent répondre à de nombreuses attentes tout en étant simple d'utilisation. Cependant, les typologies présentent des limites en particulier car elles ne prennent pas en compte les aléas climatiques annuels. Il peut donc être utile de les associer à d'autres outils pour permettre une réponse optimale aux attentes des agriculteurs et de leurs conseillers.

Cette discussion s'intéressera tout d'abord aux corrélations entre critères du milieu et des pratiques, puis se posera la question de la généralisation des résultats en dehors du massif vosgien. Ensuite, les résultats eux-mêmes seront discutés : les liens entre pratiques, milieu, végétation et propriétés agroécologiques, puis la prédiction des propriétés uniquement par les typologies de prairies, et enfin les synergies et antagonismes entre propriétés. La discussion se terminera sur la confrontation des méthodes de prédictions étudiées tout au long de cette thèse.

1. Corrélations entre critères prédictifs du milieu et des pratiques

Il apparait de fortes corrélations entre critères prédictifs du milieu (sol, climat, paysage) et des pratiques agricoles (Chapitre 1 Partie A ; Annexe 6). Cette non indépendance pose un problème pour l'interprétation des prédicteurs des propriétés agroécologiques : les prédicteurs identifiés ont-ils des liens de cause à effet avec les propriétés, ou sont-ils corrélés à d'autres critères qui ont des liens de cause à effet ? L'étude des corrélations a pu mettre en avant trois principaux effets : altitude, texture et pratiques agricoles, peu corrélés entre eux.

L'effet altitude est principalement corrélé à la température et à la pluviométrie, à l'évapotranspiration, à la teneur en éléments organiques du sol (matière organique, carbone organique, azote), et dans une moindre mesure à la présence de prairies permanentes dans le paysage, à la CEC, au pH et à la teneur en aluminium. Les liens entre altitude et climat sont bien établis (ex : de Almeida Campos Cordeiro and Neri, 2019; Sevruk, 1997; Wang et al., 2019). Le calcul de l'évapotranspiration se base sur la température et le rayonnement solaire, ce qui peut expliquer les corrélations entre ces trois critères. L'évapotranspiration diminue lorsque l'altitude et la latitude augmentent, induisant les faibles valeurs observables sur le massif vosgien : l'une des prairies étudiées perd moins de 550 mm/an par évapotranspiration (Lebourgeois and Piedallu, 2005). L'altitude induit de faibles températures qui diminuent l'activité microbienne, et donc la dégradation de la matière organique : température et humidité sont les principaux déterminant de la matière organique des sols (Post and Kwon, 2000). L'altitude est peu corrélée à la texture mais est corrélé à la CEC (Capacité d'Echange Cationique) du sol, ce qui met en avant la forte capacité des matières organiques à échanger les cations qui peut compenser celle des minéraux (Blaize, 2018). La relation entre acidité et teneur en aluminium échangeable est bien établie (ex : Li et al., 2019; Whitley et al., 2019). Elle s'observe aussi dans les prairies du massif vosgiens (Figure 32) : l'aluminium est rendu disponible à partir d'un pH de 5,5 conformément aux précédentes études (Blaize, 2018). La corrélation entre altitude et pH n'est pas forte. En effet, les prairies de très faible altitude (moins de 250 m) peuvent avoir des pH de 5 à 8, mais tous les pH observés au-dessus de 6,5 sont observés à moins de 450 m (Figure 32). Ils correspondent à des prairies des franges des Vosges du Nord, peu élevées et sur sol calcaire.

L'effet de la texture rassemble la CEC et la teneur en CaO, et dans une moindre mesure le pH, la teneur en MgO et la réserve utile du sol. Les argiles et limons ont généralement de fortes CEC (Blaize, 2018), justifiant la corrélation observée entre ces valeurs. La teneur en calcium est inversement corrélée à l'acidité des sols, effet bien connu des agronomes qui utilisent la chaux pour diminuer l'acidité des sols (Bolton, 1977), mais une corrélation entre texture et acidité peut être observé sur le massif vosgien : les sols les plus argileux sont aussi les moins acides (Figure 33). Ce résultat est dû à la corrélation spatiale entre la présence d'argile et de calcaire sur les franges des Vosges du Nord. Enfin, la réserve utile des sols est fortement dépendante des textures : argiles et limons permettent une meilleure rétention grâce à une microporosité plus importante (Dodd and Lauenroth, 1997; Gupta and Larson, 1979).

Enfin, l'effet des pratiques rassemble le mode d'utilisation, la date de première utilisation, la fertilisation, et la densité de pâturage. Les corrélations entre ces critères ne sont généralement pas aussi forte qu'entres critères des effets altitude et texture. Le nombre de pâturages (nombre de fois que l'agriculteur revient sur la parcelle pour pâturer) est corrélé à la densité de pâturage ($j.UGB.ha^{-1}$) et à la fertilisation ($kgN.ha^{-1}$), ce qui met en avant l'importance des restitutions de N, P et K au pâturage (Dong et al., 2014; Nennich et al., 2005). Les pâturage sont généralement

utilisés plus précocement, afin de valoriser une herbe de meilleure qualité nutritive et plus basse, permettant de limiter les refus et le piétinement de la végétation (Osoro et al., 2017; Pauler et al., 2019).

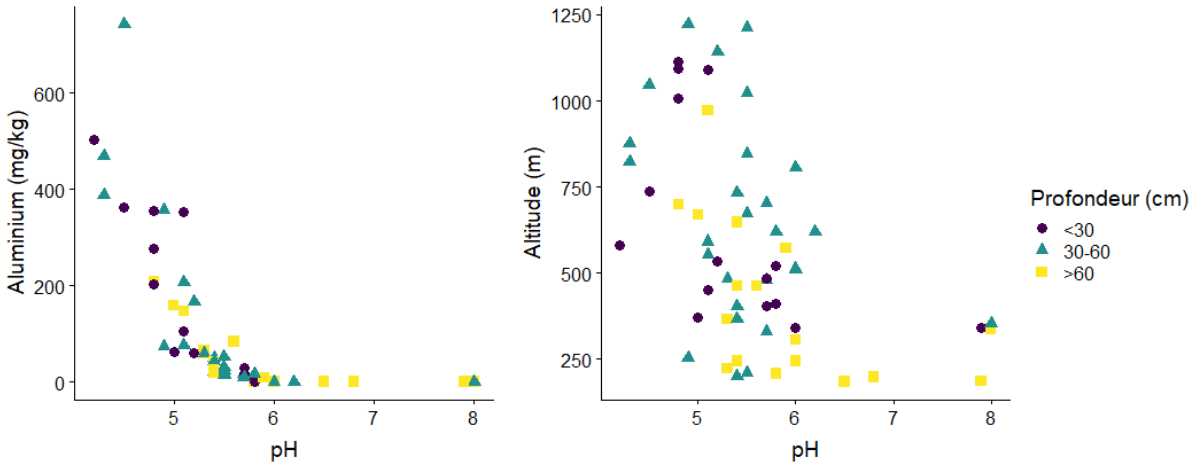


Figure 32 Liens entre acidité, teneur en aluminium, altitude et profondeur des sols

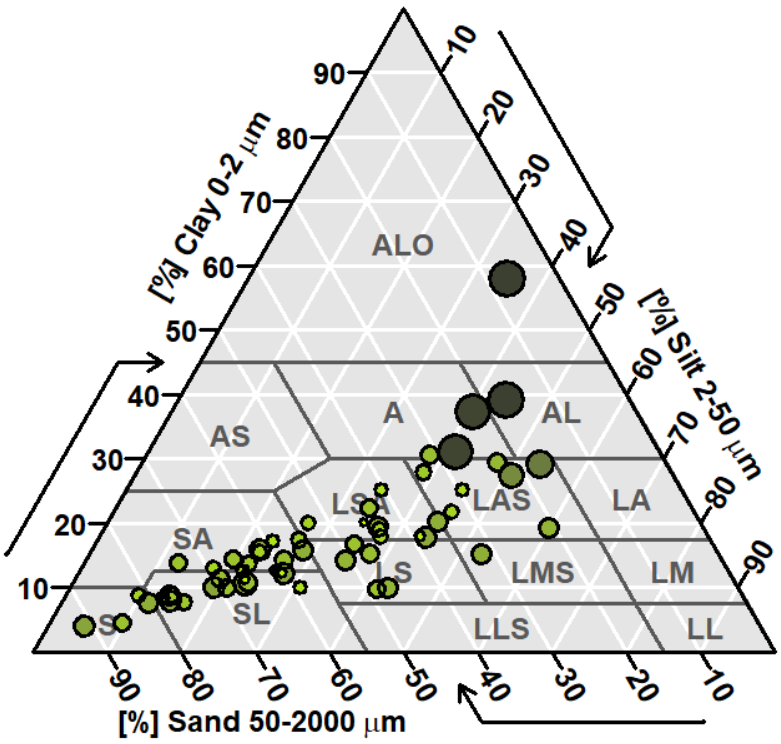


Figure 33 Triangles de texture et pH du sol

Chaque point représente une prairie, la taille des points est corrélée au pH de l'horizon superficiel (0-10 cm). Graphique réalisé grâce au package soiltexture (Moeys, 2018; R Core Team, 2019)

En m'appuyant sur les critères du milieu et des pratiques, j'ai aussi pu regrouper les prairies en six classes.

Deux classes de faible altitude se différencient principalement par les textures et pratiques. Il s'agit des prairies de fauche sur sol argileux ou limoneux, et de prairies pâturées ou mixtes (fauchées et pâturées dans la même année) sur sol sableux (Figure 34). Les premières sont des prairies des franges du PNR des Vosges du Nord, caractéristiques par leur sous-sol calcaire produisant des sols marneux, tandis que les secondes sont des prairies du cœur du PNR des Vosges du Nord ou des Vosges centrales à sol sableux et sous-sol gréseux (Ferrez et al., 2017). Ces classes sont causées par l'échantillonnage des prairies pendant ma thèse, car des prairies pâturées ou mixtes ont déjà été observée sur sol marneux (Bayeur et al., 2013).

Figure 34 Sol de transition des Vosges du Nord, composé de sable (rose) en surface et argile (gris) en profondeur

Les classes 4 et 5 sont à des altitudes moyennes similaires (650 m), et se différencient par la texture et les pratiques (la classe 4 est plus sableuse et plus pâturée). Il s'agit de prairies des moyennes vallées des Vosges centrales (à la transition entre les sous-sols de grès et de granite) et les hautes Vosges (sur granite). La classe 3 représente une transition entre les classes de faibles altitudes et les classes d'altitude moyennes, et est composée de prairies principalement fauchées. Bien que l'analyse des corrélations montre peu de lien entre altitude, texture et pratiques, l'observation des classes semble montrer que jusqu'à 650 m les prairies sableuses sont plutôt pâturées. Cette observation peut s'expliquer par l'utilisation plus précoce des prairies pâturées, visible dans l'analyse des corrélations, et donc un besoin de prairies portantes tôt dans la saison. Or, les prairies sableuses ressuient plus rapidement, et permettent donc une utilisation plus précoce.

Enfin, les classes 6 et 7 regroupent des prairies d'altitude (1100 m) et se différencient principalement par leurs pratiques : la classe 7 est plus pâturée et moins fertilisée. Ces différences peuvent être observées en comparant les moyennes, mais elles ne sont pas significatives car la classification a regroupé des prairies fauchées et pâturées se différenciant par le paysage, la réserve utile, et les teneurs en fer et sodium du sol (Annexe 8). Malgré ces

faibles différences, les pâtures et les fauches d'altitude ont des composition botaniques différentes, apportant différentes propriétés agroécologiques (Collectif, 2006).

2. Une étude qui ne se limite pas au massif vosgien

On peut tout d'abord se demander si les prairies ont des compositions botaniques représentatives. Les prairies suivies pendant cette thèse hébergent en moyenne 30 espèces, chiffre proche de celui observé dans les prairies permanentes du Massif Central et du Jura qui hébergent en moyenne 31 espèces (Hulin et al., 2011; Petit et al., 2005). Les chiffres sont donc semblables entre ces massifs de moyenne montagne, bien que le climat et la géologie diffèrent : le climat du Massif Central est sous une influence méditerranéenne plus forte, et le massif du Jura à un sous-sol plus calcaire. La comparaison des richesses spécifiques entre les prairies de cette thèse et les prairies déjà suivies sur le massif vosgien ne montre pas non plus de différences fortes (Figure 15 D). La différence de richesse entre les précédentes typologies agronomiques et cette thèse s'explique principalement par la surface d'échantillonnage, strictement limitée à la communauté végétale dans cette thèse mais plus élargie dans les précédentes typologies agronomiques afin d'être plus représentatif de la prairie. Bien qu'étant dans la moyenne, ce petit échantillon de 60 prairies n'est pas totalement représentatif des 800 prairies déjà étudiées (Figure 15 A, B et C), les prairies pauvres en nutriments et très basiques en particulier ne sont pas représentées ici. L'échantillon de prairies étudié pendant cette thèse est représentatif des prairies des exploitations agricoles du massif vosgien, j'ai pour cela fait le choix d'éviter les types de prairies trop rares ou ayant un fort rôle de conservation de la biodiversité face à un très faible rôle agronomique. Enfin, il est intéressant de noter que les prairies ayant les plus faibles richesses spécifiques (moins de 20 espèces) ne sont pas des prairies fortement fertilisées mais des pâtures d'altitude, avec une forte proportion de *Festuca rubra* (fétuque rouge). L'opposition entre *Festuca rubra* et diversité est visible dans le Chapitre 1 Partie B, où j'ai identifié une opposition entre son abondance et la valeur de l'indice de Shannon dans la prairie, et dans de précédentes études (Gaisler et al., 2013).

Figure 35 Exemple de prairie peu diversifiée et dominée par la fétuque rouge

Enfin, il est intéressant de se poser la question de la généralisation de ces résultats au-delà du massif vosgien. Pour cela, il est nécessaire de comparer les gradients étudiés à ceux présents à l'échelle de la France métropolitaine (Tableau 21). On peut voir que les pratiques agricoles sont moins intensives sur le massif vosgien qu'à l'échelle de la France : plus faibles fertilisations et chargements, date de 1er utilisation moins précoces et moins d'utilisation de la prairie, conformément aux observations de Taugourdeau (2014). Cependant, les contraintes environnementales semblent importantes à l'échelle du massif. En particulier, les gradients d'acidité et de fertilité du sol sont plus important à l'échelle du massif que lors de l'étude nationale des prairies permanentes. Il serait donc nécessaire de chercher des prairies gérées de manière très intensive sur le massif vosgien afin de pouvoir mieux généraliser les résultats, mais les influences continentales du climat et l'altitude ne permettent probablement pas des pratiques aussi intensives que dans d'autres régions de France.

Tableau 21 Comparaison de gradients observés lors de cette thèse et lors de la réalisation de la typologie nationale des prairies permanentes (d'après Michaud et al. 2012b)

Les indices d'Ellenberg ont été calculés sur la présence des espèces.

	Massif vosgien	**Typologie nationale**
Fertilisation azotée (kg/ha)	0 - 259	0 - 500
Chargement (j.UGB/ha)	0 - 855	0 - 1728
Date 1er utilisation (nb jour)	101 - 216	45 - 217
Nombre d'utilisation /an	1 - 5	1 - 11
Précipitations (mm/an)	791 - 2530	650 - 1890
Humidité du sol (Ellenberg)	4,39 – 7,00	4,67 - 8,08
Acidité du sol (Ellenberg)	3,21 – 6,80	4,38 - 7,33
Fertilité du sol (Ellenberg)	3,07 – 6,31	3,96 - 7,10

3. La végétation : difficilement prédictible, mais bon prédicteur

La prédiction des communautés prairiales reste difficile, malgré l'utilisation de nombreux critères du milieu et des pratiques. Cependant, certaines espèces, les types prairiaux et les indices d'Ellenberg sont régulièrement utilisés pour la prédiction des propriétés agroécologiques et des classes de compromis entre propriétés.

3.1. Comparaison des prédicteurs

Mes résultats montrent que les critères prédictifs de la végétation et des propriétés peuvent être simplifiés en un effet altitude (climat, teneur en éléments organiques du sol), un effet texture (texture, CEC, pH, teneur en CaO et MgO) et un effet pratiques (date d'utilisation, mode d'utilisation, chargement, fertilité). La prédiction des présences et abondances d'espèces nécessite ces trois effets, mais les propriétés n'ont besoin que d'un, deux ou trois effets pour être prédites au mieux.

De nombreuses études ont déjà montré des liens entre le climat ou l'altitude et la présence ou l'abondance d'espèces (ex : Critchley et al., 2002; de Almeida Campos Cordeiro and Neri, 2019; Stampfli and Zeiter, 2004; Wang et al., 2007). Cependant, si certaines espèces sont bien influencées par l'effet altitude (ex : *Festuca rubra*, *Bromus erectus*), d'autres espèces comme

Lolium perenne et *Holcus lanatus* suivent un effet pratiques : elles sont donc présentes à chaque altitude mais ont une affinité pour les gestions intensives (Ellenberg et al., 1992). En modifiant la végétation, le climat affecte la richesse spécifique et l'indice de Shannon : ces propriétés sont toutes deux corrélées aux précipitations (Serafini et al., 2019; Wang et al., 2019). Cependant, mes résultats montrent un faible pouvoir prédicteur du climat vis-à-vis des propriétés écologiques : seule l'évapotranspiration apparait lorsque l'indice de Shannon est prédit sans critères de la végétation. On peut ainsi en déduire qu'il existe un roulement entre espèces selon les conditions climatiques et altitudes maintenant une diversité constante, ou que l'effet altitude est dissimulé dans les abondances des espèces sélectionnées comme bons prédicteurs. En effet, *Festuca rubra* et *Galium saxatile* sont de bons prédicteurs de l'indice de Shannon et traduisent aussi l'effet altitude. Enfin, le stock de carbone est fortement influencé par l'effet altitude, conformément aux précédentes études (Post and Kwon, 2000). L'absence de lien entre l'altitude ou le climat et les rendements peut être surprenante, car les rendements diminuent lorsque l'altitude augmente (Huguenin-Elie et al., 2017) et lors de sécheresses (Alon and Sternberg, 2019; Deléglise et al., 2015). Mes résultats peuvent s'expliquer par l'utilisation de données climatiques annuelles et mensuelles moyennes, sur 10 ans, ne permettant pas de prendre en compte la variabilité annuelle. De plus, j'ai estimé les rendements à 1100 °C.j cumulés depuis le 1er février, et non le cumul de matière sèche produite pendant une saison complète, qui ne permet pas de prendre en compte la plus courte période de croissance en altitude. Enfin, les données climatiques sélectionnées comme bons critères prédictifs sont systématiques des moyennes mensuelles et non les moyennes annuelles, bien que ces valeurs soient corrélées. Les mois sélectionnés correspondent à la reprise de la croissance (février, mars), au stress hydrique et thermique (juin, juillet) et à la fin de la croissance (novembre), qui semblent donc être des périodes clés dans la détermination des compositions botaniques et des propriétés agroécologiques.

La forte corrélation entre texture, CEC, C/N, pH des sols est bien connue (Blaize, 2018). L'effet texture sélectionne des communautés végétales, en particulier car les sols sableux ont une faible CEC et sont plus secs et moins fertiles. Les sols basiques sont associés à *Primula veris* et *Bromus erectus*, et à l'inverse ne sont pas occupés par *Vaccinium myrtillus*, espèces déjà reconnues indicatrices de l'état calcique (Ellenberg et al., 1992). L'effet texture affecte en particulier la valeur pastorale et l'indice de Shannon, ce qui se confirme par la corrélation positive entre ces deux propriétés (Figure 21). Les prairies acides sont reconnues pour leurs plus faibles rendements (Li et al., 2003; Olsson et al., 2009), mais elles sont aussi moins diversifiées que les prairies neutres et basiques (Gaujour et al., 2012), elles semblent donc défavorables aux propriétés agroécologiques. La richesse en espèces oligotrophiles n'est pas liée à l'acidité des sols, il est donc possible d'observer des espèces patrimoniales dans tous les pH de sol et donc dans toutes conditions de textures. Cependant, certaines espèces oligotrophiles ne sont inféodées qu'aux sols acides : le chaulage qui est favorable au rendement, à la valeur pastorale et sans conséquence sur la richesse spécifique en général, n'est pourtant pas sans conséquences néfastes pour certaines espèces. C'est pourquoi s'intéresser à la richesse sans prendre en compte les espèces patrimoniales et/ou menacées est parfois trop limitant pour la conservation de la biodiversité.

L'effet pratiques, en particulier le mode d'utilisation et l'intensité de la gestion, sélectionne fortement les compositions botaniques (Gaujour et al., 2012; Lanta et al., 2009). Cependant, l'analyse de redondance (RDA) n'a montré qu'une faible prédictibilité des compositions botaniques par les pratiques. Ce résultat, dû aux colinéarités entre critères des pratiques et ceux

du milieu, peut aussi expliquer la faible importance des pratiques dans la prédiction des propriétés. Mes résultats montrent que les utilisations précoces permettent de bonnes teneurs en protéine et énergie du fourrage, ce qui est principalement dû à la l'augmentation de la teneur en paroi au cours de la saison (Farruggia et al., 2008; Grace et al., 2016). La date d'utilisation est corrélée à l'utilisation de la prairie par pâturage, cependant les animaux ont tendance à consommer de préférence les espèces les plus digestibles et les plus nutritives (Baumont, 1996; Pontes et al., 2010) laissant les espèces peu nutritives se développer, il semble donc peu probable que le pâturage lui-même ai un rôle positif sur la qualité nutritive. La date d'utilisation est aussi un bon prédicteur de la valeur nectarifère, pouvant indiquer la forte proportion d'espèces sans nectar dans les prairies utilisées précocement, pâturées et fertilisées. L'effet du pâturage lui-même n'est pas un bon indicateur de la valeur pour les pollinisateurs, mais l'intensité de la perturbation affecte fortement la végétation des prairies: une utilisation trop ou pas assez intensive induit une diminution de l'abondance et de la richesse en espèces à fleurs (Lázaro et al., 2016). En effet, les prairies du massif vosgien ayant les plus faibles valeurs nectarifères peuvent être des pâtures ou des fauches, mais leur gestion doit être soit très intensive soit très extensive (ex : pâture intensive, chaumes pâturées, fauches sur sol sableux, …).

3.2. Malgré le nombre élevé de critères, la végétation reste difficile à prédire

La prédiction des communautés s'est révélée difficile : j'ai pu prédire 25,6% de la variance des présences et 31,0% de la variance des abondances floristiques. Ces qualités de prédiction sont assez faibles, mais similaires aux précédentes études : Klimek et al (2007) ont réussi à prédire 24% de la variabilité des abondances dans des prairies permanentes allemandes. Michaud et al (2012b) ont obtenu des prédictions de meilleure qualité (51% des présences, 31% des abondance), mais ils ont regroupé les prairies en types avant de les prédire par des critères du milieu et des pratiques : le gain de prédiction peut alors être compensé par des groupes représentant des moyennes et non des compositions botaniques réelles. Enfin, en s'intéressant plus particulièrement à l'étude des micro-variations environnementales au sein d'une prairie, 18% de la variance des compositions floristiques a pu être expliquée (Horn et al., 2015).

Afin de pallier à ces difficultés de prédiction, de nombreuses études ne s'intéressent pas à la composition directement, mais utilisent des proxys comme la richesse spécifique ou l'état de conservation de la prairie (ex : Critchley et al., 2007; Jacquemyn et al., 2003; van Dobben et al., 2017). Enfin, d'autres études réduisent les gradients pouvant impacter la composition floristique afin de pouvoir limiter l'impact du climat (van Dobben et al., 2019) ou de se concentrer sur l'effet des pratiques agricoles uniquement (Boob et al., 2019).

Une hypothèse aux faibles liens observés entre les critères et la composition floristique pourrait être que les critères sélectionnés ne sont pas les plus pertinents. Les critères utilisés dans l'étude de Michaud et al. (2012b) et cette thèse sont parfois redondants, parfois uniques, cependant les résultats sont similaires et se confirment : le sol et le climat sont plus importants que les pratiques agricoles pour la prédiction des compositions floristiques. Cependant, dans ces deux études de nombreux critères du sol et du climat montre des corrélations avec les pratiques agricoles : les pratiques agricoles sont probablement plus intensifiées dans l'ouest de la France, où la pluviométrie est plus importante et les hivers doux.

La liste des critères édaphiques étudiés dans cette thèse est supérieure à celles d'autres études. Par exemple, Dubuis et al. (2013) se sont limités à la teneur en azote et en phosphore, au ratio C/N, au pH et à la texture, et ont montré que le pH était le critère le plus important pour la prédiction des présences floristiques, résultat concordant avec ceux de cette thèse. Dubuis et al. (2013) ont aussi utilisé des critères liés au milieu, tels que les températures, humidités du sol, radiations solaires, ou encore la pente et l'altitude. Ils ont aussi obtenu ces critères du milieu grâce à des modélisations, mais elles sont beaucoup plus fines que celles utilisées ici : leur résolution est de 25 m contre 1 km dans cette thèse. Malgré cette précision accrue, les critères édaphiques se sont révélés nécessaires pour maximiser la qualité des prédictions de végétations.

Concernant les critères agricoles, j'ai utilisé les critères reconnus comme les plus impactant, c'est-à-dire ceux liés à l'intensification des pratiques (date de première utilisation, fertilisation, chargement en j.UGB.ha^{-1}…) et ceux permettant de discriminer les utilisations (nature de la première utilisation et de l'utilisation sur l'année, ratio fauche/pâturage, …) (Diaz et al., 2001; Jacquemyn et al., 2003; Melts et al., 2018). Les résultats des RDA réalisées dans cette thèse confirment l'importance de la nature de la première utilisation (fauche ou pâturage) et de la date de cette première utilisation. Cependant, la fertilisation en azote organique n'est utile que pour la prédiction des abondances, et bien que l'impact de la fertilisation minérale soit généralement plus important sur la végétation (Jones and Haggar, 1997) elle n'est pas un bon prédicteur des compositions botaniques. Seules 4 prairies sur les 58 étudiées reçoivent une fertilisation minérale, ce qui est probablement trop peu pour apparaitre dans les résultats statistiques.

Le faible pouvoir prédictif des pratiques agricoles peut être dû à la non prise en compte de critères pourtant mis en avant par de précédentes études. Tóth et al. (2018) ont par exemple montré que l'espèce animale qui pâture a plus d'impact sur la composition botanique que l'intensité de pâturage. Cependant, cette étude rassemble uniquement des prairies pâturées dans des conditions pédoclimatiques similaires. De même, Pauler et al. (2019) ont montré l'importance de connaitre la race au pâturage, en comparant la composition des prairies pâturées par des Highland Cattles ou des races plus orientées pour la production de viande (Limousine, Angus, Charolaise ou encore croisement entre Braunvieh et Simmental). Cette étude comporte de nombreux gradients environnementaux et peut être comparable à cette thèse car elle suit un axe nord-sud s'étendant de Heidelberg (Allemagne) aux Alpes suisses. Mais ces deux études ne se sont concentrées que sur des prairies pâturées, il est donc possible que l'impact de l'espèce et surtout de la race soit négligeable par rapport à l'impact des modes d'utilisations.

3.3. La biodiversité : à la fois critère et propriété ?

Dans cette thèse, j'ai utilisé la végétation à la fois comme une donnée à prédire (Chapitre 1 Partie A), comme un critère et comme une propriété (Chapitre 1 Partie B). La diversité est de plus en plus considérée comme un état de l'écosystème, et non comme un service rendu par l'écosystème (Commissariat général au développement durable, 2016), mais elle peut être utilisée comme un prédicteur (Slade et al., 2019), comme une propriété (Le Clec'h et al., 2019), ou comme prédicteur et propriété (Mace et al., 2012).

Bien que la prédiction des communautés soit difficile, de nombreuses espèces, types de végétation et indices d'Ellenberg se sont révélés nécessaires à la prédiction des propriétés agroécologiques. Il n'est pas surprenant de voir que des espèces indicatrices de fertilisation (fertilité élevée : *Anthriscus sylvestris*, *Poa trivialis*, *Lolium perenne* ; fertilité faible : *Potentilla*

erecta, *Festuca rubra*, *Hypochaeris radicata*, *Stachys officinalis*, *Hieracium pilosella* (Ellenberg et al., 1992)) ainsi que l'indice d'Ellenberg pour la fertilité à l'échelle de la communauté aient été sélectionnés pour la prédiction de propriétés fortement liées à la fertilité des milieux comme le rendement, la valeur pastorale, l'indice de Shannon, la richesse en oligotrophiles et la valeur nectarifère (Garnier et al., 2018; Potts et al., 2009; Serafini et al., 2019). Ces espèces et indices sont donc de meilleurs prédicteurs que les critères du milieux et des pratiques auxquels elles sont liées, ce qui a déjà été observé pour la prédiction du rendement (Kahmen et al., 2005; Wagner et al., 2007). L'avantage de ces espèces est probablement qu'elles peuvent traduire plusieurs effets simultanément (altitude, texture et/ou pratiques). Une espèce peut donc remplacer plusieurs critères du milieu et des pratiques : *Anthriscus sylvestris* par exemple indique à la fois des sols fertiles et une utilisation par la fauche. Lors de la sélection des meilleurs critères par l'analyse statistique, l'objectif était de réduire au maximum le nombre de critères tout en maximisant la qualité de la prédiction : il est donc préférable de choisir une seule espèce que plusieurs critères du milieu et des pratiques.

Le rôle des espèces sélectionnées comme bons critères prédictifs se limite parfois uniquement à une corrélation avec le milieu ou les pratiques. *Anthriscus sylvestris* par exemple est une grande Apiacée qui participe à des rendements élevés, et *Lolium perenne* avec sa bonne valeur nutritive participe directement à la valeur pastorale. L'abondance de *Ranunculus acris* est indicatrice de fortes teneurs en protéines et en énergie métabolisable (PDIN et UFL) : soit elle a elle-même une forte teneur en protéine et en énergie, soit elle est accompagnée d'espèces à forte valeur nutritive. La seconde option semble plus probable, car *Ranunculus acris* est fortement présente dans les prairies pâturées précocement, et donc à bonne valeur alimentaire (Farruggia et al., 2008) : elle n'a donc pas de rôle directe dans la qualité du fourrage. Enfin, cette espèce est toxique fraiche et pas ou peu consommée par le bétail (Bourdôt et al., 2003), la teneur en protéine et énergie du fourrage réellement consommé par le bétail est donc probablement plus élevée que dans le mix d'espèce contenant *Ranunculus acris*.

L'utilisation des traits fonctionnels permet d'améliorer la prédiction de services écosystémiques (Carol Adair et al., 2018; Lavorel, 2013) et la réponse des communautés végétales aux changements environnementaux (Lavorel and Garnier, 2002; Nock et al., 2016). Je n'ai pas pu mesurer de traits fonctionnels pendant cette thèse, mais j'ai utilisé une typologie fonctionnelle des principales graminées fourragères (Cruz et al., 2010). Les traits fonctionnels sont de bons prédicteurs des rendements et valeurs nutritives (Andueza et al., 2010), mais ces liens n'apparaissent pas dans mes résultats : rendement et valeur pastorale sont donc mieux prédits par les espèces que part des traits, et les teneurs en protéines et énergie sont mieux prédites par les pratiques. Ce résultat peut s'expliquer par un effet moindre des traits fonctionnels sur ces propriétés, ou par l'utilisation d'une typologie. En effet, la typologie regroupe les traits fonctionnels au sein de types plutôt que d'utiliser un gradient continu comme dans la majorité des études, grâce à la moyenne pondérée à l'échelle de la communauté (*Community Weighted Mean*, CWM). L'utilisation de la typologie élimine toute variation intra-spécifique, alors que certaines espèces comme *Festuca rubra* sont observables dans de nombreuses conditions environnementales pouvant modifier certains traits (Volf et al., 2016; Wellstein et al., 2013), ce qui peut effacer plus de 44 % de la variabilité d'une communauté à l'autre (Jung et al., 2010).

Trois typologies ont été utilisées comme critères prédictifs : une typologie agronomique, une fonctionnelle et une phytosociologique. Ces typologies permettent la bonne prédiction (plus de 50 % de la variance prédite) de l'indice de Shannon, de la souplesse d'exploitation, et du stock

de carbone. L'indice de Shannon et la souplesse d'exploitation sont aussi fortement prédictible par d'autres graminées participant à la typologie fonctionnelle, il parait donc assez évident que la typologie en soit un bon prédicteur. Cependant, cette typologie a été développée pour prédire les valeurs fourragères mais elle n'apparait pas dans les meilleurs prédicteurs des valeurs pastorales, teneurs en protéines et en énergie. La typologie agronomique est construite grâce aux abondances des espèces, notion indispensable au calcul de l'indice de Shannon, ce qui peut expliquer l'importance de cette typologie pour ce critère. Enfin, la typologie phytosociologique permet la bonne prédiction du stock de carbone, ce qui peut s'expliquer par bonne prédiction des abondances de formes de vies par la phytosociologie (Chapitre 2), qui sont elles-mêmes de bons prédicteurs du stock de carbone (Chen et al., 2017). Les typologies permettent donc de bonnes prédictions de certaines propriétés lorsqu'elles sont associées à d'autres critères du milieu et des pratiques.

La prédiction de l'indice de Shannon sans critère de la végétation a montré une faible diminution de la précision (perte d'environ 6 % de la variance expliquée) montrant un fort lien entre ce critère et le milieu, en particulier l'effet altitude. A l'inverse, la prédiction de la richesse en oligotrophiles sans critère de la végétation induit une forte perte d'environ 40 % de la variance expliquée, montrant que cette richesse est bien plus liée à la végétation elle-même qu'aux effets de l'altitude et des pratiques. Il est surprenant que la richesse en oligotrophiles ne soit pas correctement prédite par des critères directement liées à la fertilisation ou la capacité des sols à restituer les nutriments, car ces espèces sont par définition sensibles à ces critères et des liens prédictifs ont déjà pu être établis (Garnier et al., 2018).

3.4. De nouvelles propriétés difficiles à prédire

Dans cette étude, j'ai essayé de prédire des propriétés encore méconnues, qui peuvent être liées à la qualité fourragère et aux propriétés écologiques.

La teneur en antioxydants peut être associée à la valeur fourragère : elle permet d'améliorer la santé du troupeau et la qualité des produits (Castillo et al., 2013; Nabavi et al., 2015). Sa prédiction est de faible qualité (12,05 % de la variance expliquée) et les critères prédictifs sélectionnés diffèrent des précédentes études. La teneur en antioxydants a été fortement liée à la composition botanique des prairies permanentes (Poutaraud et al., 2017; Reynaud et al., 2010), et mes résultats montrent un lien avec *Trifolium pratense*. Cette espèce est aussi un bon prédicteur de l'indice de Shannon et de la valeur pastorale, mais les liens entre ces trois propriétés sont faibles (Chapitre 3). D'après mes résultats, la teneur en antioxydants est principalement prédictible grâce à la texture, et est favorisée par les textures intermédiaires ni trop fines (argiles) si trop grossières (sables). Les liens entre textures, altitude et pratiques sont faibles, mais la texture impacte la végétation, ce qui tend donc à confirmer des liens existants entre végétation et teneur en antioxydants, mais ces liens sont trop faibles pour permettre une bonne prédiction. D'autres critères mis en avant par la bibliographie comme les liens entre biomasse de la végétation et teneurs en antioxydants pourraient être étudiés plus précisément, mais le protocole utilisé dans cette thèse ne le permet pas (Stumpf et al., 2019).

La qualité fourragère ne se limite pas forcément à la valeur alimentaire, mais peut aussi prendre en compte la souplesse d'exploitation (vitesse de perte en qualité du fourrage) ou la précocité de la végétation. J'ai calculé ces deux propriétés en m'appuyant sur les équations de Theau et al. (2017), s'appuyant elles-mêmes sur les types de dicotylédones qu'ils ont créés et sur les

types de graminées créés par Cruz et al. (2010). Il est donc cohérent que la typologie fonctionnelle des graminées soit parmi les meilleurs prédicteurs de ces deux propriétés. Pourtant, ces deux propriétés nécessitent des informations sur l'effet texture pour être prédite au mieux, mettant en avant les liens entre texture et composition botanique (Chapitre 1 Partie A). Ces deux propriétés sont favorisées par les textures argileuses, principalement observées sur les franges du massif des Vosges du Nord. Il est surprenant que l'effet pratiques agricoles et l'effet altitude ne soient pas de bons prédicteurs, car une utilisation précoce ou un climat d'altitude favorisent les espèces précoces (Heide, 1994; Plantureux et al., 2005) qui ont généralement une faible souplesse d'exploitation (Theau et al., 2017). Bien qu'elles soient proches dans leurs méthodes de calcul, souplesse et précocité ont des qualités de prédiction très différentes (respectivement 73 % et 28 % de la variance expliquée), ce qui met en avant la variabilité dans les capacités des critères du milieu et des pratiques à prédire les abondances des différents types fonctionnels. Les abondances des espèces précoces (*Lolium perenne*, *Holcus lanatus*) sont prédites par les pratiques agricoles (Figure 18), or ces dernières sont d'une importance moindre dans la prédiction de la composition botanique, on peut donc s'attendre à une mauvaise qualité de la prédiction. A l'inverse, les espèces souples (*Festuca rubra*) sont prédites par le milieu, critère majeur de la prédiction des compositions botaniques.

J'ai calculé la valeur nectarifère des prairies grâce à la production nectarifère des espèces et leur abondance dans la communauté. Il est donc surprenant de ne pas voir apparaitre d'espèces indicatrices, et que la typologie fonctionnelle soit parmi les principaux critères prédictifs alors qu'elle est uniquement basée sur les graminées. A l'inverse, aucune espèce de graminées n'est un bon prédicteur, alors que leur forte abondance pourrait indiquer une faible valeur nectarifère (Wesche et al., 2012). La date d'utilisation traduit un effet de l'intensité des pratiques et du mode d'utilisation, impactant tous deux l'intérêt des prairies pour les pollinisateurs en modifiant la composition botanique (Ceulemans et al., 2011; Lázaro et al., 2016). Marini et al. (2012) concluent qu'il y a généralement moins de pollinisateurs en altitude qu'en plaine, ce qui n'apparait pas dans mes résultats et indique donc que l'effet des pratiques est supérieur à celui du milieu. Taugourdeau (2014) a aussi tenté de prédire la valeur nectarifère des prairies permanentes en utilisant une forêt aléatoire comme analyse statistique, mais il n'a pas pu expliquer cette variable (0 % de la variance expliquée). Son analyse a aussi mise en avant des critères liés aux pratiques agricoles (taux de valorisation de l'herbe et nombre d'utilisations) confirmant mes résultats, ainsi qu'un effet du climat (pluviométrie, température, altitude), et du rendement estimé qui n'était pas parmi les critères prédictifs de mon analyse.

Enfin, la prédiction du stock de carbone est un enjeu fort au niveau global, mais il est aujourd'hui encore difficile de comprendre l'impact des interactions entre pratiques, milieux et végétation (Dignac et al., 2017). Ici, la variance du stock de carbone est très bien prédite (99,08 %), uniquement par la teneur en matière organique du sol. Ce résultat peut s'expliquer par la méthode de calcul : l'estimation du stock de carbone nécessite de connaitre la densité apparente, que j'ai calculé par la formule de Post and Kwon (2000), basée sur la teneur en matière organique. De plus, il existe une forte corrélation entre teneurs en matière organique du sol et en carbone : le rapport de ces deux éléments serait égal à 1,724 (Blaize, 2018). Afin d'éviter ce fort biais, j'ai aussi prédit le stock de carbone sans critère lié à la matière organique. J'ai ainsi pu mettre en avant l'importance de l'effet altitude : température et humidité impactent la production primaire (permettant de stocker du carbone) et la respiration (qui relâche du carbone) (Black et al., 2000; Ciais et al., 2005; Post and Kwon, 2000). De même, j'ai montré un effet de la composition botanique via les types phytosociologiques, potentiellement dû à leur

bonne capacité à prédire les formes de vie (Chapitre 2), elles-mêmes impactant les stocks de carbone (De Deyn et al., 2008). Enfin, la CEC ici n'indique peut-être pas un effet de la texture, mais directement celui de la teneur en matière organique : ces dernières ont une CEC souvent bien supérieure à celle des éléments minéraux (Blaize, 2018). Une CEC élevée peut donc indiquer une forte teneur en matière organique. Enfin, mes résultats ne mettent pas en avant l'impact des pratiques agricoles, alors que le mode d'utilisation et le chargement en particulier ont montré de forts liens avec le stock de carbone dans de précédentes études (Rossignol et al., 2011; Wang et al., 2011).

3.5. Bilan

Le premier objectif de ce chapitre était d'identifier les critères édaphiques, environnementaux et agricoles permettant de prédire la végétation. Les analyses montrent que la prédiction de la végétation est difficile malgré l'utilisation de méthodes statistiques différentes.

La difficulté à prédire efficacement la végétation peut être due à des gradients d'intensification des pratiques pas assez importants. Cependant, les qualités de prédiction obtenues dans cette thèse, les critères utilisés et les résultats que l'on peut en tirer sont cohérents avec la littérature scientifique existante, bien que des précisions sur le paysage, le climat ou encore l'historique des pratiques pourrait permettre d'affiner les résultats. Même si la prédiction des compositions botaniques reste difficile, la présence et l'abondance de certaines espèces est bien prédictible, ce qui fait de ces espèces de bons indicateurs des conditions de milieu et de pratiques.

Le second objectif était l'identification des meilleurs critères du milieu, des pratiques et de la végétation pour prédire les propriétés agroécologiques des prairies. Les analyses montrent des qualités de prédiction très différentes entre les propriétés.

J'ai pu prédire correctement des propriétés liées à la quantité et à la qualité du fourrage, à la biodiversité et le stock de carbone. La majorité des critères prédictifs est liée à la végétation et au sol, mais de nombreux critères expriment indirectement les effets de l'altitude, de la texture et des pratiques agricoles. Parmi les critères de la végétation, les typologies agronomique et fonctionnelle participent à la bonne prédiction de propriétés : il semble donc possible d'utiliser des associations comme indicateurs des propriétés prairiales, même si ici elles sont systématiquement associées à d'autre critères pour optimiser la prédiction.

4. Utilisation des typologies seules pour prédire les propriétés agroécologiques

Les propriétés des prairies permanentes peuvent être estimées par des critères liés aux pratiques, au milieu et la végétation, ou grâce aux typologies. Les typologies sont régulièrement utilisées pour prédire les propriétés agronomiques et écologiques, mais plusieurs méthodes ont été développées, résultant en des typologies qui diffèrent dans leur mode de classification de la végétation.

4.1. Qualité des prédictions

Pour sept propriétés prairiales, la qualité des meilleurs modèles prédictifs était jugée mauvaise (richesse spécifique, indice de Shannon, indice de Simpson, richesse en familles, valeur

pollinisateur, richesse des indices de profondeur racinaire et moyenne pondérée des indices de profondeur racinaire). Cinq de ces propriétés sont basées sur des richesses taxonomiques ou fonctionnelles, ou des indices écologiques. Il était prévisible que ces cinq propriétés soient mal prédites par les typologies agronomiques et fonctionnelles, car elles n'ont pas été développées avec ces objectifs, et parce que ces typologies s'appuient sur les abondances plus que sur les présences d'espèces. Cependant, la richesse spécifique, l'indice de Shannon, l'indice de Simpson et la moyenne pondérée des indices de profondeur racinaire sont prédits au mieux par des modèles s'appuyant au moins en parti sur la typologie phytosociologique. La faible qualité de ces modèles révèle un manque de correspondances entre les types phytosociologiques et les propriétés écologiques, ce qui est surprenant car la phytosociologie est souvent utilisée à ces fins. Les prairies d'un même type phytosociologique partagent des espèces en commun, « la combinaison caractéristique », mais elles sont aussi accompagnées d'un cortège d'autres espèces qui peuvent faire varier la richesse au sein d'un même type. De plus, Chytrý (2001) a montré que les botanistes ont tendance à augmenter la surface d'échantillonnage dans les prairies à faible diversité, ce qui peut biaiser l'attribution des types et les calculs de richesse.

Malgré son utilisation régulière, la richesse spécifique n'est pas une propriété écologique primordiale, car elle peut grandement varier entre des prairies pourtant similaires (Brunbjerg et al., 2018). C'est pourquoi les écologues utilisent de plus en plus des indices écologiques, comme les indices de Shannon et de Simpson (Bello et al., 2010; Mauchamp et al., 2014). Ces indices apportent des informations similaires : l'indice de Shannon informe sur l'équitabilité entre les espèces, et l'indice de Simpson informe à la fois sur l'équitabilité et la richesse spécifique. Il était donc prévisible que ces propriétés soient prédites par des modèles similaires : j'ai montré que ces indices sont prédits au mieux par des modèles s'appuyant sur la phytosociologie, mais je n'ai pas pu identifier de modèle de qualité suffisante. Afin d'améliorer la prédiction des propriétés écologiques il pourrait être intéressant de s'appuyer sur l'intensification des pratiques : Vujnovic et al. (2002) ont montré qu'un niveau intermédiaire de perturbation de la composition botanique par le pâturage, le piétinement ou le retournement du sol permettait un optimum de diversité, tandis que Rodríguez-Rojo et al. (2017) ont observé un plus fort impact de l'intensité des pratiques agricoles sur la diversité, que des modes d'utilisation. Enfin, mesurer la diversité floristique d'une prairie n'est pas forcément un bon indicateur de son intérêt écologique : ces mesures ne prennent pas en compte les proportions d'espèces patrimoniales, rares et/ou menacées qui ne sont pourtant pas corrélées à la richesse d'une prairie (Pykälä et al., 2005). Il est donc nécessaire d'étudier des propriétés liées à ces espèces à fort enjeux écologiques, en s'appuyant par exemple sur les espèces oligotrophiles (Michaud et al., 2012b; Muller, 2002). Dans cette étude, la richesse en espèces oligotrophiles était bien prédite par la combinaison des typologies phytosociologiques et agronomiques.

Parmi les propriétés écologiques, seules la valeur pollinisatrice et la moyenne pondérée des indices de profondeur du système racinaire nécessitent l'abondance relative des espèces dans leurs calculs. Cependant, ces propriétés sont calculées grâce à des traits qui n'ont pas été inclus dans les précédentes typologies (attraction des insectes pollinisateurs par le miel et le nectar, et forme du système racinaire). Des typologies agronomiques ont cependant déjà été utilisées pour estimer les valeurs pollinisateurs des prairies (Bayeur et al., 2013; Hulin et al., 2011; Launay et al., 2011). Les résultats de cette étude confirment que les typologies agronomiques sont les meilleures pour prédire la valeur pour les pollinisateurs, mais la mauvaise qualité de la prédiction (poids = 0,52 ; pseudo-R^2 = 0,20) soulève des questions quant à l'utilisation de cette propriété. Si un nouvel indicateur est calculé, la phytosociologie pourrait tout de même être

utile à la prédiction de la valeur polinisateur car elles sont toutes deux liées à la diversité floristique (Hegland and Totland, 2005; Warzecha et al., 2017). Afin de parfaire la valeur pollinisateur, les dates de floraison et d'utilisation pourraient être utilisées pour calculer une valeur réelle et non une valeur potentielle (Kleijn et al., 2001). Enfin, il n'existe à ma connaissance pas de typologie utilisée pour la prédiction du système racinaire, bien qu'il puisse être lié à la résistance à la sécheresse et à la concurrence entre espèces. Les résultats obtenus sont similaires à ceux observés par Oram et al. (2018), qui montrent que la moyenne des indices racinaires est corrélées aux autres organes de la plante, mais que la richesse des indices racinaires ne l'est pas.

4.2. Les propriétés bien prédites par une seule typologie

Trois propriétés sont correctement prédites par la typologie agronomique, qui est par ailleurs la seule classification pouvant prédire des propriétés avec une bonne qualité : le rendement, l'altitude et le mode d'utilisation (Figure 20).

De manière générale, l'altitude et le mode d'utilisation jouent un rôle majeur sur les compositions floristiques (Rodríguez-Rojo et al., 2017; van Oijen et al., 2018). Le fait que la classification agronomique permette de bien prédire ces propriétés environnementales indique que les associations floristiques construite par ces typologies peuvent être indicatrices de l'altitude et de l'utilisation, tout comme certaines espèces peuvent l'être (Diekmann, 2003).

Le rendement est une propriété cruciale, en particulier pour les éleveurs. Les classifications agronomiques sont principalement développées pour pouvoir prédire cette propriété, je m'attendais donc à ce qu'il y ait une forte relation entre elles. La typologie fonctionnelle a aussi été développée pour prédire le rendement, sur la base de travaux montrant une forte relation entre les traits de réponses aux nutriments et les traits permettant de déterminer le rendement (Lavorel and Garnier, 2002). Les variations de l'expression des traits fonctionnels (entre les individus d'une même espèce) et la cooccurrence des traits (à l'échelle de la communauté) des herbes et dicotylédones doivent être mieux comprises pour améliorer la prédiction par les classifications fonctionnelles (Roscher et al., 2018). Les rendements peuvent aussi être prédits grâce aux indices de fertilité d'Ellenberg (Hill and Carey, 1997), ou sur des modèles plus complexes utilisant les traits fonctionnels, les abondances des formes de vies, ou des typologies phytosociologiques (Magiera et al., 2017; Michaud et al., 2015). Enfin, le rendement peut directement être estimé sur le terrain, ce qui demande plus de temps et d'équipement mais peut-être moins de connaissances informatiques et/ou botaniques (Ni, 2004).

4.3. Une solution : combiner les typologies ?

A ma connaissance, cette étude est la première à comparer trois méthodes de typologies, appliquées aux mêmes relevés floristiques. Carrère et al. (2012) ont développé un outil basé sur des typologies agronomique, phytosociologique et fonctionnelle, mais ils n'ont pas comparé les capacités prédictives de chaque typologie individuelle à la combinaison de deux ou trois typologies. Macedo et al. (2010) ont comparé le pouvoir prédictif de trois classifications, mais ne se sont concentrés que sur les propriétés écologiques de communautés dunaires.

Dans cette étude, sept propriétés sont bien prédites par une combinaison de classification (Figure 20) : trois propriétés écologiques (la richesse en espèces oligotrophiles, la richesse en

familles, l'abondance des formes de vie), deux propriétés agronomiques (valeur pastorale et précocité), et deux propriétés environnementales (humidité et fertilité). Notamment, parmi les quatre modèles ayant une qualité (pseudo-R^2) supérieure à 0,8, trois modèles sont basés sur une combinaison de typologies : l'abondance des formes de vie (0,87), la richesse en espèces oligotrophiles (0,83), et la fertilité (0,8). Ces trois modèles sont par ailleurs partiellement basés sur la typologie phytosociologique, alors que ses capacités prédictives seules sont faibles.

La fertilité et l'humidité sont deux propriétés environnementales bien prédites par des combinaisons de classifications. Humidité et fertilité sont toutes deux liées à l'altitude (de Almeida Campos Cordeiro and Neri, 2019; Pittarello et al., 2018; Sevruk, 1997) mais aussi à la diversité fonctionnelle (Čop et al., 2009; Schellberg, 1999; Suding et al., 2005). Bien que l'indice de fertilité d'Ellenberg ait été utilisé pour calculer la propriété « fertilité » et la « richesse en espèces oligotrophiles », la première est mieux modélisée par la combinaison des trois typologies tandis que la seconde est mieux modélisée par la combinaison des typologies phytosociologique et fonctionnelle. Cette différence peut être due aux méthodes de calculs : la fertilité nécessite de connaitre les abondances, alors que la richesse en oligotrophiles n'a besoin par définition que des richesses. L'indice de fertilité d'Ellenberg, nécessaire à ces deux propriétés, est particulièrement influencé par la fertilisation, mais est aussi fortement dépendant de critères du sol comme la Capacité d'Echange Cationique (CEC) : la fertilité et la richesse en espèces oligotrophiles peuvent donc permettre d'estimer la présence d'espèces à forte valeur patrimoniale, mais ne peuvent pas être utilisées pour estimer l'impact de la fertilisation à plus grande échelle, par exemple sur la ressource en eau.

Lors de leurs créations, les typologies n'ont pas été prévues pour estimer l'abondance des formes de vie. Pourtant, l'abondance des formes de vie est correctement prédite par l'interaction entre les typologies agronomique et phytosociologique (A×P). Ce résultat est particulièrement intéressant, car il montre que les typologies peuvent prédire de nouvelles propriétés, au-delà de leurs capacités actuelles. De plus, le modèle sélectionné pour la prédiction de la richesse en famille est construit sur un modèle similaire : les effets principaux des typologies agronomiques et phytosociologiques (A+P). Ce lien peut être expliqué par les méthodes de calcul de ces deux propriétés : l'abondance des formes de vie se base sur des abondances de familles botaniques (les légumineuses sont des Fabaceae, et les herbes sont des Cyperaceae, Juncaceae, Liliaceae et Poaceae). Ce lien pourrait aussi montrer une corrélation entre richesse et abondance relative des familles.

Les abondances de formes de vies peuvent être influencées par de nombreux critères agronomiques et environnementaux. Les fauches augmentent l'abondance d'herbes et de diverses, tandis que le pâturage sélectionne des rosettes et plantes rampantes (Gaujour et al., 2012; Lanta et al., 2009). Cependant, l'intensification des pratiques fait converger toutes les communautés végétales vers les rosettes et plantes rampantes (Gaujour et al., 2012), et l'espèce affecte aussi les formes de vie (Tóth et al., 2018). Ces précédentes études montrent que la prédiction des abondances des formes de vie pourrait être améliorée par la prise en compte des pratiques agricoles. Cependant, Craine et al. (2001) ont observé des corrélations entre traits foliaires et formes de vie, mais pas entre l'intensification des pratiques et les formes de vie. La prédiction des formes de vie n'a pas seulement un intérêt écologique : les prairies avec une forte diversité de formes de vie ont des rendements supérieurs (Bullock et al., 2006) et peuvent accueillir du bétail plus lourd (Grace et al., 2019b). Enfin les formes de vie ayant une faible

abondance ont un plus fort risque de disparaitre en cas de sécheresse (Tilman and Haddi, 1992), ce qui peut intéresser agronomes et écologues.

La valeur pastorale est de manière surprenante bien prédite par les effets principaux des typologies phytosociologique et fonctionnelle. En effet, le rendement fait partie de la valeur pastorale et est bien prédit par la typologie agronomique, et le calcul de la valeur pastorale requière les abondances de chaque espèce (Daget and Poissonet, 1971), nécessaires à la construction de la typologie agronomique. Les traits fonctionnels (Tasset et al., 2019) et les types phytosociologiques (Petrovic et al., 2013) peuvent être utilisés pour prédire la valeur fourragère des prairies, mais les résultats de la présente étude montre que les combiner améliore encore cette prédiction. La phytosociologie seule pourrait ne pas être suffisamment puissante car des faciès différents peuvent être liés au même type phytosociologique (Bagella and Roggero, 2004). Enfin, la prédiction de la valeur pastorale pourrait être améliorée par la prise en compte des indices d'Ellenberg pour la fertilité, et des critères environnementaux comme l'altitude ou la pente (Bagella and Roggero, 2004; Pittarello et al., 2018).

La précocité de la végétation est une propriété importante pour les agriculteurs, car la qualité du fourrage est liée à la phénologie de la végétation (Pontes et al., 2007a). De plus, liée aux dates de fauche ou de pâturage, la précocité peut aider à l'estimation du service de pollinisation (Kleijn et al., 2001). Le climat est l'un des principaux critères impactant la date de floraison : les températures (Kudernatsch et al., 2008) et dans une moindre mesure les précipitations (Hovenden et al., 2008) créent donc des variabilités interannuelles. Afin de ne pas subir les influences de la météo, j'ai calculé les précocités de chaque prairie en utilisant les degrés-jours cumulés, c'est-à-dire les sommes des températures quotidiennes moyennes depuis le 1er février. Les végétations alpines sont généralement plus précoces en terme de degrés-jour pour commencer leur floraison (Heide, 1994), ce qui pourrait créer un gradient de précocité lié à l'altitude. Les pratiques agricoles modifient la végétation, ce qui créer donc des différences de précocité entre prairies, mais des différences restes perceptibles entre espèces d'une même communauté (Ansquer et al., 2009a). Pour conclure, on peut voir que les trois méthodes de typologies sont essentielles pour prédire la précocité de la végétation : la typologie fonctionnelle est en partie basée sur la précocité de graminées, et la phytosociologie et l'agronomie peuvent apporter des informations à propos des autres espèces.

4.4. Limites de l'étude

Toutes les classifications sont en partie basées sur des choix arbitraires, soit dans le choix des critères de classification (par exemple dans le cas étudié : présence taxonomique, abondance taxonomique ou abondance fonctionnelle), ou sur le nombre de types créés.

La méthode utilisée pour attribuer les types fonctionnels permet une classification rapide et simple des prairies, mais elle peut attribuer des types différents à des prairies pourtant très proches. Cette méthode mène aussi à la création de nombreux types ne rassemblant que peu de prairies : ici, sept types fonctionnels sont composés de moins de cinq prairies. La classification fonctionnelle n'est basée que sur les Poaceae, alors que les autres familles représentent une part non négligeable des communautés prairiales (moyenne ± écart type : 35 ± 14%), ce qui peut amener une perte de précision si les Poaceae répondent plus ou moins vite aux changements de contraintes environnementales que les autres espèces. Il serait donc intéressant de développer une nouvelle typologie, s'appuyant à la fois sur les traits fonctionnels des graminées et ceux

des dicotylédones, comme initiée par Theau et al. (2017). Enfin, cette étude n'est pas exhaustive car d'autres méthodes de classification existent. Je me suis ici concentré sur la phytosociologie telle que décrite par Braun-Blanquet basée principalement sur les présences ou des coefficients d'abondance-dominance. Plus récemment une phytosociologie dite *numérique* s'est développée, regroupant les communautés végétales en fonction de leurs présences ou de leurs abondances grâce à des outils statistiques : les types formés ne sont alors plus issus de la littérature mais ils sont désormais libres de la notion subjective des faciès délimités sur le terrain (Dengler et al. 2008). De même, la phytosociologie synusiale pourrait améliorer la prédiction de propriétés, notamment la qualité fourragère, car elle prend en compte les stades de développement de la végétation (Gillet et al., 1991).

Parmi les 16 propriétés étudiées, cinq ont été calculées grâce aux indices d'Ellenberg. Cependant, ces indices soulèvent aujourd'hui plusieurs critiques : ils ont été estimés plutôt que mesurés, les réponses des espèces botaniques aux contraintes environnementales dépendent de leurs stades phénologiques et des interactions entre contraintes environnementales, et la robustesse des liens entre indices d'Ellenberg et mesures sur le terrain diverge d'une étude à l'autre (Diekmann, 2003; Schaffers and Sýkora, 2000). Malgré tout, l'utilisation des moyennes pondérées à l'échelle des communautés est considérée comme fiable (Diekmann, 2003).

4.5. Bilan

Le chapitre 1 a permis de sélectionner les meilleurs critères parmi une longue liste de plus de 600. Les typologies n'apparaissent que pour 4 propriétés sur 14, amenant à la conclusion qu'elles ne permettent pas de maximiser la qualité des prédictions par rapport à d'autres critères, à l'inverse de l'utilisation à la fois des pratiques, du milieu et de la végétation. Le chapitre 2 montre qu'il est possible de prédire correctement une partie des propriétés uniquement grâce aux typologies, en combinant les méthodes de typologies. Bien que la précision soit alors théoriquement plus faible, les typologies permettent de prédire les propriétés uniquement par des critères de la végétation, plus simples à obtenir que les critères du sol et du climat. Les typologies sont plus faciles à utiliser que des modèles statistiques, mais je n'ai pas pu identifier une seule typologie ni combinaison de typologie permettant la bonne prédiction de toutes les propriétés agroécologiques : il est nécessaire de faire un choix dans la méthodologie de classification à appliquer, et il est particulièrement difficile de prédire les propriétés écologiques.

Le chapitre 2 soulève aussi des questions quant à l'utilisation de la phytosociologie pour identifier les habitats d'intérêt en Union Européenne. Il montre que la phytosociologie seule ne permet de prédire correctement aucune des propriétés étudiées, et que la prédiction des propriétés écologiques doit être réalisée avec d'autres critères que les typologies pour être maximisée.

5. Synergies et compromis entre propriétés agroécologiques

Il est généralement admis une opposition entre production fourragère et les propriétés écologiques (Le Clec'h et al., 2019). Cependant, jusqu'à aujourd'hui les études se sont centrées sur un nombre restreint de propriétés : prendre en compte de nouvelles propriétés pourrait montrer des synergies entre propriétés agronomiques et écologiques.

Les résultats ont montré que les prairies pouvaient être classées en trois classes : une classe fortement liée à la qualité fourragère, une classe de faible productivité et faible diversité générale mais favorable aux espèces oligotrophiles, et enfin une classe de prairies à forte diversité générale et valeur nectarifère mais faible qualité fourragère. Enfin, ces classes peuvent être correctement prédites par la date de première utilisation, la teneur en calcium du sol et l'indice de fertilité selon Ellenberg.

5.1. Des résultats similaires entre matrice de corrélation et classification

A l'inverse, la HCPC à l'avantage d'apporter des informations statistiquement vérifiables : les propriétés mises en avant sont significativement ($p < 0,05$) corrélées à au moins une classe. La HCPC permet aussi de voir les prairies associées à chaque groupe, ce qui peut permettre de discuter les résultats (Figure 36). Cependant, comme pour toutes classifications, certains choix arbitraires sont à faire, en particulier pour ce qui est du choix des propriétés et du nombre de classes. J'ai décidé de limiter la part de l'arbitraire en choisissant statistiquement le nombre de classe en fonction de la plus grande perte d'inertie. Augmenter le nombre de classes pourrait peut-être mettre en avant des synergies différentes. Ainsi, passer de 3 à 6 classes permettrait de couper la classe 2 (violet) et la classe 3 (orange) (Figure 22) :

- La classe 2 (violet) serait séparée entre les prairies d'altitude à végétation rase dominées par la *Festuca rubra* (fétuque rouge) de MR_4 à OC_1, et les végétations plus hautes et plus diversifiées de A11_5 à MV388
- La classe 3 (orange) serait séparée entre les prairies d'altitude peu intensifiées de MR_5 à MV370, les prairies de plaines peu intensifiée de AG_1 à MH_1, et les prairies plus intensifiées de YG_1 à JPG_1

Figure 36 Prairies appartenant aux classes de compromis 1, 2 et 3

5.2. Agronomie et écologie : des propriétés compatibles ?

Les résultats de la HPCP ne montrent pas d'opposition entre rendement et diversité générale (richesse, indices de diversité) dans la classe 3, mais une opposition entre qualité nutritive et biodiversité. Ces résultats sont intéressants car l'opposition entre rendement et diversité est souvent mise en avant par les agriculteurs et conseillers agronomes, mais aussi par certaines études scientifiques (Le Clec'h et al., 2019). Des expérimentations ont cependant montré des corrélations positives entre biodiversité et rendement pour une même fertilisation (Tilman et al., 2001; Weigelt et al., 2009), mais il s'agit de prairies expérimentales dont la végétation est semée et beaucoup moins diversifiée qu'en prairies permanentes (Plantureux, 2020).

Cette classe 3 rassemble les prairies fortement diversifiées à faible valeur fourragère. Il s'agit de prairies localisée à travers tout le massif vosgien, à l'exclusion des prairies d'altitude extensives et des prairies à gestion intensive. Les sols très acides (pH < 4) ou très basiques (pH > 7) accueillent une diversité spécifique plus faible, car peu d'espèces sont adaptées à la faible disponibilité des nutriments dans ces conditions (Palpurina et al., 2017). La date de première utilisation est connue pour diminuer la diversité floristique des prairies et modifier la composition botanique (Gaujour et al., 2012).

La classe 2 montre un compromis entre d'un côté la production fourragère (rendement et valeur pastorale) et de l'autre côté les richesses et abondances en espèces oligotrophiles. Ce résultat était prévisible, car les espèces oligotrophiles sont par définition sensibles à la fertilité, qui permet d'améliorer la production fourragère (Ellenberg et al., 1992; Schellberg, 1999). Elle montre aussi une opposition entre espèces oligotrophiles et teneurs en minéraux du fourrage (P, K, Mg et Ca), ce qui peut s'expliquer par la faible fertilité de ces sols des prairies de la classe 2 : ce sont des prairies sur sol acide, ce qui limite la capacité des plantes à absorber les nutriments (Heyburn et al., 2017). Enfin, la classe 2 ne montre pas d'opposition entre espèces oligotrophiles et les indices de valeurs nutritives les plus recherchés par les agriculteurs : énergie, protéines et digestibilité.

Cependant, la principale hypothèse de cette étude était que la prise en compte de nouvelles propriétés agronomiques pourrait montrer des synergies avec la biodiversité. La souplesse d'exploitation est positivement corrélée à la classe 2, et négativement à la classe 3 : elle n'est donc pas favorisée par la biodiversité générale, mais liée aux espèces oligotrophiles. Ce résultat est surement dû à la végétation des prairies de la classe 2, dominée par *Festuca rubra* et permettant une forte souplesse d'exploitation (Cruz et al., 2010; Theau et al., 2017). La précocité de la végétation est aussi négativement corrélée à la classe 3, ce qui est cohérent car ces prairies sont utilisées tardivement et donc n'ont pas de raison de sélectionner une flore précoce. Cependant cet indice peut devenir important face au changement climatique impliquant des étés de plus en plus chauds et secs : une végétation précoce peut permettre d'utiliser la prairies deux fois au printemps, avant que l'herbe arrête sa croissance estivale, mais au détriment de la diversité (Gaujour et al., 2011).

Enfin, cette thèse ne montre pas de corrélation significative entre teneur en antioxydant de l'herbe et d'autres propriétés. Ce résultat est surprenant, car la teneur en antioxydant est généralement plus élevée dans les prairies diversifiées, car ces prairies ont une plus forte abondance en dicotylédones (Poutaraud et al., 2017) et à l'inverse la fertilisation azotée induit de faibles teneurs en antioxydants (Stumpf et al., 2019). Ce résultat peut s'expliquer par la récolte précoce de la végétation des prairies de la classe 1, plus favorable à la teneur en antioxydants (Fraisse et al., 2007), qui pourrait contre balancer la faible diversité de la végétation. De plus, les analyses d'antioxydants n'ont pu être réalisées pour seulement 20 prairies, un faible nombre qui peut aussi expliquer la faible significativité de la propriété. De même, l'indice de refus n'est corrélé à aucune classe. Cet indice est calculé grâce à l'abondance de plantes diverses hautes présentes dans les prairies fauchées et pâturées (ex : *Anthriscus sylvestris*, *Heracleum sphondyllium*, *Rumex obtusifolius*) et grâce à l'abondance de graminées tardives à faible valeur fourragère typique des prairies d'altitude (ex : *Poa chaixii*, *Nardus stricta*) : ces espèces peuvent donc être présentes dans toutes les classes ici créées, ce qui explique leur non corrélation.

La biodiversité peut aussi entrer en synergie avec les propriétés agronomiques par la résilience aux aléas climatiques (Finn et al., 2018; Woodward et al., 2013) et par l'amélioration de la flaveur des produits laitiers et carnés (Farruggia et al., 2008), mais je n'ai pas pu étudier ces propriétés dans le cadre de ma thèse.

5.3. Les qualités nutritives se cumulent

La classe 1 cumule de fortes valeurs pour toutes les propriétés nutritives : énergie (UFL et UFV), protéines (PDIE et PDIN), digestibilité et teneurs en minéraux y sont liées. Ces synergies entre propriétés ont déjà été observées dans plusieurs études (Andueza et al., 2015; Corona et al., 1998; Mountousis et al., 2011).

La classe 1 correspond aux prairies utilisées précocement, ce qui permet d'augmenter les teneurs en énergie et protéines du fourrage (INRA, 2010). De plus des liens entre stade de la végétation et teneurs en minéraux ont été établis : les teneurs diminuent au cours du développement de la végétation, à l'exception du calcium (Ca) qui serait stable (Leaver, 1985), bien qu'il soit ici associé aux prairies précoces. Cependant, French (2017) a montré de fortes teneurs en sucres et phosphore (P) dans les prairies diversifiées, mais cette étude compare des prairies permanentes sans fertilisation à des prairies temporaires intensifiées. Enfin, pour être utilisées précocement ces praires sont probablement plus fertiles, ce qui permet d'augmenter le taux de protéine de la végétation (Bumane, 2010). Les minéraux jouent un rôle important dans la nutrition des animaux, car ils sont essentiels et permettent d'augmenter significativement les productions (INRA, 2010; Kincaid et al., 1981).

5.4. Les propriétés écologiques scindées en deux classes

Les propriétés écologiques ont de faibles valeurs dans la classe 1, mais sont réparties entre la classe 2 et 3 sans montrer de synergies : la classe 2 est associée aux espèces oligotrophiles, alors que la classe 3 est associé à la diversité générale et à la valeur nectarifère.

Ces résultats confirment tout d'abord que la richesse spécifique n'est pas un bon indicateur de la richesse en espèces oligotrophiles (Pykälä et al., 2005) : la classe 3 associée à une forte diversité générale (richesse spécifique et indices de diversité) n'est ni positivement ni négativement corrélée aux richesse et abondance en oligotrophiles, alors que la classe 2 permet de fortes richesse et abondance en oligotrophiles mais impose alors de faibles valeurs de diversité générale. Conformément aux attentes, richesse et abondance en oligotrophiles sont faibles dans les prairies précoces et probablement intensifiées de la classe 1.

J'ai utilisé la valeur nectarifère pour pouvoir estimer l'intérêt de chaque prairie pour les insectes pollinisateurs. Les résultats montrent une synergie entre la valeur nectarifère et la diversité générale, au sein de la classe 3. En effet, il existe des corrélations entre richesse floristique, en plantes entomophiles et en plantes nectarifères (Wesche et al., 2012), qui peut s'expliquer par l'augmentation des graminées, ne produisant pas de nectar, sous l'influence de la fertilisation (Gaujour et al., 2012). Une utilisation faible mais non nulle des prairies favorise la valeur nectarifère car elle permet d'inciter les plantes à créer plus de ramifications et donc de fleurs, augmentant la production de nectar à l'échelle de l'espèce et donc de la communauté (Mu et al., 2016). Cependant, la fiabilité de cet indicateur doit être vérifiée, car la production de nectar ne suffit pas à estimer l'abondance de pollinisateurs : les dates de floraison par exemple peuvent

jouer un rôle important car une floraison précoce peut créer un décalage entre production de nectar et présence des insectes (Petanidou et al., 2014). Si on peut penser que les pollinisateurs sont synchronisés avec leurs habitats, le changement climatique peut impacter les quantité et qualité de nectar produites (Theurillat and Guisan, 2001), et les évènements climatiques extrêmes sur quelques jours peuvent avoir autant d'impact sur la phénologie de la végétation que plusieurs années de changement climatique progressif (Jentsch et al., 2009). Le Clec'h et al. (2019) ont observé des synergies entre richesse floristique et richesse en abeille, qui s'opposent aux rendements. Mes résultats montrent une synergie entre richesse floristique et valeur nectarifère, et donc théoriquement avec la richesse et/ou l'abondance de pollinisateurs, mais pas d'opposition au rendement.

J'ai étudié le stock de carbone dans les sols de prairies car il permet de limiter le réchauffement climatique (Gac et al., 2010), mais aussi parce qu'un fort taux de carbone permet une meilleure croissance de la végétation et une plus grande abondance de micro et macro organismes dans le sol (Li et al., 2004; Lowe and Butt, 2002). Bien que plusieurs études aient montré une synergie entre diversité floristique et stock de carbone (Hungate et al., 2017; Le Clec'h et al., 2019; Oram et al., 2018), mes résultats ne montrent pas de lien entre le stock de carbone et l'une des classes. Le fait que le stock de carbone soit lié à de très nombreux critères des pratiques agricoles (Soussana et al., 2004) et du climat (Post and Kwon, 2000) ou même à la présence d'arbre à proximité de la prairie (Ford et al., 2019), peut expliquer la difficulté à identifier des synergies et compromis entre carbone et d'autres propriétés. De plus, je n'ai pas pu mesurer la densité apparente du sol, indispensable au calcul du stock de carbone : je l'ai estimée grâce à la teneur en matière organique (Post and Kwon, 2000) ce qui ne permet pas de prendre en compte le tassement du sol par les animaux au pâturage par exemple, augmentant la densité et donc le stock de carbone.

J'ai tout de même pu vérifier la corrélation entre cette formule et 20 mesures de densité apparentes. La corrélation était correcte (0,79) mais la formule donne généralement des stocks de carbones supérieurs aux mesures. En effet, cette formule, bien qu'elle ait déjà été validée dans de précédentes études, m'a permis d'atteindre une moyenne de 135 t/ha, ce qui est énorme par rapport aux 40-43 t/ha observées par Eze et al. (2018) dans 341 prairies à travers le monde. Cette différence peut s'expliquer par la méthode de calcul de la densité apparente, puisque Eze et al. (2018) ont utilisé une formule différente, et par l'intégration de prairies venant de milieux très diverses ayant probablement des stocks en carbone différents de ceux des prairies du massif vosgien. Dans un contexte plus proche, Arrouays et al. (2002) ont estimé que les prairies de France métropolitaine stockent en moyenne 70 t/ha, et approche les 95 t/ha dans les pelouses et zones humides.

5.5. Une prédiction fiable des classes de compromis

La prédiction des classes de compromis par la forêt aléatoire a montré de bons résultats : seulement 8,62 % d'erreur. Les prédicteurs identifiés étaient la date d'utilisation, la teneur en CaO du sol et l'indice d'Ellenberg pour la fertilité.

La date d'utilisation a un effet important sur la qualité fourragère et sur la biodiversité : les prairies utilisées précocement ont de fortes teneur en énergie, protéines et une meilleure digestibilité (Grace et al., 2016; Pontes et al., 2007b), mais elles ont une diversité réduite dominée par des espèces de faible intérêt écologique (Plantureux et al., 2005). La date

d'utilisation est corrélée au mode d'utilisation : une utilisation précoce indique un pâturage et une teneur en potassium légèrement plus forte. Le mode d'utilisation a aussi un fort effet sur la composition botanique (Gaujour et al., 2012; Lanta et al., 2009), tandis que les effets du potassium sont moins tranchés : la végétation a besoin d'une teneur minimale dans le sol pour maximiser la diversité, mais la diversité peut rester élevée même à fortes teneurs en potassium (Janssens et al., 1998). Enfin, mes résultats montrent aussi que la date de première utilisation est un bon prédicteur de la valeur nutritive (protéine et énergie) ainsi que de la valeur nectarifère (Chapitre 1.B).

Le rôle de la teneur en calcium est plus complexe. Les sols calcaires sont généralement propices à une forte diversité et à de meilleurs rendements (Gaujour et al., 2012; Olsson et al., 2009), résultat que j'ai aussi pu observer (Chapitre 1 Partie B). J'ai aussi montré des corrélations entre teneur en calcium, texture et CEC (Chapitre 1 Partie A), et pH du sol et CEC sont positivement corrélés au rendement (Blaize, 2018). L'indice d'Ellenberg pour la fertilité est aussi un prédicteur des rendement et diversité. Il est corrélé à de forts rendements mais à de faibles diversités (Garnier et al., 2018; Potts et al., 2009; Serafini et al., 2019). Mes résultats ont montré son intérêt pour la prédiction du rendement, de la valeur pastorale, de l'indice de Shannon et de la richesse en espèces oligotrophiles (Chapitre 1 Partie B).

Ainsi, seule la prédiction de la valeur nutritive (par la date d'utilisation), des productions et de la diversité (par la teneur en CaO et l'indice de fertilité) suffisent à prédire les classes de compromis. Ce résultat permet d'émettre deux hypothèses : soit prédire ces propriétés suffit à prédire les classes de compromis, soit toutes les propriétés peuvent être prédite de manière satisfaisante grâce à ces trois critères.

Enfin, on peut remarquer que l'arbre de décision seul permet une meilleure prédiction que la forêt d'arbre de décision, ce qui peut remettre en cause l'intérêt de la forêt. Or, utiliser un seul arbre peut être limitant, car il risque d'être trop adapté au jeu de données et non utilisable sur des prairies qui n'ont pas servi à sa création. C'est pourquoi la forêt aléatoire est composée d'arbres qui ne prennent pas en compte toutes les prairies ni toutes les variables.

5.6. Bilan

Les chapitres 1.B et 2 se sont intéressés à la prédiction des propriétés agroécologiques. Certains critères prédictifs sont redondants entre propriétés, pouvant indiquer des synergies ou antagonismes entre propriétés lorsque ces critères varient.

Le chapitre 3 montre qu'il est nécessaire de faire des compromis entre propriétés : les prairies du massif vosgien peuvent produire un fourrage de haute qualité nutritive, héberger une forte diversité générale ou accueillir une flore patrimoniale. La prédiction de ces classes de compromis est fiable, et ne nécessite que trois connaissances : la date d'utilisation, la teneur en calcium du sol et l'indice d'Ellenberg pour la fertilité. Ces trois connaissances peuvent être difficiles à obtenir : il faut connaitre les pratiques de l'agriculteurs, les propriétés du sol et la végétation. Ces critères mettent en avant l'effet des pratiques et de la texture identifiés dans le chapitre 1.A, mais les classes de compromis ne semblent que peu liées à l'effet altitude.

L'hypothèse principale était que la prise en compte de nouvelles propriétés agroécologiques peut créer de nouvelles synergies entre agronomie et écologie. Cette hypothèse n'a pas pu être

validée, mais une analyse plus poussée prenant en compte les coûts de production et la qualité organoleptique des prairies pourrait montrer de nouvelles synergies.

Enfin, l'indentification de types prairiaux combinant production de qualité et haute biodiversité pourrait amener à une uniformisation du paysage, et donc à une disparition d'espèces ou d'habitat. Cette uniformisation pourrait donc être un risque pour la conservation de la biodiversité mais aussi pour les agriculteurs si ces types prairiaux présentes des faiblesses face à des évènements climatiques (humidité, température) ou biologiques (ravageur).

6. Comment prédire végétations, propriétés et compromis entre propriétés?

6.1. Des critères prédictifs redondants ?

Parmi tous les critères étudiés, soit plus de 600 critères du milieu, des pratiques et de la végétation, aucun ne permet la bonne prédiction de toutes les propriétés agroécologiques (Tableau 22).

Les prédictions les plus fiables sont basées à la fois sur des critères du milieu, des pratiques et de la végétation, mais afin de simplifier la prédiction sur le terrain les typologies peuvent être utilisées comme seuls critères prédictifs des propriétés agroécologiques. Elles permettent la bonne prédiction du rendement, de la valeur pastorale, de la précocité, de la richesse en oligotrophiles, des abondances de formes de vie et de l'intérêt de la composition botanique pour les pollinisateurs. Elles peuvent aussi être utilisées avec d'autres critères des pratiques, du milieu, ou des espèces clés pour la prédiction de la souplesse d'exploitation, de la précocité de la végétation, de l'indice de Shannon et de la valeur nectarifère. Cependant, aucune typologie ne permet de prédire les classes de compromis, ce qui semble indiquer que les synergies et compromis ne sont pas constants au sein des types prairiaux.

La date de 1ère utilisation et l'indice d'Ellenberg pour la fertilité sont utiles à la prédiction de la végétation (présences et abondances), de nombreuses propriétés et des synergies et compromis. La polyvalence de ces critères prédictifs peut expliquer leur fort intérêt dans la prédiction des classes de synergies et compromis (Figure 24). A l'inverse, la teneur en CaO échangeable est utile à la prédiction des classes de compromis, mais très peu à la prédiction des propriétés et de la végétation. Cependant, cette propriété est fortement corrélée à la texture, au pH, à la CEC (Annexe 6), qui permettent la prédiction de la végétation et de propriétés.

De manière générale, l'absence des pratiques agricoles et de l'environnement parmi les critères prédictifs est marquante. Les pratiques connues comme les plus décisives pour la végétation sont utiles à la prédiction des communautés végétales : le mode d'utilisation, la date de 1ère utilisation, et la fertilisation azotée permettent la prédiction des présences et/ou abondances (Gaujour et al., 2012). Cependant, seule la date de 1ère utilisation est utile à la prédiction de propriétés et compromis. De même, précipitations, températures, pente et composition du paysage sont utiles à la prédiction des communautés végétales, mais ne sont jamais sélectionnées pour la prédiction optimale des propriétés. L'absence de ces critères est probablement due aux fortes corrélations entre sol, climat et pratiques agricoles, pouvant se résumer à un effet altitude (climat, teneur en matière organique du sol), texture (pH, CEC) et pratiques (mode d'utilisation, fertilisation, chargement).

Tableau 22 Bilan des critères sélectionnés pour la prédiction des communautés, propriétés et classes de compromis

Les critères ont été sélectionnés dans le chapitre 1 (1), dans le chapitre 2 (2) ou dans le chapitre 3 (3). Enfin, des critères ont été sélectionnés à la fois dans le chapitre 1 et dans le chapitre 2 pour la même propriété (1+2). Certaines propriétés ont été prédites sans critères de la végétation (*) ou sans critères de la matières organiques (**)

	Espèces : présences	Espèces : abondances	Rendement	Valeur pastorale	PDI (protéines)	UF (énergie)	Antioxydants	Souplesse	Précocité	Richesse spécifique	Shannon	Shannon *	Simpson	Richesse en oligotrophiles	Richesse en oligotrophiles *	Richesse en familles	Abondance des formes de vie	Intérêt pollinisateurs	Stock de carbone	Stock de carbone **	Classes de compromis
Al échangeable	1	1																			
Argile							1														
C/N	1														1						
CaO échangeable											1	1									3
Carbonate total		1																			
Carbone organique	1											1									
CEC	1								1											1	
K_2O échangeable	1	1				1															
Limons grossiers		1										1									
Matière organique	1											1							1		
MgO échangeable	1			1							1										
Mn échangeable	1																				
N total	1											1									
Na_2O échangeable		1																			
P_2O_5 assimilable		1																			
pH	1							1			1	1									
Sables fins																		1			
Sables grossiers							1														
Evapotranspiration												1									
Paysage	1	1																			
Pente		1																			
Précipitations	1	1																		1	
Températures	1	1																			
Date de 1ère utilisation	1	1			1	1									1			1			3
Fertilisation N	1																				
Mode de 1ère utilisation	1	1																			
Agrostis capillaris									1												
Anthriscus sylvestris			1																		
Festuca pratensis											1										
Festuca rubra				1				1			1										
Galium saxatile											1										
Hieracium pilosella																		1			
Holcus mollis											1										
Hypochaeris radicata																		1			
Lolium perenne				1					1												
Poa trivialis			1	1																	
Potentilla erecta														1							
Ranunculus acris					1	1															
Stachys officinalis																		1			
Trifolium pratense				1			1				1							1			
Trisetum flavescent				1																	
Fertilité			1	1							1			1							3
Etat calcique				1																	
Humidité														1							
Agronomie			2	2					2		1						2				
Fonctionnelle				2				1	1+2		1			2				1			
Phytosociologie									2					2			2			1	

J'ai prédit le rendement, la valeur pastorale, la précocité, la richesse en espèces oligotrophiles et l'intérêt pour les pollinisateurs deux fois : une première fois par le milieu, les pratiques et la végétation (chapitre 1 Partie B) puis par les typologies seules (Chapitre 2). Les indices de qualité des prédictions ne peuvent pas être comparés précisément car ils sont de natures différentes (R^2 et pseudo-R^2) mais les ordres de grandeurs peuvent l'être (Tableau 23).

Tableau 23 Comparaison des prédictions entre protocoles utilisés

	Rendement		Valeur pastorale		Précocité		Richesse en oligotrophiles		Intérêt pollinisateurs	
Sol			■		■				■	
Pratiques									■	
Espèces	■		■		■		■		■	
Indices d'Ellenberg	■		■				■			
Typologie phytosociologique				■	■	■		■		
Typologie agronomique		■				■				■
Typologie fonctionnelle				■	■	■		■	■	
Qualités des modèles (chap.1b / chap.2)	R^2 0,48	pR^2 0,52	R^2 0,76	pR^2 0,60	R^2 0,28	pR^2 0,67	R^2 0,70	pR^2 0,63	R^2 0,45	pR^2 0,26

Rendement, valeur pastorale et richesse en oligotrophiles ont des qualités de prédiction similaire entre mes deux analyses, malgré des critères prédictifs différents. Lorsque de très nombreux critères prédictifs du milieu, des pratiques et de la végétation sont proposés, seule la précocité est correctement prédite par une typologie. Il s'agit dans ce cas de la typologie fonctionnelle, utilisée avec d'autres critères afin de maximiser la prédiction. Cette typologie a aussi été sélectionnée pour la prédiction de la précocité lorsque seules les typologies sont utilisées comme critères prédictif.

La précocité a d'ailleurs une qualité de prédiction supérieur lorsqu'elle n'est prédite que par les typologies, ce qui est surprenant. Ce résultat peut s'expliquer par les différentes méthodes d'analyse et par des différences de jeux de données : le nombre de prairies à prédire diffère entre les deux analyses (58 prairies lorsque tous les critères sont utilisés, contre 230 prairies pour les typologies seules), le plus grand nombre de données peut permettre des modèles de meilleure qualité.

6.2. Les pratiques agricoles : des critères peu visibles mais nécessaires

Dans la littérature, les pratiques sont souvent identifiées comme des critères impactant les propriétés agroécologiques : dates, mode, fertilisation, nombre de fauche, chargement, espèces au pâturage, etc… (ex : Borer et al., 2017; Bullock et al., 2001, 1994; Dumont et al., 2009; Melts et al., 2018).

Mes résultats ont montré que la composition botanique pouvait être prédite par le mode et la date de première utilisation et la fertilisation organique azotée, mais que ces critères sont déjà fortement colinéaires aux critères du milieu. J'ai ensuite montré que parmi les critères des pratiques, seule la date de première utilisation était utile à la bonne prédiction des propriétés agroécologiques et des classes de compromis. Cependant, même si les critères des pratiques ne

sont pas directement de bons prédicteurs, l'effet pratique permet la bonne prédiction de 9 propriétés sur 11. Cet effet s'exprime via les critères des pratiques, mais aussi des critères de la végétation (espèces indicatrices, indices d'Ellenberg) et du sol (teneur en azote et en potassium).

Pour avoir un regard plus averti sur l'effet des pratiques sur les propriétés agroécologiques, j'ai observé les liens linéaires entre en trois critères des pratiques (date de première utilisation, indice d'Ellenberg pour la fertilité et mode de la première utilisation) et trois propriétés (valeur pastorale, indice de Shannon et richesse en oligotrophiles). Afin d'agrandir l'échantillon, je me suis intéressé aux 250 prairies suivies lors des précédentes typologies agronomiques (Bayeur et al., 2013; Collectif, 2006), et j'ai regroupé les prairies selon leurs altitudes et états calciques pour limiter l'impacts de ces critères sur les propriétés (Figure 37).

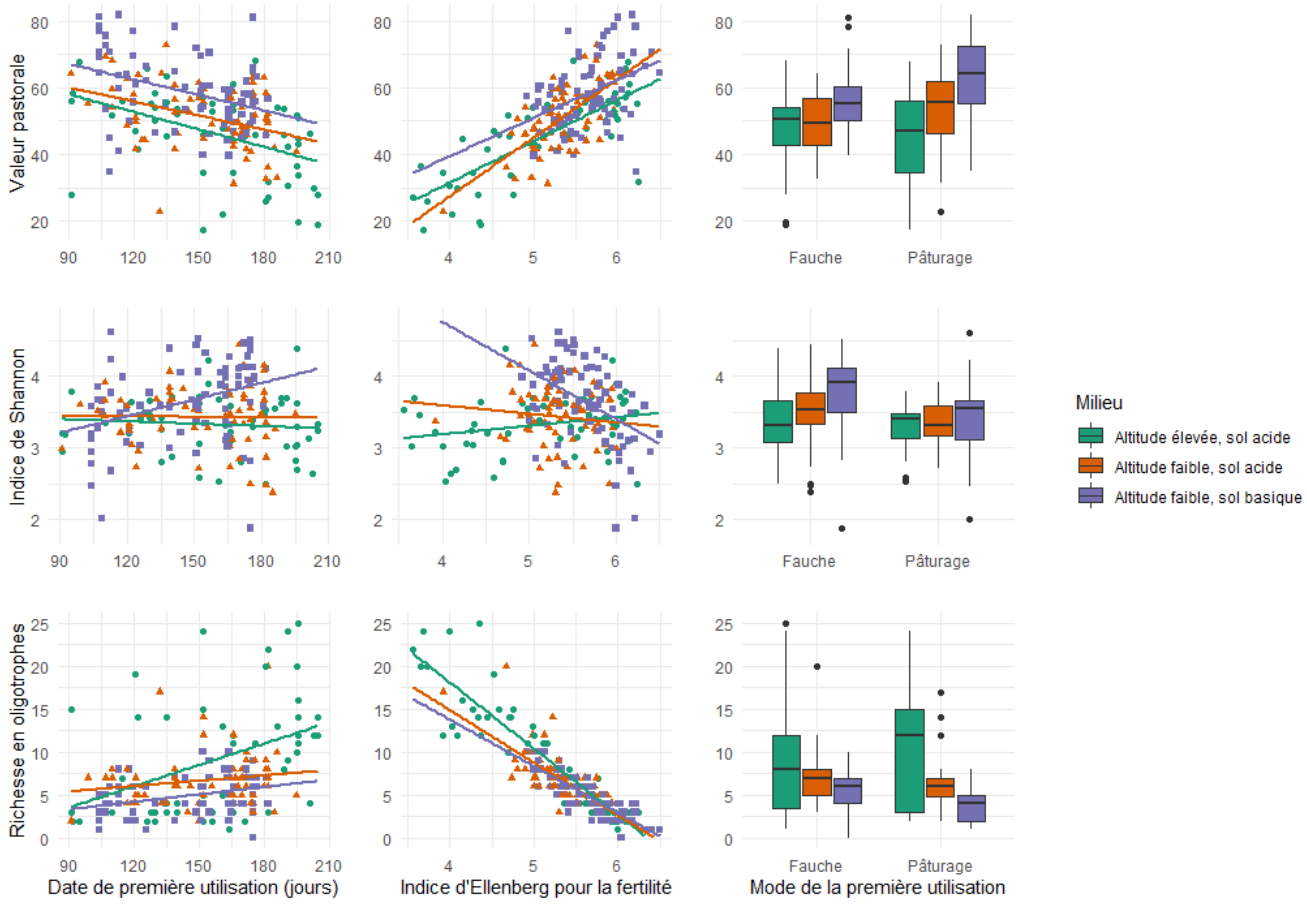


Figure 37 Liens entre trois propriétés agroécologiques (valeur pastorale, indice de Shannon, richesse en oligotrophiles) et trois critères des pratiques (date de première utilisation, indice d'Ellenberg pour la fertilité et mode de première utilisation)

Ces observations confirment tout d'abord des différences dans les valeurs des propriétés agroécologiques entre milieux (altitude et état calciques), comme observé dans le Chapitre 1 Partie B. Ensuite, les milieux peuvent réagir différemment sous l'influence des pratiques agricoles, il est donc important de connaitre le milieu et les pratiques agricoles. Par exemple, l'indice de Shannon diminue fortement pour les prairies de faible altitude sur sol basique lorsque la fertilité augmente, mais reste relativement constant pour les prairies sur sol acide. De même, la moyenne des richesses en espèces oligotrophiles augmente sous l'effet du pâturage dans les prairie d'altitude sur sol acide, mais reste constant entre fauche et pâturage pour les prairies de faible altitude.

Deux principales raisons peuvent expliquer la non sélection de critères des pratiques malgré leur impact sur les propriétés. Premièrement, la sélection des meilleurs critères prédictifs impose de ne garder qu'un minimum de critères, tout en limitant les corrélations entre critères sélectionnés. Les critères sélectionnés peuvent donc être corrélés à plusieurs critères, et ainsi apporter plus d'information qu'un seul critère des pratiques. Secondement, le gradient des pratiques est moins important que les gradients d'altitude et de texture (Tableau 21), l'effet des pratiques est donc un prédicteur visible mais moins prédictif.

Ces hypothèses expliquent l'importance de l'effet pratiques dans les prédictions des propriétés malgré le faible nombre de critères directement liés aux pratiques (Tableau 16), et les réactions variables entre prairies de milieu différent sous l'influence de critères des pratiques.

6.3. Quel avenir pour les prédicteurs identifiés ?

Le changement climatique, la redéfinition des propriétés agroécologiques et l'échantillon de prairies étudiés pourraient modifier les prédicteurs identifiés.

6.3.1. Changement climatique et évolutions des pratiques

Les rendements et qualité nutritive n'ont été mesurés que pour la pousse de printemps, à cause des canicules et sécheresses estivales de 2018 et 2019 n'ayant permis qu'une très faible pousse de l'herbe l'été et l'automne : la majorité des prairies n'a donc pu être fauchée ou pâturée qu'une seule fois par les agriculteurs. Cette situation n'est pas durable pour les agriculteurs qui sont donc souvent en manque quantitatif et qualitatif de fourrage, comme le montre les attentes des agriculteurs dans le chapitre 4. Les sécheresses et canicules risquent de se généraliser (Calanca, 2007), il y aura alors de forts changements de pratiques agricoles, tels qu'une utilisation plus précoce de la végétation afin de constituer des stocks pour l'été et afin de valoriser l'herbe jeune de meilleure qualité nutritive (Buxton, 1996; Rossignol et al., 2014), ou le développement du pâturage dont les coûts de production sont inférieurs à ceux de la fauche (Delaby et al., 2017). De manière plus générale, l'augmentation des températures induit une phénologie de la végétation plus précoce en nombre de jours, que les agriculteurs doivent compenser en utilisant la prairie plus tôt afin de maintenir de bonnes valeurs nutritives (Deroche et al., 2020).

Ces changements de climat et de pratiques agricoles modifient petit à petit la végétation des prairies, et donc les propriétés agroécologiques qu'elles fournissent. Grâce aux gradients altitudinal et latitudinal, on peut s'attendre au déplacement des communautés vers les sommets et le nord (Cannone et al., 2007; Duckworth et al., 2000; Niskanen et al., 2019), évitant la perte des communautés de faibles et moyennes altitude mais induisant la disparition des communautés et espèces déjà uniquement présentes aux sommets où dans les régions les plus au nord du massif. On peut aussi s'attendre à l'apparition de communautés sur le massif vosgien, sous l'effet du gradient méditerranéen. Il est donc possible que les propriétés agroécologiques, leurs compromis et synergies, mais aussi les critères prédictifs des propriétés et compromis évoluent dans les prochaines années.

Enfin, la lutte contre le changement climatique ne passe pas forcément par l'intensification des pratiques agricoles. En effet, les prairies diversifiées peuvent être plus résistantes aux aléas climatiques que les prairies simplifiées, ce qui peut inciter les agriculteurs à les maintenir (Finn et al., 2018; Xu et al., 2018). Les prairies humides, fortement drainées depuis plusieurs décennies (Duren and Pegtel, 2000) peuvent être restaurée pour produire du fourrage lors des

périodes sèches. Cependant, les prairies humides sont souvent associée à des fourrages de moins bonne qualité nutritive (Tasset et al., 2019) et à un risque parasitaire accru (Bareille et al., 2019), et sont elles-mêmes menacées par le changement climatique (Joyce et al., 2016). Les arbres ont aussi de nombreuses propriétés favorables à l'élevage face au changement climatique : leurs feuilles peuvent être utilisées comme un fourrage de qualité comparable aux bonnes graminées et contiennent des tanins favorables à la santé animale (Emile et al., 2017), l'ombre produite par les arbres peut aider la végétation herbacée et les animaux à résister face aux canicules (Nerlich et al., 2013) et les arbres permettent une augmentation du taux de matière organique dans le sol favorable à une meilleure rétention de l'eau (De Stefano and Jacobson, 2017). Je n'ai pas pu prendre en compte les arbres pendant cette thèse, qui s'est concentré sur la strate herbacée. L'utilisation de la phytosociologie synusiale (Gillet et al., 1991) pourrait aider à la création de types prairiaux basés sur les différentes strates de la végétation.

6.3.2. Propriétés agroécologiques : des méthodes parfois fluctuantes

Les modes de calculs des propriétés peuvent évoluer et de nouvelles propriétés peuvent être calculées avec l'avancement des recherches.

La qualité du fourrage peut être étudiée via différentes valeurs. Beaucoup d'études se sont concentrées sur les teneurs en protéines brutes, cellulose brute, ADF (fibres au détergent acide), NDF (fibres au détergent neutre) et ADL (lignine au détergent acide) (ex : Andueza et al., 2015; Jochims et al., 2018; Nocera et al., 2005; Ravetto Enri et al., 2017). J'ai préféré étudier la part réellement métabolisable par le bétail, en calculant les protéines digestibles dans l'intestin (PDIE et PDIN), l'énergie métabolisable (UFL et UFB) et l'encombrement (UEL, UEB et UEM). Cependant, les formules pour calculer ces valeurs évoluent aussi avec l'avancée des connaissances scientifiques : le « livre rouge » permettant de calculer les PDI, UF et UE en est désormais à sa 4ème édition (INRA, 2018), chaque édition permettant d'affiner les calculs.

L'une des hypothèses de cette thèse était de voir si la prise en compte de nouvelles propriétés permet de créer des synergies entre agronomie et écologie. J'ai calculé des indices de souplesse d'exploitation, de précocité, de refus et d'intérêt pour les pollinisateurs, et j'ai utilisé des mesures d'activité antioxydante. La souplesse s'est révélée être bien prédite (73,02 % de la variance est prédite), à l'inverse de la précocité (28,12 %), des antioxydants (12,05 %) et dans une moindre mesure de la valeur nectarifère (45,29 %). Souplesse et précocité ont montré un compromis face à la diversité générale (richesse spécifique, indice de diversité) et la valeur nectarifère, infirmant l'hypothèse. Cependant, la souplesse est en synergie avec la valeur patrimoniale exprimée via la richesse en espèces oligotrophiles. Enfin, les antioxydants en plus d'être difficilement prédictibles ne montrent pas de synergies ni compromis avec les autres propriétés, probablement à cause du faible jeu de données : seules 20 prairies ont pu être analysées. De nouvelles propriétés peuvent être encore ajoutées à l'analyse, telles que la valeur organoleptique et les coûts de production, mais leur analyse n'a pas pu être réalisée dans le cadre de la thèse. La valeur organoleptique peut s'exprimer via la couleur, l'odeur et le goût de produits carnés et laitiers, et est favorisée par le pâturage et la diversité des prairies (Farruggia et al., 2008; Martin et al., 2009; Priolo et al., 2001). Les coûts de production peuvent aussi être diminués par l'utilisation du pâturage plutôt que de la fauche, et par la non fertilisation des prairies (Réseau Mixte Technologique Praires Demain, 2016) pouvant permettre le développement de prairies diversifiées et riches en espèces oligotrophiles.

Si les méthodes de calcul ou de mesures des propriétés évoluent avec l'avancée des recherches, des différences sont aussi notables au cours de la thèse. En particulier, les données historiques des typologies agronomiques Ballons des Vosges et Vosges du Nord (Bayeur et al., 2013; Collectif, 2006), servant de base au chapitre 2, ne sont pas forcément comparables aux données collectées pendant cette thèse.

Les rendements historiques ont été estimés par les connaissances de l'agriculteur : en fonction du nombre de bottes de foin et/ou des chargements de pâturage. Ces estimations peuvent mener à de grandes différences entre modes d'utilisation car toutes les plantes sont prises en compte par le rendement de la fauche alors que les animaux au pâturage sélectionnent des plantes (Baumont, 1996) : une même prairie pourrait donc avoir un rendement fauche plus élevé que son rendement pâturage. De plus, le rendement fauche est dépendant de la hauteur de fauche et des pertes mécaniques à la récolte, et les animaux au pâturage couperont l'herbe à des hauteurs différentes selon les espèces et races. Pendant cette thèse, j'ai mesuré les rendements via la production aérienne de matière sèche à plus de 5 cm du sol, en coupant, séchant et pesant les fourrages en laboratoire. Cette mesure nécessite normalement plusieurs prélèvements dans l'année, au-delà du pic de biomasse, pour pouvoir tenir compte de la sénescence régulière de la végétation, mais les conditions climatiques extrêmes des deux années d'échantillonnage ne m'ont pas permis de suivre la croissance de la végétation tout au long de la saison. Mesurer et prédire précisément le rendement est une attente forte des agriculteurs et de leurs conseillers (Chapitre 4), à laquelle il est nécessaire de répondre pour permettre la valorisation et donc la sauvegarde des prairies permanentes.

De même, j'ai calculé pour le chapitre 2 une « valeur pollinisateur » s'appuyant sur l'abondance des espèces entomophiles. Dans les autres chapitres, j'ai utilisé une « valeur nectarifère » théoriquement plus représentative de l'intérêt réel de la prairie pour les pollinisateurs puisqu'il prend en compte à la fois l'abondance des espèces et la quantité de nectar produite par ces espèces. La valeur nectarifère peut être assez bien prédite par des critères du milieu et de la végétation (45,29 % de la variance expliquée), mais c'est une propriété peu attendue par les agriculteurs, bien que les conseillers aient exprimé des attentes vis-à-vis de l'estimation de la diversité des insectes et du potentiel de production mellifère (Chapitre 4).

6.4. Un regard critique sur les typologies prairiales

De nombreuses typologies phytosociologiques, agronomiques et fonctionnelles ont été développées en France et dans les pays limitrophes. Ces outils sont faciles à prendre en main, sont utilisés pour prédire de nombreuses propriétés, mais la fiabilité de ces prédictions reste à confirmer.

Les typologies peuvent permettre la prédiction de nombreuses propriétés agroécologiques telles que le rendements, qualités fourragères, valeurs organoleptiques, valeurs pour la santé animale et du consommateur, coûts de productions, diversité floristique, état de conservation, valeur pour les pollinisateurs, stock de carbone, etc... (Bayeur et al., 2013; Collectif, 2006; Hulin et al., 2011; Launay et al., 2011). Elles permettent donc de répondre à de nombreuses attentes émises par les agriculteurs et conseillers.

Les typologies se sont montrées être de bons prédicteurs des propriétés agronomiques lorsqu'elles sont utilisées seules, mais de mauvais prédicteurs des propriétés écologiques

(Chapitre 2). Lorsque tous les critères sont utilisés, les typologies demeuraient les meilleurs critères prédictifs de quatre propriétés sur les onze étudiées (souplesse, précocité, indice de Shannon et valeur nectarifère). Ces résultats montrent que les typologies ne permettent généralement pas une prédiction optimale des propriétés agroécologiques, mais qu'elles peuvent être utilisées pour une prédiction suffisamment fiable des propriétés agronomiques ;

Ce manque de précision peut être dû au principe des typologies : elles regroupent des prairies ayant des compositions botaniques similaires (en terme de présence et/ou d'abondance), prairies qui doivent donc être liées à des propriétés similaires. Cependant, les typologies permettent de prédire des propriétés moyennes (à l'échelle du type) et non réelles (à l'échelle de la communauté). De plus, les typologies ne peuvent pas prendre en compte les variations climatiques annuelles, ce qui peut expliquer la faible qualité des prédictions de rendements et qualités fourragères mesurés en 2018 et 2019, années ayant subi des sécheresses et canicules. De plus, je n'ai pu mesurer que les rendements et qualité fourragères de printemps, alors que les typologies ont été développées pour prédire des rendements annuels.

Afin d'être facilement utilisables, les types agronomiques sont souvent déterminables sans connaissances de la végétation, mais en se basant sur les pratiques agricoles et le milieu (Bayeur et al., 2013; Collectif, 2006; Hulin et al., 2011; Launay et al., 2011). Cependant, la végétation met plusieurs années à s'adapter à des changements de pratiques, donc il y a un fort risque de mauvaise prédiction des propriétés tant que les communautés ne sont pas relativement stabilisées.

Enfin, bien que les compromis soient correctement prédictibles (seulement 8,62% d'erreur), les typologies ne font pas partie des meilleurs prédicteurs. Ce résultat peut être dû à la faible capacité des typologies à prédire les propriétés agroécologiques : les typologies sont uniquement parmi les meilleurs critères prédictifs de la souplesse, de la précocité, de l'indice de Shannon et de la valeur nectarifère.

Les typologies peuvent donc prédire facilement de nombreuses propriétés, mais il y a encore besoin d'affiner la prédiction de certaines propriétés, en particulier les propriétés écologiques.

6.5. Bilan

J'ai souvent pu prédire les propriétés agroécologiques et leurs classes de compromis de manière fiable, en utilisant des critères du milieu, des pratiques et de la végétation. Cependant, je n'ai pas pu identifier de critère polyvalent, permettant la bonne prédiction de toutes les propriétés et classes de compromis. De manière générale, les critères des pratiques sont peu utiles à la bonne prédiction. Par contre, l'effet des pratiques est indirectement exprimé par de nombreux critères de la végétation et du sol. Les pratiques sont probablement effacées par la grande variabilité des sols et climat à travers le massif vosgien. En effet, j'ai pu observer un probable effet des pratiques pour les prairies situées dans les mêmes conditions pédoclimatiques.

Le changement climatique et l'évolution des pratiques agricoles pour y faire face risquent de modifier les compositions botaniques des prairies ainsi que les propriétés agroécologiques qu'elles fournissent. Il est donc nécessaire de réaliser un suivi régulier des prairies et pratiques du massif vosgien, afin de pouvoir fournir un outil d'aide à la médiation correspondant aux réalités du terrain ainsi qu'aux attentes des agriculteurs et conseillers. Les typologies sont des outils simples d'utilisation, mais la fiabilité de leurs prédictions n'est pas optimale en particulier

pour les propriétés écologiques (Chapitre 2). L'utilisation de critères du milieu, des pratiques et/ou de la végétation (espèces, indices d'Ellenberg) en plus des typologies permet de maximiser les qualités de prédiction. Les typologies permettent donc d'estimer de nombreuses propriétés agroécologiques et de créer un échange entre agriculteurs et conseillers, mais il ne faut pas surestimer leurs capacités et ne pas oublier qu'elles estiment des potentiels et non des valeurs réelles.

Conclusion

L'objectif de cette thèse était de mieux comprendre les critères déterminant des propriétés agroécologiques des prairies permanentes, et d'évaluer leur potentiel prédictif en prenant le modèle du massif vosgien. Les critères peuvent être liés au milieu (sol, climat, paysage), aux pratiques agricoles (mode d'utilisation, intensification) et à la végétation (espèces, types prairiaux et indices d'Ellenberg).

Mes résultats montrent que la composition botanique des prairies est principalement prédictible par le milieu (sol, climat et paysage), mais pas par les pratiques qui ne prédisent que 1 % de la composition botanique. Malgré l'utilisation de nombreux critères prédictifs, seule 30 % de la variabilité des compositions botaniques est prédictible. Les propriétés agroécologiques sont principalement prédites par des critères du sol et la végétation. La végétation peut être utilisée pour cette prédiction sous forme de présence ou d'abondance d'espèces, via les typologies de prairies et/ou via les indices d'Ellenberg. Cependant, les critères prédictifs peuvent être rattachés à trois effets principaux, tous nécessaires à la prédiction des propriétés : l'effet altitude, l'effet texture et l'effet des pratiques. Ainsi, même si les critères des pratiques sont peu présents, des critères du sol (teneur en éléments nutritifs) et de la végétation (espèces indicatrices) expriment indirectement l'effet des pratiques agricoles sur les propriétés agroécologiques. Lorsque les typologies sont utilisées comme seuls critères prédictifs, les propriétés écologiques ne peuvent pas être prédites de façon fiable, mais il est possible de prédire correctement les propriétés agronomiques et l'environnement des prairies. Une seule prairie ne peut pas fournir toutes les propriétés : elle peut soit fournir un fourrage de haute qualité nutritive, soit un fourrage en quantité et hébergeant une forte biodiversité générale, soit produire un fourrage souple à exploiter et hébergeant une forte diversité en espèces oligotrophiles. La prédiction de ces classes de compromis est très fiable et permise par les pratiques agricoles, le sol et la végétation. De nombreux outils peuvent être utilisés pour transmettre ces nouvelles connaissances aux acteurs de terrain. Les typologies ont l'avantage de pouvoir répondre à de nombreuses attentes tout en étant simple d'utilisation. Cependant, elles présentent des limites : en particulier, elles ne prennent pas en compte les aléas climatiques annuels, et estiment donc seulement des potentiels. Il peut donc être utile de les associer à d'autres outils pour permettre une réponse optimale aux attentes des agriculteurs et de leurs conseillers.

Mes résultats montrent plus particulièrement que la majorité des propriétés agroécologiques peuvent être prédites précisément par des critères des pratiques, du milieu et de la végétation. La comparaison des pouvoirs prédictifs des différentes méthodes de typologies des prairies (phytosociologie, agronomie, fonctionnelle) montre de grande disparités selon les propriétés, et que combiner ces méthodes permet souvent d'améliorer significativement la qualité des prédictions. Enfin, il est indispensable de faire des compromis entre production agricole et conservation de la biodiversité : la production d'un fourrage de qualité nutritive élevée en particulier se fait au détriment de la biodiversité, mais rendement et biodiversité peuvent être compatibles. Les synergies et antagonismes entre propriétés peuvent être prédits précisément grâce à des connaissances des pratiques agricoles, du sol et de la végétation. Les innovations majeures de cette thèse sont donc la prédiction fiable de nombreuses propriété agroécologiques, la démonstration du potentiel des combinaisons de typologies de prairies pour la prédiction des propriétés, et la mise en avant des compromis entre propriétés et des critères pouvant les prédire.

Cette thèse se base principalement sur 58 prairies du massif vosgien, sélectionnées parmi un échantillon de près de 800 prairies ayant été suivies lors de précédentes études. Bien que ne pouvant représenter toute la diversité des prairies du massif, la sélection représente la majorité des prairies. Cependant, le massif vosgien ne permet pas des productions intensives et tous les résultats ne peuvent donc pas être étendus à l'échelle de la France. De plus, il existe de fortes corrélations entre critères prédictifs, ce qui explique la sélection de certains critères bien qu'ils n'aient que peu d'effets directs sur la végétation. Par exemple, les teneurs en aluminium et en calcium sont de bons prédicteurs des compositions botaniques ou des propriétés agroécologiques, mais ils sont des témoins de l'acidité du sol, elle-même liée à la texture et à la disponibilité des éléments du sol. Les critères prédictifs montrent donc des corrélations avec les propriétés, mais des études plus précises sont nécessaires pour montrer de réels liens de cause à effet.

Les résultats de cette thèse pourraient être complétés par une plus grande diversité de prairies, en particulier par des prairies intensifiées de basse altitude. De même, intégrer de nouvelles propriétés agroécologiques pourrait permettre de créer de nouvelles synergies entre agronomie et écologie, en particulier la valeur du fourrage pour la qualité des produits laitiers et carnés et les coûts de production. Enfin, le suivi de la croissance et de l'évolution de la qualité fourragère à travers une saison complète, du printemps à l'automne, permettrait d'affiner les mesures des propriétés agroécologiques et de mieux répondre aux attentes des agriculteurs et de leurs conseillers.

Enfin, un travail est encore nécessaire pour intégrer les résultats de cette thèse dans des outils utilisables par les acteurs de terrain. Cependant, avoir des outils ne suffit pas : il est nécessaire de former les conseillers à utiliser et transmettre ces outils, et d'accompagner les agriculteurs dans le long terme pour faire face aux importants changements climatiques et répondre aux nouvelles attentes des consommateurs.

BIBLIOGRAPHIE

Åby, B.A., Randby, Å.T., Bonesmo, H., Aass, L., 2019. Impact of grass silage quality on greenhouse gas emissions from dairy and beef production. Grass Forage Sci gfs.12433. https://doi.org/10.1111/gfs.12433

AGRESTE, 2020. AGRESTE Données en ligne [WWW Document]. URL https://stats.agriculture.gouv.fr/disar-web/accueil.disar

AGRESTE, 2017. Cultures Fourragères [WWW Document]. URL http://agreste.agriculture.gouv.fr/donnees-de-synthese/statistique-agricole-annuelle-saa/ (accessed 6.13.17).

AGRESTE, 2013. L'agriculture du Massif des Vosges. AGRESTE Massif des Vosges.

Al Haj Khaled, R., Duru, M., Decruyenaere, V., Jouany, C., Cruz, P., 2006. Using Leaf Traits to Rank Native Grasses According to Their Nutritive Value. Rangeland Ecology & Management 59, 648–654. https://doi.org/10.2111/05-031R2.1

Alon, M., Sternberg, M., 2019. Effects of extreme drought on primary production, species composition and species diversity of a Mediterranean annual plant community. J Veg Sci 30, 1045–1061. https://doi.org/10.1111/jvs.12807

Amiaud, B., Pervanchon, F., Plantureux, S., 2005. An expert model for predicting species richness in grasslands: flora-predict. Presented at the 13. International Occasional Symposium of the European Grassland Federation, European Grassland Federation, pp. 103–106.

Anderson, W.J., Ridler, B.J., 2017. The effect of dairy farm intensification on farm operation, economics and risk: a marginal analysis. Animal Production Science 57, 1350. https://doi.org/10.1071/AN16457

Andueza, D., Cruz, P., Farruggia, A., Baumont, R., Picard, F., Michalet-Doreau, B., 2010. Nutritive value of two meadows and relationships with some vegetation traits. Grass and Forage Science 65, 325–334. https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2010.00750.x

Andueza, D., Rodrigues, A.M., Picard, F., Rossignol, N., Baumont, R., Cecato, U., Farruggia, A., 2015. Relationships between botanical composition, yield and forage quality of permanent grasslands over the first growth cycle. Grass and Forage Science 71, 366–378. https://doi.org/10.1111/gfs.12189

Ansquer, P., Al Haj Khaled, R., Cruz P, P., Theau, J.P., Therond, O., Duru, M., 2009a. Characterizing and predicting plant phenology in species-rich grasslands. Grass and Forage Science 64, 57–70. https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2008.00670.x

Ansquer, P., Duru, M., Theau, J.P., Cruz, P., 2009b. Convergence in plant traits between species within grassland communities simplifies their monitoring. Ecological Indicators 9, 1020–1029. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2008.12.002

Arnott, G., Ferris, C.P., O'Connell, N.E., 2017. Review: welfare of dairy cows in continuously housed and pasture-based production systems. Animal 11, 261–273. https://doi.org/10.1017/S1751731116001336

Arrouays, D., Balesdent, J., Germon, J.C., Jayet, P.A., Soussana, J.F., Stegel, P., 2002. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?

Arroyo-Lopez, C., Manolaraki, F., Saratsis, A., Saratsi, K., Stefanakis, A., Skampardonis, V., Voutzourakis, N., Hoste, H., Sotiraki, S., 2014. Anthelmintic effect of carob pods and sainfoin hay when fed to lambs after experimental trickle infections with *Haemonchus contortus* and *Trichostrongylus colubriformis*. Parasite 21, 71. https://doi.org/10.1051/parasite/2014074

Aviron, S., Jeanneret, P., Schüpbach, B., Herzog., F., 2007. Effects of agri-environmental measures, site and landscape conditions on butterfly diversity of Swiss grassland.

Agriculture, Ecosystems & Environment 122, 295–304. https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.12.035
Bagella, S., Roggero, P.P., 2004. Integrating phytosociological and agronomic analysis to support the sustainable management of Mediterranean grasslands. Fitosociologia 41, 101–107.
Bareille, N., Haurat, M., Delaby, L., Michel, L., Guatteo, R., 2019. Quels sont les avantages et risques du pâturage vis-à-vis de la santé des bovins ? Fourrages 238, 125–131.
Barton, K., 2018. MuMIn: Multi-Model Inference.
Baumont, R., 1996. Palatabilité et comportement alimentaire chez les ruminants. INRA Productions Animales 9, 349–358.
Bayeur, C., Kleiber, F., L'Hospitalier, M., Loridat, F., Plantureux, S., 2013. Typologie des prairies permanentes Vosges du Nord et Vosges Mosellanes : guide technique 2013.
Becker, T., Kayser, M., Tonn, B., Isselstein, J., 2018. How German dairy farmers perceive advantages and disadvantages of grazing and how it relates to their milk production systems. Livestock Science 214, 112–119. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2018.05.018
Bello, F. de, Lavergne, S., Meynard, C.N., Lepš, J., Thuiller, W., 2010. The partitioning of diversity: showing Theseus a way out of the labyrinth. Journal of Vegetation Science 21, 992–1000.
Berg, Å., Gustafson, T., 2007. Meadow management and occurrence of corncrake Crex crex. Agriculture, Ecosystems & Environment 120, 139–144. https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.08.009
Bernal, R., Bacon, C.D., Balslev, H., Hoorn, C., Bourlat, S.J., Tuomisto, H., Salamanca, S., Manen, M.T., Romero, I., Sepulchre, P., Antonelli, A., 2019. Could coastal plants in western Amazonia be relicts of past marine incursions? J Biogeogr 46, 1749–1759. https://doi.org/10.1111/jbi.13560
Binder, S., Isbell, F., Polasky, S., Catford, J.A., Tilman, D., 2018. Grassland biodiversity can pay. Proc Natl Acad Sci USA 115, 3876–3881. https://doi.org/10.1073/pnas.1712874115
Black, T.A., Chen, W.J., Barr, A.G., Arain, M.A., Chen, Z., Nesic, Z., Hogg, E.H., Neumann, H.H., Yang, P.C., 2000. Increased carbon sequestration by a boreal deciduous forest in years with a warm spring. Geophysical Research Letter 27, 1271–1274.
Blaize, D., 2018. Guide des analyses en pédologie, Quae. ed, Savoir-faire. Versailles Cedex.
Bolton, J., 1977. Changes in soil pH and exchangeable calcium in two liming experiments on contrasting soils over 12 years. J. Agric. Sci. 89, 81–86. https://doi.org/10.1017/S0021859600027210
Bonis, A., Bouzillé, J.-B., Dausse, A., Dia, A., Hénin, O., Bouhnik-Le Coz, M., 2008. Fertilisation et qualité de l'eau en prairies naturelles humides (marais de l'Ouest). Fourrages 196, 485–489.
Boob, M., Truckses, B., Seither, M., Elsäßer, M., Thumm, U., Lewandowski, I., 2019. Management effects on botanical composition of species-rich meadows within the Natura 2000 network. Biodiversity and Conservation 28, 729–750. https://doi.org/10.1007/s10531-018-01689-1
Borcard, D., Gillet, F., Legendre, P., 2018. Numerical Ecology with R, Second. ed, Use R! Springer International Publishing, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71404-2
Borer, E.T., Grace, J.B., Harpole, W.S., MacDougall, A.S., Seabloom, E.W., 2017. A decade of insights into grassland ecosystem responses to global environmental change. Nature Ecology & Evolution 1, 0118. https://doi.org/10.1038/s41559-017-0118
Bornard, A., Dubost, M., 1992. Diagnostic agro-écologique de la végétation des alpages laitiers des Alpes du Nord humides : établissement et utilisation d'une typologie simplifiée. Agronomie 12, 581–599. https://doi.org/10.1051/agro:19920802

Botta-Dukát, Z., 2005. Rao's quadratic entropy as a measure of functional diversity based on multiple traits. Journal of Vegetation Science 16, 533–540. https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2005.tb02393.x

Bourdôt, G.W., Saville, D.J., Crone, D., 2003. Dairy production revenue losses in New Zealand due to giant buttercup (*Ranunculus acris*). New Zealand Journal of Agricultural Research 46, 295–303. https://doi.org/10.1080/00288233.2003.9513557

Boutin, M., Corcket, E., Alard, D., Villar, L., Jiménez, J.-J., Blaix, C., Lemaire, C., Corriol, G., Lamaze, T., Pornon, A., 2017. Nitrogen deposition and climate change have increased vascular plant species richness and altered the composition of grazed subalpine grasslands. Journal of Ecology 105, 1199–1209. https://doi.org/10.1111/1365-2745.12743

Bovolenta, S., Romanzin, A., Corazzin, M., Spanghero, M., Aprea, E., Gasperi, F., Piasentier, E., 2014. Volatile compounds and sensory properties of Montasio cheese made from the milk of Simmental cows grazing on alpine pastures. Journal of Dairy Science 97, 7373–7385. https://doi.org/10.3168/jds.2014-8396

Boyd, J., Banzhaf, S., 2007. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. Ecological Economics 63, 616–626. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.01.002

Braun-Blanquet, J., 1964. Pflanzensoziologie. Springer Vienna, Vienna. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-8110-2

Breiman, L., Cutler, A., Liaw, A., Wiener, M., 2018. randomForest : Breiman and Cutler's Random Forests for Classification and Regression.

Breshears, D.D., Barnes, F.J., 1999. Interrelationships between plant functional types and soil moisture heterogeneity for semiarid landscapes within the grassland/forest continuum: a unified conceptual model. Landscape Ecology 14, 465–478.

Brossier, J., Brun, A., Deffontaines, J.-P., Fiorelli, J.-L., Osty, P.-L., Petit, M., Roux, M., 2008. Pays, paysans, paysages : trente ans après. Courrier de l'environnement de l'INRA 55, 111–123.

Brossier, J., Teissier, J.-H., Brun, A., Roux, M., Bonnemaire, J., 1995. Pays, paysans, paysage dans les Vosges du sud, 2ième édition. ed. Quae.

Brown, C., Cahill, J.F., 2019. Vertical size structure is associated with productivity and species diversity in a short-stature grassland: Evidence for the importance of height variability within herbaceous communities. J Veg Sci jvs.12785. https://doi.org/10.1111/jvs.12785

Brunbjerg, A.K., Bruun, H.H., Dalby, L., Fløjgaard, C., Frøslev, T.G., Høye, T.T., Goldberg, I., Læssøe, T., Hansen, M.D.D., Brøndum, L., Skipper, L., Fog, K., Ejrnæs, R., 2018. Vascular plant species richness and bioindication predict multi-taxon species richness. Methods in Ecology and Evolution 9, 2372–2382. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13087

Bruun, H.H., Fritzbøger, B., Rindel, P.O., Hansen, U.L., 2001. Plant species richness in grasslands: the relative importance of contemporary environment and land-use history since the Iron Age. Ecography 24, 569–578.

Buchin, S., Martin, B., Dupont, D., Bornard, A., Achilleos, C., 1999. Influence of the composition of Alpine highland pasture on the chemical, rheological and sensory properties of cheese. Journal of Dairy Research 66, 579–588. https://doi.org/10.1017/S0022029999003842

Bullock, J.M., Franklin, J., Stevenson, M.J., Silvertown, J., Silvertown, J., Coulson, S.J., Gregory, S.J., Tofts, R., 2001. A plant trait analysis of responses to grazing in a long-term experiment. J Appl Ecology 38, 253–267. https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2001.00599.x

Bullock, J.M., Hill, B.C., Dale, M.P., Silvertown, J., 1994. An Experimental Study of the Effects of Sheep Grazing on Vegetation Change in a Species-Poor Grassland and the Role of Seedling Recruitment Into Gaps. The Journal of Applied Ecology 31, 493. https://doi.org/10.2307/2404445

Bullock, J.M., Pakeman, R.J., 1977. Grazing of lowland heath in England: management methods and their effects on heathland vegetation. Biological Conservation 1–13.

Bullock, J.M., Pywell, R.F., Walker, K.J., 2006. Long-term enhancement of agricultural production by restoration of biodiversity: Restoring biodiversity enhances production. Journal of Applied Ecology 44, 6–12. https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01252.x

Bumane, S., 2010. The influence of NPK fertilization on Lolium perenne L. forage quality. Agronomy Research 8, 531–536.

Bureau, D., 2010. Les « PSE » : des rémunérations pour les services environnementaux. Conseil Economique pour le Developpement Durable 1–8.

Burnham, K.P., Anderson, D.R., 2002. Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach, 2nd ed. ed. Springer, New York.

Burst, M., Chauchard, S., Dupouey, J.-L., Amiaud, B., 2017. Interactive effects of land-use change and distance-to-edge on the distribution of species in plant communities at the forest-grassland interface. Journal of Vegetation Science. https://doi.org/10.1111/jvs.12501

Butler, G., Nielsen, J.H., Slots, T., Seal, C., Eyre, M.D., Sanderson, R., Leifert, C., 2008. Fatty acid and fat-soluble antioxidant concentrations in milk from high- and low-input conventional and organic systems: seasonal variation. J. Sci. Food Agric. 88, 1431–1441. https://doi.org/10.1002/jsfa.3235

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. https://doi.org/10.1016/0377-8401(95)00885-3

Cadotte, M.W., Tucker, C.M., 2017. Should Environmental Filtering be Abandoned? Trends in Ecology & Evolution 32, 429–437. https://doi.org/10.1016/j.tree.2017.03.004

Calanca, P., 2007. Climate change and drought occurrence in the Alpine region: How severe are becoming the extremes? Global and Planetary Change 57, 151–160. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.001

Cannone, N., Sgorbati, S., Guglielmin, M., 2007. Unexpected impacts of climate change on alpine vegetation. Frontiers in Ecology and the Environment 5, 360–364. https://doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[360:UIOCCO]2.0.CO;2

Carol Adair, E., Hooper, D.U., Paquette, A., Hungate, B.A., 2018. Ecosystem context illuminates conflicting roles of plant diversity in carbon storage. Ecology Letters 21, 1604–1619. https://doi.org/10.1111/ele.13145

Carrère, P., Seytre, L., Piquet, M., Landrieaux, J., Rivière, J., Chabalier, C., Orth, D., 2012. Une typologie multifonctionnelle des prairies des systèmes laitiers AOP du Massif central combinant des approches agronomiques et écologiques. Fourrages 209, 9–21.

Castillo, C., Pereira, V., Abuelo, Á., Hernández, J., 2013. Effect of Supplementation with Antioxidants on the Quality of Bovine Milk and Meat Production. The Scientific World Journal 2013, 1–8. https://doi.org/10.1155/2013/616098

Caves, E.M., Green, P.A., Zipple, M.N., Peters, S., Johnsen, S., Nowicki, S., 2018. Categorical perception of colour signals in a songbird. Nature 560, 365–367. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0377-7

Ceulemans, T., Merckx, R., Hens, M., Honnay, O., 2011. A trait-based analysis of the role of phosphorus vs. nitrogen enrichment in plant species loss across North-west European

grasslands. Journal of Applied Ecology 48, 1155–1163. https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02023.x
Chambaz, A., Scheeder, M.R.L., Kreuzer, M., Dufey, P.-A., 2003. Meat quality of Angus, Simmental, Charolais and Limousin steers compared at the same intramuscular fat content. Meat Science 63, 491–500. https://doi.org/10.1016/S0309-1740(02)00109-2
Chambre d'Agriculture des Deux-Sèvres, 2018. Prix des fourrages et aliments [WWW Document]. URL https://deux-sevres.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Nouvelle-Aquitaine/103_Inst-Deux-Sevres/Documents/Technique_innovation/Productions_animales/ValeurAlim2018.xlsm
Chambre d'agriculture Grand Est, 2020. Observatoire de la pousse de l'herbe [WWW Document]. URL https://grandest.chambre-agriculture.fr/productions-agricoles/herbe-et-prairies/observatoire-de-la-pousse-de-lherbe/ (accessed 3.4.20).
Chantre, É., Le Bail, M., Cerf, M., 2014. Une diversité de configurations d'apprentissage en situation de travail pour réduire l'usage des engrais et pesticides agricoles. activites 11. https://doi.org/10.4000/activites.1061
Chapman, D.F., Rawnsley, R.P., Cullen, B.R., Clark, D.A., 2013. Inter-annual variability in pasture herbage accumulation in temperate dairy regions: causes, consequences, and management tools 8.
Chauvin, A., 2009. Le risque parasitaire au pâturage et sa maîtrise. Fourrages 199, 255–264.
Chen, H., Mommer, L., van Ruijven, J., de Kroon, H., Fischer, C., Gessler, A., Hildebrandt, A., Scherer-Lorenzen, M., Wirth, C., Weigelt, A., 2017. Plant species richness negatively affects root decomposition in grasslands. Journal of Ecology 105, 209–218. https://doi.org/10.1111/1365-2745.12650
Cherney, D.J.R., Cherney, J.H., 1997. Grass Forage Quality and Digestion Kinetics as Influenced by Nitrogen Fertilization and Maturity. Journal of Applied Animal Research 11, 105–120. https://doi.org/10.1080/09712119.1997.9706170
Chytrý, M., 2001. Phytosociological data give biased estimates of species richness. Journal of Vegetation Science 12, 441–444. https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2001.tb00190.x
Chytrý, M., Hejcman, M., Hennekens, S.M., Schellberg, J., 2009. Changes in vegetation types and Ellenberg indicator values after 65 years of fertilizer application in the Rengen Grassland Experiment, Germany. Applied Vegetation Science 12, 167–176. https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2009.01011.x
Ciais, Ph., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ogée, J., Allard, V., Aubinet, M., Buchmann, N., Bernhofer, Chr., Carrara, A., Chevallier, F., De Noblet, N., Friend, A.D., Friedlingstein, P., Grünwald, T., Heinesch, B., Keronen, P., Knohl, A., Krinner, G., Loustau, D., Manca, G., Matteucci, G., Miglietta, F., Ourcival, J.M., Papale, D., Pilegaard, K., Rambal, S., Seufert, G., Soussana, J.F., Sanz, M.J., Schulze, E.D., Vesala, T., Valentini, R., 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. Nature 437, 529–533. https://doi.org/10.1038/nature03972
Clark, A.T., Turnbull, L.A., Tredennick, A., Allan, E., Harpole, W.S., Mayfield, M.M., Soliveres, S., Barry, K., Eisenhauer, N., de Kroon, H., Rosenbaum, B., Wagg, C., Weigelt, A., Feng, Y., Roscher, C., Schmid, B., 2019. Predicting species abundances in a grassland biodiversity experiment: Trade-offs between model complexity and generality. J Ecol 1365-2745.13316. https://doi.org/10.1111/1365-2745.13316
Clark, C.M., Tilman, D., 2008. Loss of plant species after chronic low-level nitrogen deposition to prairie grasslands. Nature 451, 712–715. https://doi.org/10.1038/nature06503
Clausen, M.R., Connolly, C., Skibsted, L.H., Stagsted, J., 2010. Oxidative stability of bovine milk determined by individual variability in herd irrespective of selenium status. International Dairy Journal 20, 507–513. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2010.02.010

Collectif, 2006. Le Massif Vosgien : Typologie des Prairies Naturelles.
Collomb, M., Bütikofer, U., Sieber, R., Jeangros, B., Bosset, J.-O., 2002. Correlation between fatty acids in cows' milk fat produced in the Lowlands, Mountains and Highlands of Switzerland and botanical composition of the fodder. International Dairy Journal 12, 661–666. https://doi.org/10.1016/S0958-6946(02)00062-6
Commissariat général au développement durable, 2016. EFESE- L'essentiel du cadre conceptuel.
Concepción, E.D., Díaz, M., Kleijn, D., Báldi, A., Batáry, P., Clough, Y., Gabriel, D., Herzog, F., Holzschuh, A., Knop, E., Marshall, E.J.P., Tscharntke, T., Verhulst, J., 2012. Interactive effects of landscape context constrain the effectiveness of local agri-environmental management: Landscape constrains the effectiveness of local management. Journal of Applied Ecology 49, 695–705. https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2012.02131.x
Čop, J., Vidrih, M., 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. https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2009.00713.x
Copernicus, 2018. Corine Land Cover.
Corona, M.E.P., Aldana, B.R.V.D., Criado, B.G., Ciudad, A.G., 1998. Variations in Nutritional Quality and Biomass Production of Semiarid Grasslands. Journal of Range Management 51, 570. https://doi.org/10.2307/4003378
Cousins, S.A.O., 2009. Landscape history and soil properties affect grassland decline and plant species richness in rural landscapes. Biological Conservation 142, 2752–2758. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.07.001
Cox, D.R., Snell, E.J., 1989. The Analysis of Binary Data, 2nd ed., Chapman and Hall. ed. London.
Craine, J.M., Froehle, J., Tilman, D.G., Wedin, D.A., Chapin, III, F.S., 2001. The relationships among root and leaf traits of 76 grassland species and relative abundance along fertility and disturbance gradients. Oikos 93, 274–285. https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2001.930210.x
Cristofari, H., Girard, N., Magda, D., 2018. How agroecological farmers develop their own practices: a framework to describe their learning processes. Agroecology and Sustainable Food Systems 42, 777–795. https://doi.org/10.1080/21683565.2018.1448032
Critchley, C.N.R., Chambers, B.J., Fowbert, J.A., Sanderson, R.A., Bhogal, A., Rose, S.C., 2002. Association between lowland grassland plant communities and soil properties. Biological Conservation 105, 199–215.
Critchley, C.N.R., Fowbert, J.A., Wright, B., 2007. Dynamics of species-rich upland hay meadows over 15 years and their relation with agricultural management practices. Applied Vegetation Science 10, 307–314. https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2007.tb00429.x
Croissant, A.E., Washburn, S.P., Dean, L.L., Drake, M.A., 2007. Chemical Properties and Consumer Perception of Fluid Milk from Conventional and Pasture-Based Production Systems. Journal of Dairy Science 90, 4942–4953. https://doi.org/10.3168/jds.2007-0456
Croissant, Y., 2015. Multinomial logit model.
Cruz, P., Lezana, L., Durante, M., Jaurena, M., Figari, M., Bittencourt, L., Theau, J.-P., Massa, E., Viegas, J., Ferreira de Quadros, F.L., 2019. A functional classification of 63 common Poaceae in the "Campos" grasslands of South America. Ecol. Austral 29, 239–248. https://doi.org/10.25260/EA.19.29.2.0.727

Cruz, P., Theau, J.P., Lecloux, E., Jouany, C., Duru, M., 2010. Typologie fonctionnelle de graminées fourragères pérennes: une classification multitraits. Fourrages 201, 11–17.
Csárdi, G., 2020. igraph.
Daget, P., Poissonet, J., 1972. Un procédé d'estimation de la valeur pastorale des pâturages. Fourrages 49, 31–39.
Daget, P., Poissonet, J., 1971. Une méthode d'analyse phytosociologique des prairies. Annales Agronomiques 22, 5–41.
Dai, X., 2000. Impact of cattle dung deposition on the distribution pattern of plant species in an alvar limestone grassland. Journal of Vegetation Science 11, 715–724.
Dale, A.J., Laidlaw, A.S., McGettrick, S., Gordon, A., Ferris, C.P., 2018. The effect of grazing intensity on the performance of high-yielding dairy cows. Grass and Forage Science. https://doi.org/10.1111/gfs.12350
Davies, D.M., Graves, J.D., Elias, C.O., Williams, P.J., 1997. The impact of Rhinanthus spp. on sward productivity and composition: Implications for the restoration of species-rich grasslands. Biological Conservation 82, 87–93. https://doi.org/10.1016/S0006-3207(97)00010-4
de Almeida Campos Cordeiro, A., Neri, A.V., 2019. Spatial patterns along an elevation gradient in high altitude grasslands, Brazil. Nordic Journal of Botany 37. https://doi.org/10.1111/njb.02065
De Deyn, G.B., Cornelissen, J.H.C., Bardgett, R.D., 2008. Plant functional traits and soil carbon sequestration in contrasting biomes. Ecology Letters 11, 516–531. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01164.x
De Long, J.R., Fry, E.L., Veen, G.F., Kardol, P., 2019a. Why are plant-soil feedbacks so unpredictable, and what to do about it? Functional Ecology 33, 118–128. https://doi.org/10.1111/1365-2435.13232
De Long, J.R., Jackson, B.G., Wilkinson, A., Pritchard, W.J., Oakley, S., Mason, K.E., Stephan, J.G., Ostle, N.J., Johnson, D., Baggs, E.M., Bardgett, R.D., 2019b. Relationships between plant traits, soil properties and carbon fluxes differ between monocultures and mixed communities in temperate grassland. Journal of Ecology. https://doi.org/10.1111/1365-2745.13160
De Stefano, A., Jacobson, M.G., 2017. Soil carbon sequestration in agroforestry systems: a meta-analysis. Agroforestry Systems 92, 285–299. https://doi.org/10.1007/s10457-017-0147-9
Delaby, L., 2014. L'autonomie alimentaire en élevage laitier, in: Quels enjeux pour l'emploi, le revenu et l'environnement ? Presented at the Renforcer le lien au sol des élevages bretons, Pontivy, France, pp. 4–9.
Delaby, L., O'Donovan, M., Horan, B., 2017. En Irlande : "Grazing is good for you." Fourrages 230, 115–122.
Deléglise, C., Meisser, M., Mosimann, E., Spiegelberger, T., Signarbieux, C., Jeangros, B., Buttler, A., 2015. Drought-induced shifts in plants traits, yields and nutritive value under realistic grazing and mowing managements in a mountain grassland. Agriculture, Ecosystems & Environment 213, 94–104. https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.07.020
Dengler, J., Chytrý, M., Ewald, J., 2008. Phytosociology, in: Encyclopedia of Ecology. Elsevier, pp. 2767–2779. https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00533-4
Deroche, B., Pradel, P., Baumont, R., 2020. Long-term evolution and prediction of feed value for permanent mountain grassland hay: Analysis of a 32-year data set in relation to climate change. Grass Forage Sci 75, 18–27. https://doi.org/10.1111/gfs.12465
Descalzo, A.M., Sancho, A.M., 2008. A review of natural antioxidants and their effects on oxidative status, odor and quality of fresh beef produced in Argentina. Meat Science 79, 423–436. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.12.006

Desmonière, E., Delaby, L., Pavie, J., 2019. Méthodologie de création de l'Observatoire national de la pousse de l'herbe. Fourrages 240, 289–294.

Diaz, S., Noy-Meir, I., Cabido, M., 2001. Can grazing response of herbaceous plants be predicted from simple vegetative traits? J Appl Ecology 38, 497–508. https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2001.00635.x

Diekmann, M., 2003. Species indicator values as an important tool in applied plant ecology – a review. Basic and Applied Ecology 4, 493–506. https://doi.org/10.1078/1439-1791-00185

Dignac, M.-F., Derrien, D., Barré, P., Barot, S., Cécillon, L., Chenu, C., Chevallier, T., Freschet, G.T., Garnier, P., Guenet, B., Hedde, M., Klumpp, K., Lashermes, G., Maron, P.-A., Nunan, N., Roumet, C., Basile-Doelsch, I., 2017. Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review. Agronomy for Sustainable Development 37. https://doi.org/10.1007/s13593-017-0421-2

Diquélou, S., Leconte, D., Simon, J.C., 2003. Diversité floristique des prairies permanentes de Basse Normandie (synthèse des travaux antérieurs). Fourrages 173, 3–22.

Dobremez, L., Borg, D., 2015. L'agriculture en montagne. Evolution 1988-2010 d'après les recensements agricoles, Agreste Les Dossiers. Irstea.

Dobremez, L., Chazoule, C., Loucougaray, G., Pauthenet, Y., Nettier, B., Lavorel, S., Madelrieux, S., Doré, A., Fleury, P., 2015. Débats et controverses sur l'intensification fourragère dans le Vercors: quelles pratiques et quelles conceptions en jeu. Fourrages 221, 33–45.

Dodd, M.B., Lauenroth, W.K., 1997. The influence of soil texture on the soil water dynamics and vegetation structure of a shortgrass steppe ecosystem. Plant Ecology 133, 13–28.

Don, A., Scholten, T., Schulze, E.-D., 2009. Conversion of cropland into grassland: Implications for soil organic-carbon stocks in two soils with different texture. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 172, 53–62. https://doi.org/10.1002/jpln.200700158

Dong, R.L., Zhao, G.Y., Chai, L.L., Beauchemin, K.A., 2014. Prediction of urinary and fecal nitrogen excretion by beef cattle. Journal of Animal Science 92, 4669–4681. https://doi.org/10.2527/jas.2014-8000

Dormann, C.F., 2007. Effects of incorporating spatial autocorrelation into the analysis of species distribution data. Global Ecol Biogeography 16, 129–138. https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2006.00279.x

D'Ottavio, P., Francioni, M., Trozzo, L., Sedić, E., Budimir, K., Avanzolini, P., Trombetta, M.F., Porqueddu, C., Santilocchi, R., Toderi, M., 2017. Trends and approaches in the analysis of ecosystem services provided by grazing systems: A review. Grass and Forage Science 73, 15–25. https://doi.org/10.1111/gfs.12299

Du, Y., Zhou, G., Guo, X., Cao, G., 2019. Spatial distribution of grassland soil organic carbon and potential carbon storage on the Qinghai Plateau. Grassland Science. https://doi.org/10.1111/grs.12229

Dubuis, A., Giovanettina, S., Pellissier, L., Pottier, J., Vittoz, P., Guisan, A., 2013. Improving the prediction of plant species distribution and community composition by adding edaphic to topo-climatic variables. J Veg Sci 24, 593–606. https://doi.org/10.1111/jvs.12002

Duckworth, J.C., Bunce, R.G.H., Malloch, A.J.C., 2000. Modelling the potential effects of climate change on calcareous grasslands in Atlantic Europe. J Biogeography 27, 347–358. https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2000.00400.x

Dumont, B., Farruggia, A., Garel, J.-P., Bachelard, P., Boitier, E., 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. https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2008.00674.x

Dumont, B., Rook, A.J., Coran, Ch., 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. https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2007.00572.x

Dumont, B., Ryschawy, J., Duru, M., Benoit, M., Chatellier, V., Delaby, L., Donnars, C., Dupraz, P., Lemauviel-Lavenant, S., Méda, B., Vollet, D., Sabatier, R., 2018. Review: Associations among goods, impacts and ecosystem services provided by livestock farming. animal 1–12. https://doi.org/10.1017/S1751731118002586

Durante, M., Lezana, L., Massa, E., Figari, M., Lezama, F., Jaurena, M., Cruz, P., 2012. A first attempt to classify in functional groups grasses of Entre Rios (Argentina) and Uruguay. Presented at the International Symposium on Integrated Crop-Livestock Systems, Porto Alegre, Brasil, p. 4.

Duren, I.C.V., Pegtel, D.M., 2000. Nutrient limitations in wet, drained and rewetted fen meadows: evaluation of methods and results. Plant and Soil 220, 35–47.

Duru, M., Bossuet, L., 1992. Estimation de la masse d'herbe par le "sward-stick". Premiers résultats. Fourrages 131, 283–300.

Duru, M., Cruz, P., Jouany, C., Theau, J.-P., 2010. Herb'type© : un nouvel outil pour évaluer les services de production fournis par les prairies permanentes. INRA Productions Animales 23, 319–332.

Ebrahimzadeh, M.A., Eslami, S., Nabavi, S.M., Nabavi, S.F., Eslami, B., 2010. Antioxidant and Antihemolytic Activities of *Leontodon Hispidus*. Biotechnology & Biotechnological Equipment 24, 2127–2131. https://doi.org/10.2478/V10133-010-0090-7

Edelblutte, S., 2003. Géohistoire des paysages industriels d'une vallée vosgienne. L'exemple de la Haute vallée de la Moselotte à la Bresse. Revue géographique de l'Est 43, 95–108.

Edwards, C.A. (Ed.), 2004. Earthworm ecology, 2nd ed. ed. CRC Press.

Ellenberg, H., Mueller-Dombois, D., 1966. Tentative physiognomic-ecological classification of plant formations of the Earth [based on a discussion draft of the UNESCO working group on vegetation classification and mapping.]. Berichte des Geobotanischen Institutes der Eidg. Techn. Hochschule 37, 21–55.

Ellenberg, H., Weber, H.E., Düll, R., Wirth, V., Werner, W., Paulissen, D., 1992. Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa, Scripta Geobotanica.

Emile, J.C., Barre, P., Delagarde, R., Novak, S., 2017. Les arbres, une ressource fourragère au pâturage pour des bovins laitiers ? Fourrages 155–160.

Eurostat, 2017. Permanent grassland: number of farms and areas by agricultural size of farm (UAA) and size of permanent grassland area.

Eze, S., Palmer, S.M., Chapman, P.J., 2018. Soil organic carbon stock in grasslands: Effects of inorganic fertilizers, liming and grazing in different climate settings. Journal of Environmental Management 223, 74–84. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.013

Farm Animal Welfare Council, 1993. Report on Priorities for Animal Welfare Research and Development. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, UK.

Farruggia, A., Martin, B., Baumont, R., Prache, S., Doreau, M., Hoste, H., Durand, D., 2008. Quels intérêts de la diversité floristique des prairies permanentes pour les ruminants et les produits animaux. INRA Productions Animales 21, 181–200.

Ferlay, A., Glasser, F., Martin, B., Andueza, D., 2011. Effects of Feeding Factors and Breed on Cow Milk Fatty Acid Composition: Recent Data. Bulletin UASVM Agriculture 68, 266–273. https://doi.org/10.15835/buasvmcn-agr:6568

Ferrez, Y., Cholet, J., Dor, J.-C., Dupont, F., Froehlicher, T., Giovannacci, L., Hennequin, C., Laumond, J.-S., L'Hospitalier, M., Nguefack, J., Simler, N., Voirin, M., 2017. Guide

phytosociologique des prairies du massif des Vosges et du Jura alsacien. Autechaux, France.
Finn, J.A., Suter, M., Haughey, E., Hofer, D., Lüscher, A., 2018. Greater gains in annual yields from increased plant diversity than losses from experimental drought in two temperate grasslands. Agriculture, Ecosystems & Environment 258, 149–153. https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.02.014
Firn, J., Nguyen, H., Schütz, M., Risch, A.C., 2019. Leaf trait variability between and within subalpine grassland species differs depending on site conditions and herbivory. Proc. R. Soc. B 286, 20190429. https://doi.org/10.1098/rspb.2019.0429
Fischer, C., Leimer, S., Roscher, C., Ravenek, J., de Kroon, H., Kreutziger, Y., Baade, J., Beßler, H., Eisenhauer, N., Weigelt, A., Mommer, L., Lange, M., Gleixner, G., Wilcke, W., Schröder, B., Hildebrandt, A., 2019. Plant species richness and functional groups have different effects on soil water content in a decade-long grassland experiment. Journal of Ecology 107, 127–141. https://doi.org/10.1111/1365-2745.13046
Fischer, M., Wipf, S., 2002. Effect of low-intensity grazing on the species-rich vegetation of traditionally mown subalpine meadows. Biological Conservation 104, 1–11. https://doi.org/10.1016/S0006-3207(01)00149-5
Fisher, B., Turner, R.K., Morling, P., 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making. Ecological Economics 68, 643–653. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.09.014
Ford, H., Healey, J.R., Webb, B., Pagella, T.F., Smith, A.R., 2019. How do hedgerows influence soil organic carbon stock in livestock-grazed pasture? Soil Use Manage sum.12517. https://doi.org/10.1111/sum.12517
Fowler, R.E., Rotheray, E.L., Goulson, D., 2016. Floral abundance and resource quality influence pollinator choice. Insect Conservation and Diversity 9, 481–494. https://doi.org/10.1111/icad.12197
Fraisse, D., Carnat, A., Viala, D., Pradel, P., Besle, J.-M., Coulon, J.-B., Felgines, C., Lamaison, J.-L., 2007. Polyphenolic composition of a permanent pasture: variations related to the period of harvesting. Journal of the Science of Food and Agriculture 87, 2427–2435. https://doi.org/10.1002/jsfa.2918
Frappat, B., Kérivel, A., Lusson, J.M., Moreau, J.C., 2012. Les défis de l'herbe et du conseil «Prairies» vus par les éleveurs et leurs conseillers, in: Rencontres Autour Des Recherches Sur Les Ruminants. pp. 261–264.
French, K.E., 2017. Species composition determines forage quality and medicinal value of high diversity grasslands in lowland England. Agriculture, Ecosystems & Environment 241, 193–204. https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.03.012
Gac, A., Dollé, J.-B., Le Gall, A., Klumpp, K., Tallec, T., Mousset, J., Eglin, T., Bispo, A., Peyraud, J.-L., Faverdin, P., 2010. Le stockage de carbone par les prairies. Une voie d'atténuation de l'impact de l'élevage herbivore sur l'effet de serre., L'Essentiel. Institut de l'Elevage.
Gaisler, J., Pavlů, V., Pavlů, L., Hejcman, M., 2013. Long-term effects of different mulching and cutting regimes on plant species composition of Festuca rubra grassland. Agriculture, Ecosystems & Environment 178, 10–17. https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.06.010
García-Palacios, P., Gross, N., Gaitán, J., Maestre, F.T., 2018. Climate mediates the biodiversity–ecosystem stability relationship globally. Proceedings of the National Academy of Sciences 201800425. https://doi.org/10.1073/pnas.1800425115
Garnier, E., Fayolle, A., Navas, M.-L., Damgaard, C., Cruz, P., Hubert, D., Richarte, J., Autran, P., Leurent, C., Violle, C., 2018. Plant demographic and functional responses to

management intensification: A long-term study in a Mediterranean rangeland. Journal of Ecology 106, 1363–1376. https://doi.org/10.1111/1365-2745.12996
Garnier, E., Navas, M.-L., 2012. A trait-based approach to comparative functional plant ecology: concepts, methods and applications for agroecology. A review. Agronomy for Sustainable Development 32, 365–399. https://doi.org/10.1007/s13593-011-0036-y
Garrido, P., Mårell, A., Öckinger, E., Skarin, A., Jansson, A., Thulin, C.-G., 2019. Experimental rewilding enhances grassland functional composition and pollinator habitat use. Journal of Applied Ecology. https://doi.org/10.1111/1365-2664.13338
Gaujour, E., Amiaud, B., Mignolet, C., Plantureux, S., 2012. Factors and processes affecting plant biodiversity in permanent grasslands. A review. Agronomy for Sustainable Development 32, 133–160. https://doi.org/10.1007/s13593-011-0015-3
Gaujour, E., Mignolet, C., Plantureux, S., Amiaud, B., 2011. Expliquer la végétation des prairies et des champs cultivés : l'importance de la dynamique des pratiques agricoles et de la mosaïque paysagère. Fourrages 208, 329–342.
Gazzarin, C., Haas, T., Hofstetter, P., 2018. Production laitière: herbe fraîche et peu de concentrés, une solution rentable. Recherche Agronomique Suisse 9, 148–155.
Genuer, R., Poggi, J.-M., Tuleau-Malot, C., 2015. VSURF: An R Package for Variable Selection Using Random Forests. The R Journal 7, 19. https://doi.org/10.32614/RJ-2015-018
Gillet, F., de Foucault, B., Julve, P., 1991. La phytosociologie synusiale intégrée : Objets et concepts. Candollea 46, 1–21.
Gough, L., Grace, J.B., Taylor, K.L., 1994. The Relationship between Species Richness and Community Biomass: The Importance of Environmental Variables. Oikos 70, 271. https://doi.org/10.2307/3545638
Gould, I.J., Quinton, J.N., Weigelt, A., De Deyn, G.B., Bardgett, R.D., 2016. Plant diversity and root traits benefit physical properties key to soil function in grasslands. Ecology Letters 19, 1140–1149. https://doi.org/10.1111/ele.12652
Grace, C., Boland, T.M., Sheridan, H., Brennan, E., Fritch, R., Lynch, M.B., 2019a. The effect of grazing versus cutting on dry matter production of multispecies and perennial ryegrass-only swards. Grass Forage Sci gfs.12440. https://doi.org/10.1111/gfs.12440
Grace, C., Boland, T.M., Sheridan, H., Lott, S., Brennan, E., Fritch, R., Lynch, M.B., 2016. The effect of increasing pasture species on herbage production, chemical composition and utilization under intensive sheep grazing. Grass and Forage Science. https://doi.org/10.1111/gfs.12379
Grace, C., Lynch, M.B., Sheridan, H., Lott, S., Fritch, R., Boland, T.M., 2019b. Grazing multispecies swards improves ewe and lamb performance. Animal 13, 1721–1729. https://doi.org/10.1017/S1751731118003245
Griffin, S.R., Bruninga-Socolar, B., Kerr, M.A., Gibbs, J., Winfree, R., 2017. Wild bee community change over a 26-year chronosequence of restored tallgrass prairie: Bee communities of restored tallgrass prairie. Restoration Ecology 25, 650–660. https://doi.org/10.1111/rec.12481
Grime, J.P., 1977. Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory. American Naturalist 111, 1169–1194.
Grueber, C.E., Nakagawa, S., Laws, R.J., Jamieson, I.G., 2011. Multimodel inference in ecology and evolution: challenges and solutions: Multimodel inference. Journal of Evolutionary Biology 24, 699–711. https://doi.org/10.1111/j.1420-9101.2010.02210.x
Guéry, F., 1962. Agriculture et industrie dans les Vosges alsaciennes. Revue géographique de l'Est 2, 327–344.

Gülçin, İ., Küfrevioğlu, Ö.İ., Oktay, M., Büyükokuroğlu, M.E., 2004. Antioxidant, antimicrobial, antiulcer and analgesic activities of nettle (Urtica dioica L.). Journal of Ethnopharmacology 90, 205–215. https://doi.org/10.1016/j.jep.2003.09.028

Guntiñas, M.E., Leirós, M.C., Trasar-Cepeda, C., Gil-Sotres, F., 2012. Effects of moisture and temperature on net soil nitrogen mineralization: A laboratory study. European Journal of Soil Biology 48, 73–80. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.07.015

Guo, L.B., Gifford, R.M., 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. Global change biology 8, 345–360.

Gupta, S.C., Larson, W.E., 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. Water Resour. Res. 15, 1633–1635. https://doi.org/10.1029/WR015i006p01633

Haughey, E., Suter, M., Hofer, D., Hoekstra, N.J., McElwain, J.C., Lüscher, A., Finn, J.A., 2018. Higher species richness enhances yield stability in intensively managed grasslands with experimental disturbance. Scientific Reports 8. https://doi.org/10.1038/s41598-018-33262-9

Hegland, S.J., Totland, Ø., 2005. Relationships between species' floral traits and pollinator visitation in a temperate grassland. Oecologia 145, 586–594. https://doi.org/10.1007/s00442-005-0165-6

Heide, O.M., 1994. Control of flowering and reproduction in temperate grasses. New Phytologist 128, 347–362. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1994.tb04019.x

Hejcman, M., Klaudisová, M., Schellberg, J., Honsová, D., 2007. The Rengen Grassland Experiment: Plant species composition after 64 years of fertilizer application. Agriculture, Ecosystems & Environment 122, 259–266. https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.12.036

Hester, A.J., Gordon, I.J., Baillie, G.J., Tappin, E., 1999. Foraging behaviour of sheep and red deer within natural heather/grass mosaics. Journal of Applied Ecology 36, 133–146. https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.1999.00387.x

Heyburn, J., McKenzie, P., Crawley, M.J., Fornara, D.A., 2017. Long-term belowground effects of grassland management: the key role of liming. Ecol Appl 27, 2001–2012. https://doi.org/10.1002/eap.1585

Hill, M.O., Carey, P.D., 1997. Prediction of yield in the Rothamsted Park Grass Experiment by Ellenberg indicator values. Journal of Vegetation Science 8, 579–586. https://doi.org/10.2307/3237210

Hinojosa, L., Lambin, E.F., Mzoughi, N., Napoléone, C., 2018. Constraints to farming in the Mediterranean Alps: Reconciling environmental and agricultural policies. Land Use Policy 75, 726–733. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.11.047

Hoetker, G., 2007. The use of logit and probit models in strategic management research: Critical issues. Strategic Management Journal 28, 331–343. https://doi.org/10.1002/smj.582

Horn, S., Hempel, S., Ristow, M., Rillig, M.C., Kowarik, I., Caruso, T., 2015. Plant community assembly at small scales: Spatial vs. environmental factors in a European grassland. Acta Oecologica 63, 56–62. https://doi.org/10.1016/j.actao.2015.01.004

Hovenden, M.J., Wills, K.E., Vander Schoor, J.K., Williams, A.L., Newton, P.C.D., 2008. Flowering phenology in a species-rich temperate grassland is sensitive to warming but not elevated CO_2. New Phytologist 178, 815–822. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02419.x

Huguenin-Elie, O., Mosimann, E., Schlegel, P., Lüscher, A., Kessler, W., Jeangros, B., 2017. Fertilisation des herbages. Recherche Agronomique Suisse 8, 9/1-9/22.

Hulin, S., Carrère, P., Chabalier, C., Farruggia, A., Landrieaux, J., Orth, D., Piquet, M., Rivière, J., Seytre, L., 2011. Typologie multifonctionnelle des prairies Outil 1 - Typologie multifonctionnelle des prairies. Niveau 2.

Hungate, B.A., Barbier, E.B., Ando, A.W., Marks, S.P., Reich, P.B., van Gestel, N., Tilman, D., Knops, J.M., Hooper, D.U., Butterfield, B.J., others, 2017. The economic value of grassland species for carbon storage. Science Advances 3, e1601880.

Husson, F., Josse, J., 2020. Handling Missing Values with Multivariate Data Analysis.

Husson, F., Josse, J., Le, S., Mazet, J., 2020. FactoMineR : Multivariate Exploratory Data Analysis and Data Mining.

IGN, 2020. Remonter le temps [WWW Document]. Remonter le temps. URL remonterletemps.ign.fr (accessed 4.1.20).

IGN, 2016. BD ALTI®. Institut National de l'information Géographique et forestière, é, France.

INRA, 2018. Alimentation des ruminants, 4ème édition. ed. Quae.

INRA, 2017. Les services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles.

INRA (Ed.), 2010. Alimentation des bovins, ovins et caprins: besoins des animaux, valeurs des aliments. Tables INRA 2007, Guide pratique. Editions Quae, Versailles Cedex.

INRA-ENSSAA, 1977. Pays, paysans, paysages dans les Vosges du sud, 1er édition. ed. INRA Éditions, Paris - France.

Isaac, M.E., Cerda, R., Rapidel, B., Martin, A.R., Dickinson, A.K., Sibelet, N., 2017. Farmer perception and utilization of leaf functional traits in managing agroecosystems. Journal of Applied Ecology 55, 69–80. https://doi.org/10.1111/1365-2664.13027

Jacquemyn, H., Brys, R., Hermy, M., 2003. Short-term effects of different management regimes on the response of calcareous grassland vegetation to increased nitrogen. Biological Conservation 111, 137–147. https://doi.org/10.1016/S0006-3207(02)00256-2

Janssens, F., Peeters, A., Tallowin, J.R.B., Bakker, J.P., Bekker, R.M., Fillat, F., 1998. Relationship between soil chemical factors and grassland diversity. Plant and Soil 10.

Jeangros, B., Troxler, J., Conod, D., Scehovic, J., Bosset, J.O., Bütikofer, U., Gauch, R., Mariaca, R., Pauchard, J.P., Sieber, R., 1997. Relations entre les caractéristiques de l'herbe et celles du fromage. Présentation et premiers résultats d'une étude pluridisciplinaire. Fourrages 152, 437–449.

Jentsch, A., Kreyling, J., Boettcher-Treschkow, J., Beierkuhnlein, C., 2009. Beyond gradual warming: extreme weather events alter flower phenology of European grassland and heath species. Global Change Biology 15, 837–849. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01690.x

Jochims, F., Poli, C.H.E.C., Soares, E.M., Carvalho, P.C.F., 2018. Improving forage nutritive value and botanical composition in a natural grassland using different grazing methods and herbage allowances. Animal Production Science 58, 1677. https://doi.org/10.1071/AN16012

Jones, D., 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. https://doi.org/10.1080/01448765.1997.9754801

Joyce, C.B., Simpson, M., Casanova, M., 2016. Future wet grasslands: ecological implications of climate change. Ecosystem Health and Sustainability 2, e01240. https://doi.org/10.1002/ehs2.1240

Jraissati, Y., 2014. On Color Categorization: Why Do We Name Seven Colors in the Rainbow? Philosophy Compass 9, 382–391. https://doi.org/10.1111/phc3.12131

Jung, V., Violle, C., Mondy, C., Hoffmann, L., Muller, S., 2010. Intraspecific variability and trait-based community assembly: Intraspecific variability and community assembly. Journal of Ecology 98, 1134–1140. https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01687.x

Jurgiel, B., 2018. Point sampling tool.

Käding, H., Kaiser, T., Werner, A., 2005. Model for calculating grassland yields and forage quality in North-East Germany on the basis of site and management characteristics. Archives of Agronomy and Soil Science 51, 417–431. https://doi.org/10.1080/03650340500078263

Kahmen, A., Perner, J., Audorff, V., Weisser, W., Buchmann, N., 2005. Effects of plant diversity, community composition and environmental parameters on productivity in montane European grasslands. Oecologia 142, 606–615. https://doi.org/10.1007/s00442-004-1749-2

Kaiser, T., Rohner, M.-S., Matzdorf, B., Kiesel, J., 2010. Validation of grassland indicator species selected for result-oriented agri-environmental schemes. Biodiversity and Conservation 19, 1297–1314. https://doi.org/10.1007/s10531-009-9762-8

Kardol, P., Fanin, N., Wardle, D.A., 2018. Long-term effects of species loss on community properties across contrasting ecosystems. Nature 557, 710–713. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0138-7

Kessler, M., Siorak, Y., Wunderlich, M., Wegner, C., 2007. Patterns of morphological leaf traits among pteridophytes along humidity and temperature gradients in the Bolivian Andes. Functional Plant Biology 34, 963. https://doi.org/10.1071/FP07087

Kincaid, R.L., Hillers, J.K., Cronrath, J.D., 1981. Calcium and Phosphorus Supplementation of Rations for Lactating Cows. Journal of Dairy Science 64, 754–758. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(81)82644-6

Kirkham, F.W., Tallowin, J.R.B., Sanderson, R.A., Bhogal, A., Chambers, B.J., Stevens, D.P., 2008. The impact of organic and inorganic fertilizers and lime on the species-richness and plant functional characteristics of hay meadow communities. Biological Conservation 141, 1411–1427. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.03.010

Kirwan, L., Lüscher, A., Sebastià, M.T., Finn, J.A., Collins, R.P., Porqueddu, C., Helgadottir, A., Baadshaug, O.H., Brophy, C., Coran, C., DalmannsdóTtir, S., Delgado, I., Elgersma, A., Fothergill, M., Frankow-Lindberg, B.E., Golinski, P., Grieu, P., Gustavsson, A.M., HöGlind, M., Huguenin-Elie, O., Iliadis, C., JøRgensen, M., Kadziuliene, Z., Karyotis, T., Lunnan, T., Malengier, M., Maltoni, S., Meyer, V., Nyfeler, D., Nykanen-Kurki, P., Parente, J., Smit, H.J., Thumm, U., Connolly, J., 2007. Evenness drives consistent diversity effects in intensive grassland systems across 28 European sites. Journal of Ecology 95, 530–539. https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2007.01225.x

Kleijn, D., Berendse, F., Smit, R., Gilissen, N., 2001. Agri-environment schemes do not effectively protect biodiversity in Dutch agricultural landscapes. Nature 413, 723–725. https://doi.org/10.1038/35099540

Klimek, S., Marini, L., Hofmann, M., Isselstein, J., 2008. Additive partitioning of plant diversity with respect to grassland management regime, fertilisation and abiotic factors. Basic and Applied Ecology 9, 626–634. https://doi.org/10.1016/j.baae.2007.11.005

Klimek, S., Richter gen. Kemmermann, A., 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. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.09.007

Kohler, F., Gillet, F., Gobat, J.-M., Buttler, A., 2004. Seasonal vegetation changes in mountain pastures due to simulated effects of cattle grazing. Journal of Vegetation Science 15, 143–150.

Körner, C., 2007. The use of ‘altitude’ in ecological research. Trends in Ecology & Evolution 22, 569–574. https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.09.006

Kovács-Hostyánszki, A., Elek, Z., Balázs, K., Centeri, C., Falusi, E., Jeanneret, P., Penksza, K., Podmaniczky, L., Szalkovszki, O., Báldi, A., 2013. Earthworms, spiders and bees as indicators of habitat quality and management in a low-input farming region—A

whole farm approach. Ecological Indicators 33, 111–120. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.01.033
Kraft, N.J.B., Adler, P.B., Godoy, O., James, E.C., Fuller, S., Levine, J.M., 2015. Community assembly, coexistence and the environmental filtering metaphor. Funct Ecol 29, 592–599. https://doi.org/10.1111/1365-2435.12345
Kreyling, J., Dengler, J., Walter, J., Velev, N., Ugurlu, E., Sopotlieva, D., Ransijn, J., Picon-Cochard, C., Nijs, I., Hernandez, P., Güler, B., von Gillhaussen, P., De Boeck, H.J., Bloor, J.M.G., Berwaers, S., Beierkuhnlein, C., Arfin Khan, M.A.S., Apostolova, I., Altan, Y., Zeiter, M., Wellstein, C., Sternberg, M., Stampfli, A., Campetella, G., Bartha, S., Bahn, M., Jentsch, A., 2017. Species richness effects on grassland recovery from drought depend on community productivity in a multisite experiment. Ecology Letters 20, 1405–1413. https://doi.org/10.1111/ele.12848
Kross, S.M., Ingram, K.P., Long, R.F., Niles, M.T., 2017. Farmer Perceptions and Behaviors Related to Wildlife and On-Farm Conservation Actions: Farmer perceptions of wildlife. Conservation Letters. https://doi.org/10.1111/conl.12364
Kudernatsch, T., Fischer, A., Bernhardt-Römermann, M., Abs, C., 2008. Short-term effects of temperature enhancement on growth and reproduction of alpine grassland species. Basic and Applied Ecology 9, 263–274. https://doi.org/10.1016/j.baae.2007.02.005
Kumar, Y., Yadav, D.N., Ahmad, T., Narsaiah, K., 2015. Recent Trends in the Use of Natural Antioxidants for Meat and Meat Products. COMPREHENSIVE REVIEWS IN FOOD SCIENCE AND FOOD SAFETY 14, 796–812. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12156
Laissus, R., Leconte, D., 1982. Répercussions de l'épandage de lisier de bovins sur une prairie pâturée. Fourrages 89, 63–72.
Lamarque, P., Tappeiner, U., Turner, C., Steinbacher, M., Bardgett, R.D., Szukics, U., Schermer, M., Lavorel, S., 2011. Stakeholder perceptions of grassland ecosystem services in relation to knowledge on soil fertility and biodiversity. Reg Environ Change 11, 791–804. https://doi.org/10.1007/s10113-011-0214-0
Lanta, V., Doležal, J., Lantová, P., Kelíšek, J., Mudrák, 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. https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2009.00709.x
Larick, D.K., Hedrick, H.B., Bailey, M.E., Williams, J.E., Hancock, D.L., Garner, G.B., Morrow, R.E., 1987. Flavor Constituents of Beef as Influenced by Forage- and Grain-Feeding. Journal of Food Science 52, 245–251. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1987.tb06585.x
Larrère, R., Fleury, P., Payant, L., 2007. La « nature » des éleveurs : sur les représentations de la biodiversité dans les Alpes du Nord. Ruralia 21, 17.
Launay, F., Baumont, R., Plantureux, S., Farrié, J.-P., Michaud, A., Pottier, E., 2011. Prairies permanentes Des références pour valoriser leur diversité. Institut de l'Elevage, Paris.
Lavorel, S., 2013. Plant functional effects on ecosystem services. Journal of Ecology 101, 4–8. https://doi.org/10.1111/1365-2745.12031
Lavorel, S., Garnier, É., 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., McIntyre, S., Williams, N.S.G., Garden, D., Dorrough, J., Berman, S., Quétier, F., Thébault, A., Bonis, A., 2007. Assessing functional diversity in the field – methodology matters! Funct Ecology 0, 071124124908001-??? https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2007.01339.x

Lázaro, A., Tscheulin, T., Devalez, J., Nakas, G., Petanidou, T., 2016. Effects of grazing intensity on pollinator abundance and diversity, and on pollination services: Grazing and pollinator diversity. Ecol Entomol 41, 400–412. https://doi.org/10.1111/een.12310

Le Clec'h, S., Finger, R., Buchmann, N., Gosal, A.S., Hörtnagl, L., Huguenin-Elie, O., Jeanneret, P., Lüscher, A., Schneider, M.K., Huber, R., 2019. Assessment of spatial variability of multiple ecosystem services in grasslands of different intensities. Journal of Environmental Management 251, 109372. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109372

Le Roux, X., Barbault, J., Baudry, J., Burel, F., Doussan, I., Garnier, E., Herzog, F., Lavorel, S., Lifran, R., Roger-Estrade, J., Sarthou, J.-P., 2008. Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies. (Expertise scientifique). INRA, France.

Leaver, J.D., 1985. Milk production from grazed temperate grassland. Journal of Dairy Research 52, 313–344. https://doi.org/10.1017/S0022029900024201

Lebourgeois, F., Piedallu, C., 2005. Appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnaires et de la gestion forestière à partir d'indices bioclimatiques. Revue Forestière Française 58, 331–356.

Lemaire, G., Pflimlin, A., 2007. Les sécheresses passées et à venir : quels impacts et quelles adaptations pour les systèmes fourragers ? Fourrages 190, 163–180.

Lépée, P., 2011. De la fauche au stockage : évaluer le coût d'une chaîne de récolte de l'herbe. Fourrages 206, 137–141.

Lessire, F., Jacquet, S., Veselko, D., Piraux, E., Dufrasne, I., 2019. Evolution of Grazing Practices in Belgian Dairy Farms: Results of Two Surveys. Sustainability 11, 3997. https://doi.org/10.3390/su11153997

Li, G.D., Conyers, M.K., Helyar, K.R., Lisle, C.J., Poile, G.J., Cullis, B.R., 2019. Long-term surface application of lime ameliorates subsurface soil acidity in the mixed farming zone of south-eastern Australia. Geoderma 338, 236–246. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.003

Li, G.D., Helyar, K.R., Evans, C.M., Wilson, M.C., Castleman, L.J.C., Fisher, R.P., Cullis, B.R., Conyers, M.K., 2003. Effects of lime on the botanical composition of pasture over nine years in a field experiment on the south-western slopes of New South Wales. Aust. J. Exp. Agric. 43, 61. https://doi.org/10.1071/EA01194

Li, Q., Lee Allen, H., Wollum, A.G., 2004. Microbial biomass and bacterial functional diversity in forest soils: effects of organic matter removal, compaction, and vegetation control. Soil Biology and Biochemistry 36, 571–579. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2003.12.001

Li, Q., Yu, P., Li, G., Zhou, D., 2016. Grass–legume ratio can change soil carbon and nitrogen storage in a temperate steppe grassland. Soil and Tillage Research 157, 23–31. https://doi.org/10.1016/j.still.2015.08.021

Lima, A.C.R., Hoogmoed, W.B., Brussaard, L., Sacco dos Anjos, F., 2011. Farmers' assessment of soil quality in rice production systems. NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences 58, 31–38. https://doi.org/10.1016/j.njas.2010.08.002

Lortie, C.J., Brooker, R.W., Choler, P., Kikvidze, Z., Michalet, R., Pugnaire, F.I., Callaway, R.M., 2004. Rethinking plant community theory. Oikos 107, 433–438. https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2004.13250.x

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, 151–160.

Loucougaray, G., Bonis, A., Bouzillé, J.-B., 2004. Effects of grazing by horses and/or cattle on the diversity of coastal grasslands in western France. Biological Conservation 116, 59–71. https://doi.org/10.1016/S0006-3207(03)00177-0

Lowe, C.N., Butt, K.R., 2002. Influence of organic matter on earthworm production and behaviour: a laboratory-based approach with applications for soil restoration. European Journal of Soil Biology 38, 173–176. https://doi.org/10.1016/S1164-5563(02)01141-X

Mace, G.M., Norris, K., Fitter, A.H., 2012. Biodiversity and ecosystem services: a multilayered relationship. Trends in Ecology & Evolution 27, 19–26. https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.08.006

Macedo, J.A., Alves, P., Lomba, Â., Vicente, J., Henriques, R., Granja, H., Honrado, J., 2010. On the interest of plant functional classifications to study community—level effects of increased disturbance on coastal dune vegetation. Acta Botanica Gallica 157, 305–315. https://doi.org/10.1080/12538078.2010.10516208

Magda, D., de Sainte Marie, C., Plantureux, S., Agreil, C., Amiaud, B., Mestelan, P., Mihout, S., 2015. Integrating Agricultural and Ecological Goals into the Management of Species-Rich Grasslands: Learning from the Flowering Meadows Competition in France. Environmental Management 56, 1053–1064. https://doi.org/10.1007/s00267-015-0553-6

Magda, D., Meuret, M., Hazard, L., Agreil, C., 2001. Répondre à une politique de conservation de la biodiversitéLe pâturage des brebis pour la maîtrise des landes à genêts. Façade 12, 1–5.

Magiera, A., Feilhauer, H., Waldhardt, R., Wiesmair, M., Otte, A., 2017. Modelling biomass of mountainous grasslands by including a species composition map. Ecological Indicators 78, 8–18. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.02.039

Majak, W., 2001. Review of toxic glycosides in rangeland and pasture forages. Journal of Range Management 54, 494–498.

Malhi, S.S., Nyborg, M., Soon, Y.K., 2010. Long-term effects of balanced fertilization on grass forage yield, quality and nutrient uptake, soil organic C and N, and some soil quality characteristics. Nutr Cycl Agroecosyst 86, 425–438. https://doi.org/10.1007/s10705-009-9306-3

Marini, L., Quaranta, M., Fontana, P., Biesmeijer, J.C., Bommarco, R., 2012. Landscape context and elevation affect pollinator communities in intensive apple orchards. Basic and Applied Ecology 13, 681–689. https://doi.org/10.1016/j.baae.2012.09.003

Marion, B., Bonis, A., Bouzillé, J.-B., 2010. How much does grazing-induced heterogeneity impact plant diversity in wet grasslands? Écoscience 17, 229–239. https://doi.org/10.2980/17-3-3315

Martin, B., Hurtaud, C., Graulet, B., Ferlay, A., Chilliard, Y., Coulon, J.-B., 2009. Herbe et qualités nutritionnelles et organoleptiques des produits laitiers. Fourrages 199, 291–310.

Martin, R., Gaurut, M., Lardy, R., Carrère, P., Graux, A.-I., Drouet, J.L., Fiorelli, J.-L., Blanfort, V., Capitaine, M., Duretz, S., Gabrielle, B., Cellier, P., Soussana, J.-F., 2011. Des modèles pour comprendre la réponse des écosystèmes prairiaux au changement climatique. Innovations Agronomiques 12, 97–108.

Matzdorf, B., Kaiser, T., Rohner, M.-S., 2008. Developing biodiversity indicator to design efficient agri-environmental schemes for extensively used grassland. Ecological Indicators 8, 256–269. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2007.02.002

Mauchamp, L., Mouly, A., Badot, P.-M., Gillet, F., 2014. Impact of management type and intensity on multiple facets of grassland biodiversity in the French Jura Mountains. Applied Vegetation Science 17, 645–657. https://doi.org/10.1111/avsc.12116

Mayfield, M.M., Levine, J.M., 2010. Opposing effects of competitive exclusion on the phylogenetic structure of communities: Phylogeny and coexistence. Ecology Letters 13, 1085–1093. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01509.x

Melts, I., Lanno, K., Sammul, M., Uchida, K., Heinsoo, K., Kull, T., Laanisto, L., 2018. Fertilising semi-natural grasslands may cause long-term negative effects on both

biodiversity and ecosystem stability. Journal of Applied Ecology 55, 1951–1955. https://doi.org/10.1111/1365-2664.13129
Mesbahi, G., Bayeur, C., Michelot-Antalik, A., Plantureux, S., 2019. Quelles typologies pour la prédiction des propriétés des prairies permanentes ? Fourrages 237, 57–65.
Mesbahi, G., Michelot-Antalik, A., Goulnik, J., Plantureux, S., 2020. Permanent grassland classifications predict agronomic and environmental characteristics well, but not ecological characteristics. Ecological Indicators 110, 105956. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105956
Mezgebo, G.B., Monahan, F.J., McGee, M., Moloney, A.P., 2017. Biochemical and organoleptic characteristics of muscle from early and late maturing bulls in different production systems. Animal 11, 1636–1644. https://doi.org/10.1017/S175173111600272X
Michaud, A., Andueza, D., Picard, F., Plantureux, S., Baumont, R., 2012a. Seasonal dynamics of biomass production and herbage quality of three grasslands with contrasting functional compositions. Grass and Forage Science 67, 64–76. https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2011.00821.x
Michaud, A., Carrère, P., Farruggia, A., Jeangros, B., Orth, D., Pauthenet, Y., Plantureux, S., 2013. Construire des typologies de prairies pour évaluer leur potentiel à rendre des services agro-environnementaux. Fourrages 213, 35–44.
Michaud, A., Havet, A., Mathieu, A., 2008. Reverting to grazing: farmers' conceptions, in: Biodiversity and Animal FeedFuture Challengesfor Grassland Production. Presented at the Proceedings of the 22nd general meeting of the European Grassland Federation, Uppsala, Sweden, pp. 853–855.
Michaud, A., Plantureux, S., Amiaud, B., Carrère, P., Cruz, P., Duru, M., Dury, B., Farruggia, A., Fiorelli, J.L., Kerneis, E., Baumont, R., 2012b. Identification of the environmental factors which drive the botanical and functional composition of permanent grasslands. The Journal of Agricultural Science 150, 219–236. https://doi.org/10.1017/S0021859611000530
Michaud, A., Plantureux, S., Pottier, E., Baumont, R., 2015. Links between functional composition, biomass production and forage quality in permanent grasslands over a broad gradient of conditions. The Journal of Agricultural Science 153, 891–906. https://doi.org/10.1017/S0021859614000653
Milberg, P., Bergman, K.-O., Cronvall, E., Eriksson, Å.I., Glimskär, A., Islamovic, A., Jonason, D., Löfqvist, Z., Westerberg, L., 2016. Flower abundance and vegetation height as predictors for nectar-feeding insect occurrence in Swedish semi-natural grasslands. Agriculture, Ecosystems & Environment 230, 47–54. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.05.029
Millennium Ecosystem Assessment (Ed.), 2005. Ecosystems and human well-being: synthesis. Island Press, Washington, DC.
Miller, P.A., Giesecke, T., Hickler, T., Bradshaw, R.H.W., Smith, B., Seppä, H., Valdes, P.J., Sykes, M.T., 2008. Exploring climatic and biotic controls on Holocene vegetation change in Fennoscandia. J Ecology 96, 247–259. https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2007.01342.x
Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2014. PAC 2014/2020 - Application en France.
Moeys, J., 2018. soiltexture.
Moquet, L., Laurent, E., Bacchetta, R., Jacquemart, A.-L., 2017. Conservation of hoverflies (Diptera, Syrphidae) requires complementary resources at the landscape and local scales. Insect Conservation and Diversity. https://doi.org/10.1111/icad.12245

Mouillot, D., Graham, N.A.J., Villéger, S., Mason, N.W.H., Bellwood, D.R., 2013. A functional approach reveals community responses to disturbances. Trends in Ecology & Evolution 28, 167–177. https://doi.org/10.1016/j.tree.2012.10.004

Mountousis, I., Dotas, V., Stanogias, G., Papanikolaou, K., Roukos, Ch., Liamadis, D., 2011. Altitudinal and seasonal variation in herbage composition and energy and protein content of grasslands on Mt Varnoudas, NW Greece. Animal Feed Science and Technology 164, 174–183. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.01.007

Mu, J., Zeng, Y., Wu, Q., Niklas, K.J., Niu, K., 2016. Traditional grazing regimes promote biodiversity and increase nectar production in Tibetan alpine meadows. Agriculture, Ecosystems & Environment 233, 336–342. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.09.030

Muller, S., 2002. Diversity of management practices required to ensure conservation of rare and locally threatened plant species in grasslands: a case study at a regional scale (Lorraine, France). Biodiversity and Conservation 11, 1173–1184. https://doi.org/10.1023/A:1016049605021

Munkhtsetseg, E., Kimura, R., Wang, J., Shinoda, M., 2007. Pasture yield response to precipitation and high temperature in Mongolia. Journal of Arid Environments 70, 94–110. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.11.013

Nabavi, S.M., Marchese, A., Izadi, M., Curti, V., Daglia, M., Nabavi, S.F., 2015. Plants belonging to the genus Thymus as antibacterial agents: From farm to pharmacy. Food Chemistry 173, 339–347. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.042

Nennich, T.D., Harrison, J.H., VanWieringen, L.M., Meyer, D., Heinrichs, A.J., Weiss, W.P., St-Pierre, N.R., Kincaid, R.L., Davidson, D.L., Block, E., 2005. Prediction of Manure and Nutrient Excretion from Dairy Cattle. Journal of Dairy Science 88, 3721–3733. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)73058-7

Nerlich, K., Graeff-Hönninger, S., Claupein, W., 2013. Agroforestry in Europe: a review of the disappearance of traditional systems and development of modern agroforestry practices, with emphasis on experiences in Germany. Agroforest Syst 87, 475–492. https://doi.org/10.1007/s10457-012-9560-2

Ni, J., 2004. Estimating Net Primary Productivity of Grasslands from Field Biomass Measurements in Temperate Northern China. Plant Ecology 174, 217–234.

Niskanen, A.K.J., Niittynen, P., Aalto, J., Väre, H., Luoto, M., 2019. Lost at high latitudes: Arctic and endemic plants under threat as climate warms. Diversity and Distributions. https://doi.org/10.1111/ddi.12889

Nocera, J.J., Parsons, G.J., Milton, G.R., Fredeen, A.H., 2005. Compatibility of delayed cutting regime with bird breeding and hay nutritional quality. Agriculture, Ecosystems & Environment 107, 245–253. https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.11.001

Nock, C.A., Vogt, R.J., Beisner, B.E., 2016. Functional Traits, in: ELS. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, pp. 1–8. https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0026282

Nonn, H., 1979. Quelques aspects et problèmes socio-économiques du massif vosgien. Revue géographique de l'Est 19, 185–2013.

Normand, J., Legrand, I., Tiphine, L., Bastien, D., Denoyelle, C., 2019. Influence d'une alimentation à base d'herbe sur la qualité de la viande de gros bovins.

Novick, K.A., Stoy, P.C., Katul, G.G., Ellsworth, D.S., Siqueira, M.B.S., Juang, J., Oren, R., 2004. Carbon dioxide and water vapor exchange in a warm temperate grassland. Oecologia 138, 259–274. https://doi.org/10.1007/s00442-003-1388-z

Oddershede, A., Violle, C., Baattrup-Pedersen, A., Svenning, J.-C., Damgaard, C., 2018. Early dynamics in plant community trait responses to a novel, more extreme hydrological gradient. Journal of Plant Ecology. https://doi.org/10.1093/jpe/rty028

Oksanen, J., 2019. Vegan: ecological diversity.

Olsson, P.A., Mårtensson, L.-M., Bruun, H.H., 2009. Acidification of sandy grasslands - consequences for plant diversity. Applied Vegetation Science 12, 350–361. https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2009.01029.x

Oram, N.J., Ravenek, J.M., Barry, K.E., Weigelt, A., Chen, H., Gessler, A., Gockele, A., de Kroon, H., van der Paauw, J.W., Scherer-Lorenzen, M., Smit-Tiekstra, A., van Ruijven, J., Mommer, L., 2018. Below-ground complementarity effects in a grassland biodiversity experiment are related to deep-rooting species. Journal of Ecology 106, 265–277. https://doi.org/10.1111/1365-2745.12877

Osoro, K., Ferreira, L.M.M., García, U., Martínez, A., Celaya, R., 2017. Forage intake, digestibility and performance of cattle, horses, sheep and goats grazing together on an improved heathland. Anim. Prod. Sci. 57, 102. https://doi.org/10.1071/AN15153

Ozenda, D., Borel, J.-L., 2013. The Alpine Vegetation of the Alps, in: Alpine Biodiversity in Europe. Springer Berlin, Berlin, pp. 53–64.

Palmer, M.A., Ambrose, R.F., Poff, N.L., 1997. Ecological Theory and Community Restoration Ecology. Restor Ecology 5, 291–300. https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.1997.00543.x

Palpurina, S., Wagner, V., von Wehrden, H., Hájek, M., Horsák, M., Brinkert, A., Hölzel, N., Wesche, K., Kamp, J., Hájková, P., Danihelka, J., Lustyk, P., Merunková, K., Preislerová, Z., Kočí, M., Kubešová, S., Cherosov, M., Ermakov, N., German, D., Gogoleva, P., Lashchinsky, N., Martynenko, V., Chytrý, M., 2017. The relationship between plant species richness and soil pH vanishes with increasing aridity across Eurasian dry grasslands: Plant species richness, soil pH and precipitation. Global Ecol. Biogeogr. 26, 425–434. https://doi.org/10.1111/geb.12549

Papanastasis, V.P., Koukoulakis, P.H., 1988. Effects of fertilizer application to grasslands in Greece. Grass and Forage Sci 43, 151–158. https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1988.tb01882.x

Pärtel, M., Zobel, M., Zobel, K., van der Maarel, E., Partel, M., 1996. The Species Pool and Its Relation to Species Richness: Evidence from Estonian Plant Communities. Oikos 75, 111. https://doi.org/10.2307/3546327

Pauler, C.M., Isselstein, J., Braunbeck, T., Schneider, M.K., 2019. Influence of Highland and production-oriented cattle breeds on pasture vegetation: A pairwise assessment across broad environmental gradients. Agriculture, Ecosystems & Environment 284, 106585. https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106585

Peeters, A., Beaufoy, G., Canals, R.M., De Vliegher, A., Huyghe, C., Isselstein, J., Jones, G., Kessler, W., Kirilov, A., Mosquera-Losada, C., Nilsdotter-Linde, N., Parente, G., Peyraud, J.-L., Pickert, J., Plantureux, S., Porqueddu, C., Rataj, D., Stypinski, P., Tonn, B., van den Pol-van Dasselaar, A., Vintu, V., Wilkins, R.J., 2004. Grassland term definitions and classifications adapted to the diversity of European grassland-based systems, in: Grassland Science in Europe. EGF at 50: the Future of European Grasslands, pp. 743–747.

Penasa, M., Tiezzi, F., Sturaro, A., Cassandro, M., De Marchi, M., 2014. A comparison of the predicted coagulation characteristics and composition of milk from multi-breed herds of Holstein-Friesian, Brown Swiss and Simmental cows. International Dairy Journal 35, 6–10. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2013.10.004

Pérez-Obiol, R., Jalut, G., Julià, R., Pèlachs, A., Iriarte, M.J., Otto, T., Hernández-Beloqui, B., 2011. Mid-Holocene vegetation and climatic history of the Iberian Peninsula. The Holocene 21, 75–93. https://doi.org/10.1177/0959683610384161

Petanidou, T., Kallimanis, A.S., Sgardelis, S.P., Mazaris, A.D., Pantis, J.D., Waser, N.M., 2014. Variable flowering phenology and pollinator use in a community suggest future

phenological mismatch. Acta Oecologica 59, 104–111. https://doi.org/10.1016/j.actao.2014.06.001
Petchey, O.L., 2002. Functional diversity (FD), species richness and community composition. Ecology Letters 5, 402–411. https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2002.00339.x
Petit, S., Fleury, P., Vansteelant, J.-Y., 2005. Agriculture, prairies de fauche et environnement dans le Massif jurassien. Outil de diagnostic et conseil. guide technique. Lajoux - Chambéry.
Petrovic, M., Acic, S., Zornic, V., Andjelkovic, B., Dajic-Stevanovic, Z., Babic, S., 2013. Evaluation of quality of semi-natural grasslands of central Serbia upon phytosociological and numerical analysis. Biotechnology in Animal Husbandry 29, 363–371. https://doi.org/10.2298/BAH1302363P
Piedallu, C., Gégout, J.-C., 2007. Multiscale computation of solar radiation for predictive vegetation modelling. Ann. For. Sci. 64, 899–909. https://doi.org/10.1051/forest:2007072
Piedallu, C., Gégout, J.-C., Perez, V., Lebourgeois, F., 2013. Soil water balance performs better than climatic water variables in tree species distribution modelling. Global Ecology and Biogeography 22, 470–482. https://doi.org/10.1111/geb.12012
Pittarello, M., Lonati, M., Gorlier, A., Perotti, E., Probo, M., Lombardi, G., 2018. Plant diversity and pastoral value in alpine pastures are maximized at different nutrient indicator values. Ecological Indicators 85, 518–524. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.10.064
Plantureux, S., 2020. Reconciling production and biodiversity in management of pastures and grasslands, in: Reconciling Agricultural Production with Biodiversity Conservation. Burleigh Dodds Science Publishing, p. 280.
Plantureux, S., Amiaud, B., 2010. e-FLORA-sys, a website tool to evaluate the agronomical and environmental value of grasslands. Presented at the Grassland in a changing world. Proceedings of the 23rd General Meeting of the European Grassland Federation, pp. 732–734.
Plantureux, S., Amiaud, B., 2009. E-flora-sys [WWW Document]. E-flora-sys. URL http://eflorasys.univ-lorraine.fr/
Plantureux, S., Carrère, P., Le Hénaff, P.M., Pierre, P., 2019. Agronomie et écologie : un duo gagnant pour comprendre et gérer les prairies. Fourrages 237, 1–3.
Plantureux, S., Peeters, A., McCracken, D., 2005. Biodiversity in intensive grasslands: Effect of management, improvement and challenges. Agronomy Research 3, 153–164.
Plantureux, S., Pottier, E., Carrère, P., 2012. La prairie permanente : nouveaux enjeux, nouvelles définitions ? Fourrages 211, 181–193.
Plantureux, S., Thorion, G., 2005. Combined prediction of forage production and biodiversity of permanent pastures in Vosges Mountains (France), in: Qquality Production and Quality of the Environment in the Mountain Pastures of an Enlarged Europe. Presented at the Conference of the FAO-CIHEAM Sub-Network of Mountain pasture, Udine, Italie, pp. 221–229.
Pontes, L. da S., Agreil, C., Magda, D., Gleizes, B., Fritz, H., 2010. Feeding behaviour of sheep on shrubs in response to contrasting herbaceous cover in rangelands dominated by Cytisus scoparius L. Applied Animal Behaviour Science 124, 35–44. https://doi.org/10.1016/j.applanim.2010.02.002
Pontes, L. da S., Baldissera, T.C., Giostri, A.F., Stafin, G., dos Santos, B.R.C., Carvalho, P.C. de F., 2016. Effects of nitrogen fertilization and cutting intensity on the agronomic performance of warm-season grasses. Grass and Forage Science. https://doi.org/10.1111/gfs.12267

Pontes, L.S., Carrere, P., Andueza, D., Louault, F., Soussana, J.F., 2007a. Seasonal productivity and nutritive value of temperate grasses found in semi-natural pastures in Europe: responses to cutting frequency and N supply. Grass and Forage science 62, 485–496.

Pontes, L.S., Soussana, J.-F., Louault, F., Andueza, D., Carrère, P., 2007b. Leaf traits affect the above-ground productivity and quality of pasture grasses. Functional Ecology 21, 844–853. https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2007.01316.x

Post, W.M., Kwon, K.C., 2000. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. Global change biology 6, 317–327.

Pottier, E., Jacquin, A., Roumiguié, A., Fougere, M., 2017. Les nouvelles technologies au service de la prairie. Fourrages 230, 161–168.

Pottier, J., Jabot, F., 2017. Non-destructive biomass estimation of herbaceous plant individuals: A transferable method between contrasted environments. Ecological Indicators 72, 769–776.

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. https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2009.01609.x

Poutaraud, A., Michelot-Antalik, A., Plantureux, S., 2017. Grasslands: A Source of Secondary Metabolites for Livestock Health. Journal of Agricultural and Food Chemistry 65, 6535–6553. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b00425

Préfecture de l'Isère, 2015. Notice spécifique de la mesure «Prairies fleuries» «RA_BEL3_HE01» du territoire «BELLEDONNE».

Priolo, A., Micol, D., Agabriel, J., 2001. Effects of grass feeding systems on ruminant meat colour and flavour. A review. Animal Research 50, 185–200.

Pulina, A., Lai, R., Salis, L., Seddaiu, G., Roggero, P.P., Bellocchi, G., 2018. Modelling pasture production and soil temperature, water and carbon fluxes in Mediterranean grassland systems with the Pasture Simulation model. Grass and Forage Science 73, 272–283. https://doi.org/10.1111/gfs.12310

Pykälä, J., Luoto, M., Heikkinen, R.K., Kontula, T., 2005. Plant species richness and persistence of rare plants in abandoned semi-natural grasslands in northern Europe. Basic and Applied Ecology 6, 25–33. https://doi.org/10.1016/j.baae.2004.10.002

QGIS Development Team, 2019. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project.

Quezada-Hinojosa, R., Föllmi, K.B., Gillet, F., Matera, V., 2015. Cadmium accumulation in six common plant species associated with soils containing high geogenic cadmium concentrations at Le Gurnigel, Swiss Jura Mountains. CATENA 124, 85–96. https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.09.007

R Core Team, 2019. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Rahal, A., Kumar, A., Singh, V., Yadav, B., Tiwari, R., Chakraborty, S., Dhama, K., 2014. Oxidative Stress, Prooxidants, and Antioxidants: The Interplay. BioMed Research International 2014, 1–19. https://doi.org/10.1155/2014/761264

Rapinel, S., Bouzillé, J.-B., Oszwald, J., Bonis, A., 2015. Use of bi-Seasonal Landsat-8 Imagery for Mapping Marshland Plant Community Combinations at the Regional Scale. Wetlands 35, 1043–1054. https://doi.org/10.1007/s13157-015-0693-8

Ravetto Enri, S., Renna, M., Probo, M., Lussiana, C., Battaglini, L.M., Lonati, M., Lombardi, G., 2017. Relationships between botanical and chemical composition of forages: a multivariate approach to grasslands in the Western Italian Alps. J. Sci. Food Agric. 97, 1252–1259. https://doi.org/10.1002/jsfa.7858

Reboul Salze, M., Dehon, M., Boulier, P., Lecarme, M., Grevillot, M., Dehont, F., Hennequin, C., Destrieux, B., 2018. Un autre regard sur vos prairies permanentes : (re)connaitre et valoriser leur biodiversité.

Reid, R.L., Horvath, D.J., 1980. Soil chemistry and mineral problems in farm livestock. A review. Animal Feed Science and Technology 5, 95–167. https://doi.org/10.1016/0377-8401(80)90002-4

Réseau Mixte Technologique Praires Demain, 2016. Coût des fourrages : des méthodes et des usages variés.

Revello-Chion, A., Tabacco, E., Peiretti, P.G., Borreani, G., 2011. Variation in the Fatty Acid Composition of Alpine Grassland during Spring and Summer. Agronomy Journal 103, 1072–1080. https://doi.org/10.2134/agronj2010.0509

Reynaud, A., Fraisse, D., Cornu, A., Farruggia, A., Pujos-Guillot, E., Besle, J.-M., Martin, B., Lamaison, J.-L., Paquet, D., Doreau, M., Graulet, B., 2010. Variation in Content and Composition of Phenolic Compounds in Permanent Pastures According to Botanical Variation. J. Agric. Food Chem. 58, 5485–5494. https://doi.org/10.1021/jf1000293

Ricou, C., Schneller, C., Amiaud, B., Plantureux, S., Bockstaller, C., 2014. A vegetation-based indicator to assess the pollination value of field margin flora. Ecological Indicators 45, 320–331. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.03.022

Rodríguez-Rojo, M.P., Jiménez-Alfaro, B., Jandt, U., Bruelheide, H., Rodwell, J.S., Schaminée, J.H.J., Perrin, P.M., Kącki, Z., Willner, W., Fernández-González, F., Chytrý, M., 2017. Diversity of lowland hay meadows and pastures in Western and Central Europe. Applied Vegetation Science 20, 702–719. https://doi.org/10.1111/avsc.12326

Römermann, C., Tackenberg, O., Poschlod, P., 2005. How to predict attachment potential of seeds to sheep and cattle coat from simple morphological seed traits. Oikos 110, 219–230. https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2005.13911.x

Rook, A.J., Harvey, A., Parsons, A.J., Penning, P.D., Orr, R.J., 2002. Effect of long-term changes in relative resource availability on dietary preference of grazing sheep for perennial ryegrass and white clover. Grass and Forage Sci 57, 54–60. https://doi.org/10.1046/j.1365-2494.2002.00301.x

Rook, A.J., Tallowin, J.R.B., 2003. Grazing and pasture management for biodiversity benefit. Animal Research 10.

Rosa García, R., Fraser, M.D., Celaya, R., Ferreira, L.M.M., García, U., Osoro, K., 2013. Grazing land management and biodiversity in the Atlantic European heathlands: a review. Agroforest Syst 87, 19–43. https://doi.org/10.1007/s10457-012-9519-3

Roscher, C., Gubsch, M., Lipowsky, A., Schumacher, J., Weigelt, A., Buchmann, N., Schulze, E.-D., Schmid, B., 2018. Trait means, trait plasticity and trait differences to other species jointly explain species performances in grasslands of varying diversity. Oikos 127, 865–865. https://doi.org/10.1111/oik.04815

Rossignol, N., Andueza, D., Carrère, P., Cruz, P., Duru, M., Fiorelli, J.-L., Michaud, A., Plantureux, S., Pottier, E., Baumont, R., 2014. Assessing population maturity of three perennial grass species: Influence of phenology and tiller demography along latitudinal and altitudinal gradients. Grass and Forage Science 69, 534–548. https://doi.org/10.1111/gfs.12067

Rossignol, N., Bonis, A., Bouzillé, J.-B., 2011. Grazing-induced vegetation patchiness controls net N mineralization rate in a semi-natural grassland. Acta Oecologica 37, 290–297. https://doi.org/10.1016/j.actao.2011.02.014

Ruget, F., Novak, S., Granger, S., 2006. Du modèle STICS au système ISOP pour estimer la production fourragère. Adaptation à la prairie, application spatialisée. Fourrages 186, 241–256.

Sande, M.T., Gosling, W., Correa-Metrio, A., Prado-Junior, J., Poorter, L., Oliveira, R.S., Mazzei, L., Bush, M.B., 2019. A 7000-year history of changing plant trait composition in an Amazonian landscape; the role of humans and climate. Ecology Letters 22, 925–935. https://doi.org/10.1111/ele.13251

Sasaki, T., Lu, X., Hirota, M., Bai, Y., 2019. Species asynchrony and response diversity determine multifunctional stability of natural grasslands. J Ecol 107, 1862–1875. https://doi.org/10.1111/1365-2745.13151

Schaffers, A.P., Sýkora, 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. https://doi.org/10.2307/3236802

Scheffer, M., van Nes, E.H., 2006. Self-organized similarity, the evolutionary emergence of groups of similar species. Proceedings of the National Academy of Sciences 103, 6230–6235. https://doi.org/10.1073/pnas.0508024103

Schellberg, J., 1999. Long-term effects of fertilizer on soil nutrient concentration, yield, forage quality and floristic composition of a hay meadow in the Eifel mountains, Germany. Grass and Forage Science 54, 195–207.

Schiano, A.N., Harwood, W.S., Drake, M.A., 2017. A 100-Year Review: Sensory analysis of milk. Journal of Dairy Science 100, 9966–9986. https://doi.org/10.3168/jds.2017-13031

Schmid, B., 2002. The species richness–productivity controversy. Trends in Ecology & Evolution 17, 113–114. https://doi.org/10.1016/S0169-5347(01)02422-3

Schori, F., 2020. Mit Herbometer und Pasturemeter die Wuchshöhe von Weiden messen und die Grasmasse schätzen. Agrarforschung Schweiz 46–52.

Sedivy, C., Piskorski, R., Müller, A., Dorn, S., 2012. Too Low to Kill: Concentration of the Secondary Metabolite Ranunculin in Buttercup Pollen does not Affect Bee Larval Survival. J Chem Ecol 38, 996–1002. https://doi.org/10.1007/s10886-012-0153-3

Séguin, V., Lemauviel-Lavenant, S., Garon, D., Bouchart, V., Gallard, Y., Blanchet, B., Diquelou, S., Personeni, E., Gauduchon, P., Ourry, A., 2010. Effect of agricultural and environmental factors on the hay characteristics involved in equine respiratory disease. Agriculture, Ecosystems & Environment 135, 206–215. https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.09.012

Sellin, A., Tullus, A., Niglas, A., Õunapuu, E., Karusion, A., Lõhmus, K., 2013. Humidity-driven changes in growth rate, photosynthetic capacity, hydraulic properties and other functional traits in silver birch (Betula pendula). Ecol Res 28, 523–535. https://doi.org/10.1007/s11284-013-1041-1

Serafini, J., Grogan, P., Aarssen, L., 2019. Summer precipitation limits plant species richness but not overall productivity in a temperate mesic old field meadow. J Veg Sci 30, 832–844. https://doi.org/10.1111/jvs.12783

Sevruk, B., 1997. Regional Dependency of Precipitation-Altitude Relationship in the Swiss Alps, in: Diaz, H.F., Beniston, M., Bradley, R.S. (Eds.), Climatic Change at High Elevation Sites. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 123–137. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8905-5_7

Sheeren, D., Lefèbvre, J., Ladet, S., Balent, G., Brame, A., Bray, F., Capitaine, M., Gibon, A., Lasseur, R., Lasseur, J., Dobremez, L., 2015. Coévolution des paysages et des activités agricoles dans différents territoires d'élevage des montagnes françaises : entre intensification et déprise agricole. Fourrages 222, 12.

Shiyomi, M., Okada, M., Takahashi, S., Tang, Y., 1998. Spatial pattern changes in aboveground plant biomass in a grazing pasture: Spatial pattern of plant biomass. Ecological Research 13, 313–322. https://doi.org/10.1046/j.1440-1703.1998.00266.x

Silvertown, J., Dodd, M.E., McConway, K., Potts, J., Crawley, M., 1994. Rainfall, Biomass Variation, and Community Composition in the Park Grass Experiment. Ecology 75, 2430. https://doi.org/10.2307/1940896

Slade, E.M., Bagchi, R., Keller, N., Philipson, C.D., 2019. When Do More Species Maximize More Ecosystem Services? Trends in Plant Science S136013851930161X. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.06.014

Smith, R.S., Shiel, R.S., Millward, D., Corkhill, P., Sanderson, R.A., 2002. Soil seed banks and the effects of meadow management on vegetation change in a 10-year meadow field trial. Journal of Applied Ecology 15.

Soryal, K., Beyene, F.A., Zeng, S., Bah, B., Tesfai, K., 2005. Effect of goat breed and milk composition on yield, sensory quality, fatty acid concentration of soft cheese during lactation. Small Ruminant Research 58, 275–281.

Soussana, J.-F., Lemaire, G., 2014. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. Agriculture, Ecosystems & Environment 190, 9–17. https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.012

Soussana, J.-F., Loiseau, P., Vuichard, N., Ceschia, E., Balesdent, J., Chevallier, T., Arrouays, D., 2004. Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. Soil Use and Management 20, 219–230. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2004.tb00362.x

Soyeurt, H., Dardenne, P., Gillon, A., Croquet, C., Vanderick, S., Mayeres, P., Bertozzi, C., Gengler, N., 2006. Variation in Fatty Acid Contents of Milk and Milk Fat Within and Across Breeds. Journal of Dairy Science 89, 4858–4865.

Spiess, A.-N., 2014. Modelling and analysis of real-time PCR data.

Sretenovic, Lj., Aleksic, S., Petrovic, M.P., Miscevic, B., 2007. Nutritional factors influencing improvement of milk and meat quality as well as productive and reproductive parameters of cattle. Bio Anim Husb 23, 217–226. https://doi.org/10.2298/BAH0701217S

Stampfli, A., Zeiter, M., 2004. Plant regeneration directs changes in grassland composition after extreme drought: a 13-year study in southern Switzerland: *Plant regeneration directs changes*. Journal of Ecology 92, 568–576. https://doi.org/10.1111/j.0022-0477.2004.00900.x

Staude, I.R., Vélez-Martin, E., Andrade, B.O., Podgaiski, L.R., Boldrini, I.I., Mendonça, M., Pillar, V.D., Overbeck, G.E., 2017. Local biodiversity erosion in South Brazilian grasslands under moderate levels of landscape habitat loss. Journal of Applied Ecology. https://doi.org/10.1111/1365-2664.13067

Stevens, C.J., Duprè, C., Dorland, E., Gaudnik, C., Gowing, D.J.G., Bleeker, A., Diekmann, M., Alard, D., Bobbink, R., Fowler, D., Corcket, E., Mountford, J.O., Vandvik, V., Aarrestad, P.A., Muller, S., Dise, N.B., 2010. Nitrogen deposition threatens species richness of grasslands across Europe. Environmental Pollution 158, 2940–2945. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.06.006

Stouffer, D.B., 2019. All ecological models are wrong, but some are useful. Journal of Animal Ecology 88, 192–195. https://doi.org/10.1111/1365-2656.12949

Stumpf, B., Yan, F., Wen, G., Eder, K., Honermeier, B., 2019. Dynamics of antioxidant properties, phenolic compounds, and transcriptional expression of key enzymes for the phenylpropanoid pathway in leaves of field-grown winter wheat with different nitrogen fertilization schemes. J. Plant Nutr. Soil Sci. 182, 411–418. https://doi.org/10.1002/jpln.201800608

Suding, K.N., Collins, S.L., Gough, L., Clark, C., Cleland, E.E., Gross, K.L., Milchunas, D.G., Pennings, S., 2005. Functional- and abundance-based mechanisms explain diversity loss

due to N fertilization. Proceedings of the National Academy of Sciences 102, 4387–4392. https://doi.org/10.1073/pnas.0408648102

Sullivan, C.A., Finn, J.A., Ó hÚallacháin, D., Green, S., Matin, S., Meredith, D., Clifford, B., Moran, J., 2017. The development of a national typology for High Nature Value farmland in Ireland based on farm-scale characteristics. Land Use Policy 67, 401–414. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.04.031

Sutter, L., Jeanneret, P., Bartual, A.M., Bocci, G., Albrecht, M., 2017. Enhancing plant diversity in agricultural landscapes promotes both rare bees and dominant crop-pollinating bees through complementary increase in key floral resources. Journal of Applied Ecology 54, 1856–1864. https://doi.org/10.1111/1365-2664.12907

Suttie, J.M., Reynolds, S.G., Batello, C. (Eds.), 2005. Grassland of the world, Food and Agriculture Organization of the United Nations. ed. Rome.

Swemmer, A.M., Knapp, A.K., Snyman, H.A., 2007. Intra-seasonal precipitation patterns and above-ground productivity in three perennial grasslands. J Ecology 95, 780–788. https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2007.01237.x

Symonds, M.R.E., Moussalli, A., 2011. A brief guide to model selection, multimodel inference and model averaging in behavioural ecology using Akaike's information criterion. Behavioral Ecology and Sociobiology 65, 13–21. https://doi.org/10.1007/s00265-010-1037-6

Tasset, E., Boulanger, T., Diquélou, S., Laîné, P., Lemauviel-Lavenant, S., 2019. Plant trait to fodder quality relationships at both species and community levels in wet grasslands. Ecological Indicators 97, 389–397. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.035

Taugourdeau, S., 2014. Effects of management and climate on the plant functional diversity related to ecosystem services of permanent grasslands in Europe (Thèse de doctorat). Université de Lorraine.

Thamsborg, S.M., Roepstorff, A., Larsen, M., 1999. Integrated and biological control of parasites in organic and conventional production systems. Veterinary Parasitology 84, 169–186. https://doi.org/10.1016/S0304-4017(99)00035-7

Theau, J.-P., Pauthenet, Y., Cruz, P., 2017. Une typologie des espèces non graminéennes pour mieux caractériser la diversité et la valeur d'usage des prairies permanentes. Fourrages 232, 321–329.

Theau, J.-P., Prud'homme, F., San Cristobal, M., Sirami, C., 2019. Complémentarités entre approches écologique et agronomique pour une gestion agroécologique des prairies permanentes en Midi-Pyrénées. Fourrages 237, 5–14.

Therneau, T.M., Atkinson, B., 2014. mvpart.

Theurillat, J.-P., Guisan, A., 2001. Potential Impact of Climate Change on Vegetation in the European Alps: A Review. Climate Change 50, 77–109. https://doi.org/10.1023/A:1010632015572

Thomson, J.D., Weiblen, G., Thomson, B.A., Alfaro, S., Legendre, P., 1996. Untangling Multiple Factors in Spatial Distributions: Lilies, Gophers, and Rocks. Ecology 77, 1698–1715. https://doi.org/10.2307/2265776

Tichý, L., Chytrý, M., 2019. Probabilistic key for identifying vegetation types in the field: a new method and Android application. J Veg Sci jvs.12799. https://doi.org/10.1111/jvs.12799

Tilman, D., Haddi, A.E., 1992. Drought and Biodiversity in Grasslands. Oecologia 89, 257–264.

Tilman, D., Reich, P.B., Knops, J., Wedin, D., Mielke, T., Lehman, C., 2001. Diversity and Productivity in a Long-Term Grassland Experiment. Science 294, 4.

Tinner, W., Lotter, A.F., 2001. Central European vegetation response to abrupt climate change at 8.2 ka 5.

Tjur, T., 2009. Coefficients of Determination in Logistic Regression Models—A New Proposal: The Coefficient of Discrimination. The American Statistician 63, 366–372. https://doi.org/10.1198/tast.2009.08210

Tornambé, G., Ferlay, A., Farruggia, A., Chilliard, Y., Loiseau, P., Pradel, P., Graulet, B., Chauveau-Duriot, B., Martin, B., 2010. Influence of the botanical diversity and deveopment stage of mountain pastures on milk fatty acid composition, carotenoids, fat-soluble vitamins ans sensory properties, in: Grassland in a Changing World. Presented at the 23th General Meeting of the European Grassland Federation, Kiel, Germany, pp. 589–591.

Tóth, E., Deák, B., Valkó, O., Kelemen, A., Miglécz, T., Tóthmérész, B., Török, P., 2018. Livestock Type is More Crucial Than Grazing Intensity: Traditional Cattle and Sheep Grazing in Short-Grass Steppes. Land Degradation & Development 29, 231–239. https://doi.org/10.1002/ldr.2514

Totty, V.K., Greenwood, S.L., Bryant, R.H., Edwards, G.R., 2013. Nitrogen partitioning and milk production of dairy cows grazing simple and diverse pastures. Journal of Dairy Science 96, 141–149. https://doi.org/10.3168/jds.2012-5504

Van Aardt, M., Duncan, S.E., Marcy, J.E., Long, T.E., O'Keefe, S.F., Nielsen-Sims, S.R., 2005. Effect of antioxidant (α-tocopherol and ascorbic acid) fortification on light-induced flavor of milk. Journal of dairy science 88, 872–880.

van Dobben, H.F., Quik, C., Wamelink, G.W.W., Lantinga, E.A., 2019. Vegetation composition of Lolium perenne-dominated grasslands under organic and conventional farming. Basic and Applied Ecology 36, 45–53. https://doi.org/10.1016/j.baae.2019.03.002

van Dobben, H.F., Wamelink, G.W.W., Slim, P.A., Kamiński, J., Piórkowski, H., 2017. Species-rich grassland can persist under nitrogen-rich but phosphorus-limited conditions. Plant Soil 411, 451–466. https://doi.org/10.1007/s11104-016-3021-z

van Oijen, M., Bellocchi, G., Höglind, M., 2018. Effects of Climate Change on Grassland Biodiversity and Productivity: The Need for a Diversity of Models. Agronomy 8, 14. https://doi.org/10.3390/agronomy8020014

Vázquez-de-Aldana, B.R., García-Ciudad, A., García-Criado, B., 2008. Interannual variations of above-ground biomass and nutritional quality of Mediterranean grasslands in Western Spain over a 20-year period. Aust. J. Agric. Res. 59, 769. https://doi.org/10.1071/AR07359

Violle, C., Navas, M.-L., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I., Garnier, E., 2007. Let the concept of trait be functional! Oikos 116, 882–892. https://doi.org/10.1111/j.2007.0030-1299.15559.x

Vitra, A., Deléglise, C., Meisser, M., Risch, A.C., Signarbieux, C., Lamacque, L., Delzon, S., Buttler, A., Mariotte, P., 2019. Responses of plant leaf economic and hydraulic traits mediate the effects of early- and late season-drought on grassland productivity. AoB PLANTS 11, plz023. https://doi.org/10.1093/aobpla/plz023

Volf, M., Redmond, C., Albert, Á.J., Le Bagousse-Pinguet, Y., Biella, P., Götzenberger, L., Hrázský, Z., Janeček, Š., Klimešová, J., Lepš, J., Šebelíková, L., Vlasatá, T., de Bello, F., 2016. Effects of long- and short-term management on the functional structure of meadows through species turnover and intraspecific trait variability. Oecologia 180, 941–950. https://doi.org/10.1007/s00442-016-3548-y

Vujnovic, K., Wein, R.W., Dale, M.R.T., 2002. Predicting plant species diversity in response to disturbance magnitude in grassland remnants of central Alberta. Canadian Journal of Botany 80, 504–511. https://doi.org/10.1139/b02-032

Wagner, M., Kahmen, A., Schlumprecht, H., Audorff, V., Perner, J., Buchmann, N., Weisser, W.W., 2007. Prediction of herbage yield in grassland: How well do Ellenberg N-values

perform? Applied Vegetation Science 10, 15–24. https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2007.tb00499.x
Wallace, K.J., 2007. Classification of ecosystem services: Problems and solutions. Biological Conservation 139, 235–246. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.07.015
Walter, E., 1926. La botanique en Alsace et en Lorraine depuis 1870. Bulletin de la Société Botanique de France 73, 615–623. https://doi.org/10.1080/00378941.1926.10833617
Wang, C.T., Long, R.J., Wang, Q.J., Ding, L.M., Wang, M.P., 2007. Effects of altitude on plant-species diversity and productivity in an alpine meadow, Qinghai–Tibetan plateau. Australian Journal of Botany 55, 110–117. https://doi.org/10.1071/BT04070
Wang, Q., Zhang, Z., Du, R., Wang, S., Duan, J., Iler, A., Piao, S., Caiyun, L., Lili, J., Wangwang, L., Lirong, Z., Fandong, M., Ji, S., Yaoming, L., Bowen, L., Peipei, L., Dorji, T., Zhezhen, W., Yinnian, L., Mingyuan, D., Huakun, Z., Xinquan, Z., Yanfen, W., 2019. Richness of plant communities plays a larger role than climate in determining responses of species richness to climate change. Journal of Ecology 107, 1944–1955. https://doi.org/10.1111/1365-2745.13148
Wang, S., Wilkes, A., Zhang, Z., Chang, X., Lang, R., Wang, Y., Niu, H., 2011. Management and land use change effects on soil carbon in northern China's grasslands: a synthesis. Agriculture, Ecosystems & Environment 142, 329–340. https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.06.002
Warren, H.E., Scollan, N.D., Enser, M., Hughes, S.I., Richardson, R.I., Wood, J.D., 2008. Effects of breed and a concentrate or grass silage diet on beef quality in cattle of 3 ages. I: Animal performance, carcass quality and muscle fatty acid composition. Meat Science 78, 256–269. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.06.008
Warzecha, D., Diekötter, T., Wolters, V., Jauker, F., 2017. Attractiveness of wildflower mixtures for wild bees and hoverflies depends on some key plant species. Insect Conservation and Diversity 11, 32–41. https://doi.org/10.1111/icad.12264
Wassen, M.J., Venterink, H.O., Lapshina, E.D., Tanneberger, F., 2005. Endangered plants persist under phosphorus limitation. Nature 437, 547–550. https://doi.org/10.1038/nature03950
Watson, S.J., Ferguson, W.S., 1936. The nutritive value of artificially dried grass and its effect on the quality of milk produced by cows of the main dairy breeds. The Journal of Agricultural Science 26, 189–211. https://doi.org/10.1017/S0021859600021900
Wei, T., Simko, V., Levy, M., Xie, Y., Jin, Y., Zemla, J., 2017. corrplot: Visualization of a Correlation Matrix.
Weigelt, A., Weisser, W.W., Buchmann, N., Scherer-Lorenzen, M., 2009. Biodiversity for multifunctional grasslands: equal productivity in high-diversity low-input and low-diversity high-input systems. Biogeosciences 1695–1706.
Wellstein, C., Chelli, S., Campetella, G., Bartha, S., Galiè, M., Spada, F., Canullo, R., 2013. Intraspecific phenotypic variability of plant functional traits in contrasting mountain grasslands habitats. Biodivers Conserv 22, 2353–2374. https://doi.org/10.1007/s10531-013-0484-6
Wesche, K., Krause, B., Culmsee, H., Leuschner, C., 2012. Fifty years of change in Central European grassland vegetation: Large losses in species richness and animal-pollinated plants. Biological Conservation 150, 76–85. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.02.015
Wezel, A., Vincent, A., Nitsch, H., Schmid, O., Dubbert, M., Tasser, E., Fleury, P., Stöckli, S., Stolze, M., Bogner, D., 2018. Farmers' perceptions, preferences, and propositions for result-oriented measures in mountain farming. Land Use Policy 70, 117–127. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.10.020

Whitley, A.E., Moir, J.L., Almond, P.C., 2019. A meta-analysis of exchangeable aluminium in New Zealand soils using the National Soils Database. Soil Res. 57, 113. https://doi.org/10.1071/SR18246

Willems, J.H., Nieuwstadt, M.G.L., 1996. Long-term after effects of fertilization on above-ground phytomass and species diversity in calcareous grassland. Journal of Vegetation Science 7, 177–184. https://doi.org/10.2307/3236317

Williams, A.R., Peña-Espinoza, M.A., Boas, U., Simonsen, H.T., Enemark, H.L., Thamsborg, S.M., 2016. Anthelmintic activity of chicory (*Cichorium intybus*): *in vitro* effects on swine nematodes and relationship to sesquiterpene lactone composition. Parasitology 143, 770–777. https://doi.org/10.1017/S0031182016000287

Wilson, J.B., Peet, R.K., Dengler, J., Pärtel, M., 2012. Plant species richness: the world records. J Veg Sci 23, 796–802. https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2012.01400.x

Winter, S., Penker, M., Kriechbaum, M., 2011. Integrating farmers' knowledge on toxic plants and grassland management: a case study on Colchicum autumnale in Austria. Biodiversity and Conservation 20, 1763–1787. https://doi.org/10.1007/s10531-011-0060-x

Wittig, B., Kemmermann, A.R. gen., Zacharias, D., 2006. An indicator species approach for result-orientated subsidies of ecological services in grasslands – A study in Northwestern Germany. Biological Conservation 133, 186–197. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.06.004

Woodward, S.L., Waugh, C.D., Roach, C.G., Fynn, D., Phillips, J., 2013. Are diverse species mixtures better pastures for dairy farming? Proceedings of the New Zealand Grassland Association 75, 79–84.

Xie, Y., Sha, Z., Yu, M., 2008. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. Journal of Plant Ecology 1, 9–23. https://doi.org/10.1093/jpe/rtm005

Xu, Z., Li, M.-H., Zimmermann, N.E., Li, S.-P., Li, H., Ren, H., Sun, H., Han, X., Jiang, Y., Jiang, L., 2018. Plant functional diversity modulates global environmental change effects on grassland productivity. Journal of Ecology 106, 1941–1951. https://doi.org/10.1111/1365-2745.12951

Zhang, Y.-Y., Wu, W., Liu, H., 2019. Factors affecting variations of soil pH in different horizons in hilly regions. PLoS ONE 14, e0218563. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218563

Zhao, M., Gao, X., Wang, J., He, X., Han, B., 2013. A review of the most economically important poisonous plants to the livestock industry on temperate grasslands of China: Poisonous plants in China. Journal of Applied Toxicology 33, 9–17. https://doi.org/10.1002/jat.2789

Zobel, M., 1997. The relative of species pools in determining plant species richness: an alternative explanation of species coexistence? Trends in Ecology & Evolution 12, 266–269. https://doi.org/10.1016/S0169-5347(97)01096-3

Zou, Y., Chang, S.K.C., Gu, Y., Qian, S.Y., 2011. Antioxidant Activity and Phenolic Compositions of Lentil (Lens culinaris var. Morton) Extract and Its Fractions. J. Agric. Food Chem. 59, 2268–2276. https://doi.org/10.1021/jf104640k

ANNEXES

Table des annexes

Annexe 1 Extrait de la typologie phytosociologique du massif vosgien (Ferrez et al., 2017)....I
Annexe 2 Description des 25 types phytosociologiques sélectionnés par les Conservatoires Botaniques, d'après Ferrez et al (2017) IV
Annexe 3 Extrait de la typologie agronomique des Ballons des Vosges (Collectif, 2006) VI
Annexe 4 Extrait de la typologie agronomique des Vosges du Nord (Bayeur et al., 2013) ...VII
Annexe 5 Description des 25 types agronomiques du massif vosgien, d'après Collectif (2006) et Bayeur et al (2013) IX
Annexe 6 Corrélations entre critères prédictifs XI
Annexe 7 Scores des critères et des espèces selon les analyses de redondances (RDA) XIV
Annexe 8 Description des classes de milieux et de pratiques XVI
Annexe 9 Détail des modèles créés pour prédire chaque propriété prairiale par les typologies uniquement XVIII
Annexe 10 Arbres de décisions des propriétés agroécologiques prédites par les pratiques, le milieu et la végétation XIX
Annexe 11 Descriptif des attentes exprimées par les agriculteurs spontanément ou sélectionnées parmi notre liste.... XXVI

Annexe 1 Extrait de la typologie phytosociologique du massif vosgien (Ferrez et al., 2017)

Extrait de la clé de détermination :

1 – Communautés franchement hygrophiles développées sur des sols manifestement humides en permanence ou une partie de l'année. Dominance de l'une des espèces suivantes ou abondance de plusieurs d'entre elles : *Filipendula ulmaria, Juncus effusus, J. acutiflorus, Caltha palustris, Myosotis scorpioides, Lotus pedunculatus, Cardamine pratensis, Galium palustre, Lysimachia nummularia Cirsium palustre, Scirpus sylvaticus, Angelica sylvestris, Iris pseudacorus, Lysimachia vulgaris, Lythrum salicaria, Phalaris arundinacea, Lycopus europaeus, Carex disticha, C. acuta, C. acutiformis, C. vesicaria, Phragmites australis*..... 2

1′ – Communautés xérophiles, mésophiles à mésohygrophiles (notamment les communautés avec *Juncus squarrosus* souvent accompagné de *J. acutiflorus* et *J. effusus*). Absence ou rareté des espèces citées ci-dessus. 23

2 – Communautés souvent hautes de plus de 1,5 m (sauf certaines cariçaies) et denses généralement non ou rarement fauchées parfois pâturées (mégaphorbiaies, phragmitaies, cariçaies, scirpaies). Dominance de l'une des espèces suivantes ou abondance de plusieurs d'entre elles : *Urtica dioica, Convolvulus sepium, Impatiens glandulifera, Silene dioica, Galium aparine, Glechoma hederacea, Athyrium filix-femina, Scrophularia nodosa, Galeopsis tetrahit, Senecio ovatus, Chaerophyllum hirsutum, Epilobium hirsutum, Ranunculus aconitifolius, Petasites hybridus, Scirpus sylvaticus, Carex paniculata, Carex rostrata, Glyceria maxima, Phalaris arundinacea, Phragmites australis*. Absence ou rareté des espèces citées ci-dessous. 3

2′ – Communautés de hauteur moyenne, autour de 1 m, lâches à plus ou moins denses généralement fauchées et/ou pâturées (prairies). Absence ou rareté des espèces citées ci-dessus, dominance de l'une des espèces suivantes ou abondance de plusieurs d'entre elles : *Jacobaea aquatica, Lysimachia nummularia, Rumex crispus, Cynosurus cristatus, Schedonorus pratensis, Ajuga reptans*..... 18

3 – Communautés nettement structurées par une espèce du genre *Carex*..... 4

3′ – Communautés non structurées par une espèce du genre *Carex* (même si ceux-ci peuvent être présents) 5

4 – Communautés dominées par *Carex acuta* (avec parfois *Phalaris arundinacea* codominant) .....50. ***Caricetum gracilis***

4′ – Communautés dominées par *Carex acutiformis*..... ..... 49. ***Caricetum acutiformis***

4″ – Communautés dominées par *Carex paniculata*. Présence régulière d'*Equisetum fluviatile* et de *Typha latifolia*.....52. ***Caricetum paniculatae***

4‴ – Communautés dominées par *Carex vesicaria*..... 53. ***Caricetum vesicariae***

6. Prairie fauchée montagnarde à meum fausse athamante et fétuque rouge

Meo athamantici – Festucetum rubrae Tüxen ex Bartsch & Bartsch 1940

Code CORINE : 38.3
Code Natura : 6520-3
Code Eunis : E2.231
Arrêté zone humide : -
Déterminante ZNIEFF : A5, L2/3, FC

Combinaison caractéristique
Festuca rubra
Meum athamanticum
Arrhenatherum elatius
Lathyrus linifolius
Potentilla erecta
Platanthera chlorantha
Geranium sylvaticum

Richesse spécifique moyenne : 29

Composition floristique

Prairie basse dominée par des graminées à feuilles fines : *Festuca rubra, Anthoxanthum odoratum* et *Agrostis capillaris*. Caractérisée par *Meum athamanticum, Geranium sylvaticum* et *Lathyrus linifolius*.

Le fonds est composé :

- d'espèces caractéristiques de classe et d'ordre : *Knautia arvensis, Stellaria graminea, Leucanthemum ircutianum, Rumex acetosa, Veronica chamaedrys, Lotus corniculatus, Rhinanthus minor* et *Pimpinella major,*
- d'espèces acidiclinophiles des pelouses des ***Nardetea strictae*** : *Campanula rotundifolia, Luzula campestris, Platanthera chlorantha, Potentilla erecta, Poa chaixii, etc.*

Variabilité, risque de confusion

⚠ ***Alchemillo xanthochlorae – Arrhenathetum***

↳ de niveaux topographiques inférieurs, avec des espèces des ***Agrostietea*** et des ***Filipendulo – Convolvuletea*** : *Colchicum automnale, Lychnis flos-cuculi, Alopecurus pratensis, Ranunculus repens, Sanguisorba officinalis, Scorzonera humilis* et *Filipendula ulmaria,*

↳ les espèces montagnardes du ***Triseto – Polygonion*** ne sont pas différentielles (*Bistorta officinalis, Geranium sylvaticum* et *Alchemilla sp.*).

⚠ ***Centaureo – Arrhenatheretum***

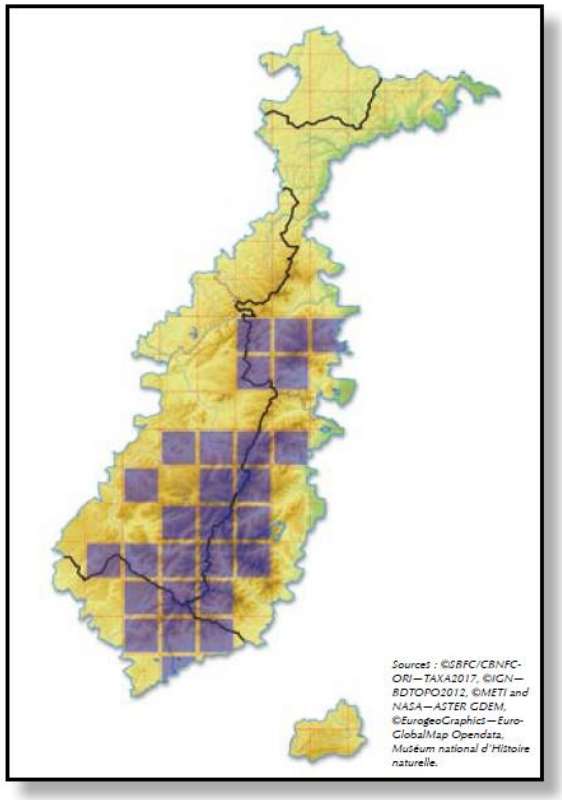
↳ même niveau trophique,

↳ présence des alchémilles (surtout *Alchemilla xanthochlora*), mais absence des montagnardes du ***Triseto – Polygonion***.

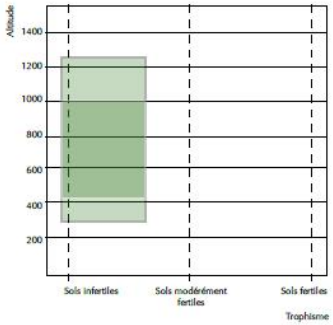
Dynamique et végétation de contact

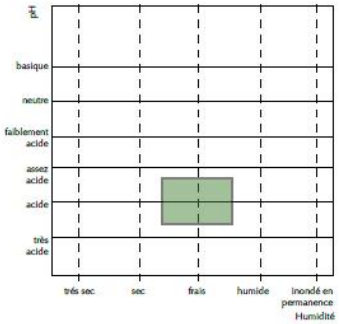
- Le ***Meo – Festucetum*** pourrait représenter la végétation prairiale primitive de la montagne vosgienne sur les sols les plus profonds. Sur les sols peu profonds ou particulièrement drainants, cette association dérive des pelouses des ***Nardetea strictae*** (***Violion caninae***) sous l'effet de l'amélioration agronomique.
- En cas d'augmentation accrue du niveau trophique, le cortège se simplifie et bascule alors dans l'***Alchemillo monticolae – Brometum***, où *Geranium sylvaticum* et *Bistorta officinalis* peuvent encore faire faciès.
- En cas d'abandon des pratiques, son évolution est variable selon le contexte. Selon la profondeur des sols et leur réserve en eau, deux évolutions sont envisageables, soit vers un ourlet mésophile des ***Melampyro – Holcetea*** sur les sols bien drainés, soit vers une mégaphorbiaie des ***Mulgedio – Aconitetea*** sur les sols les plus profonds et riches en azote.

Répartition du *Meo athamantici - Festucetum rubrae* dans le massif vosgien



Diagrammes combinant les gradients d'altitude et de trophisme et ceux d'humidité et de pH





Pratiques agricoles

Ces prairies de fauche, non ou faiblement fertilisées, sont d'un intérêt patrimonial majeur pour le territoire et contribuent fortement à l'originalité des herbages de la montagne vosgienne.

Flore remarquable

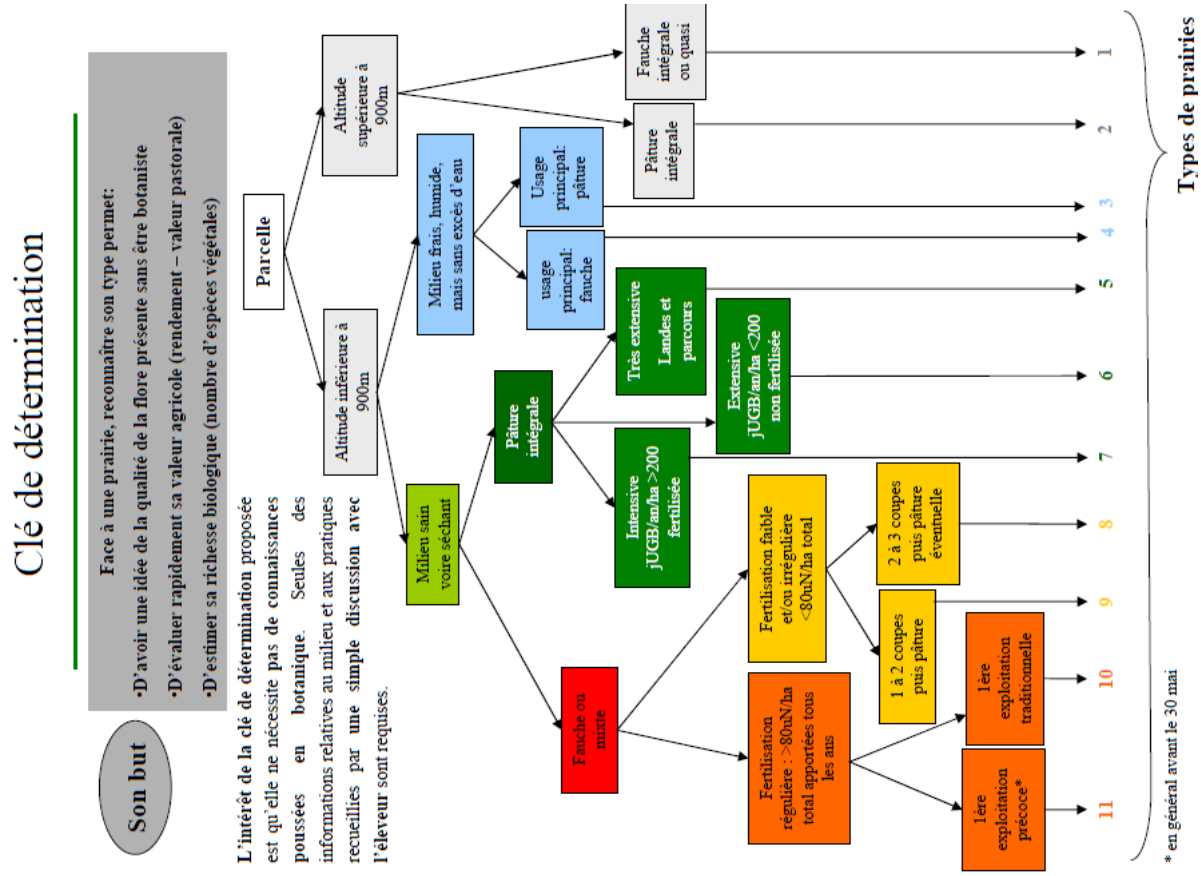
Alchemilla acutiloba, Arnica montana, Narcissus pseudonarcissus, Platanthera chlorantha.

Annexe 2 Description des 25 types phytosociologiques sélectionnés par les Conservatoires Botaniques, d'après Ferrez et al (2017)

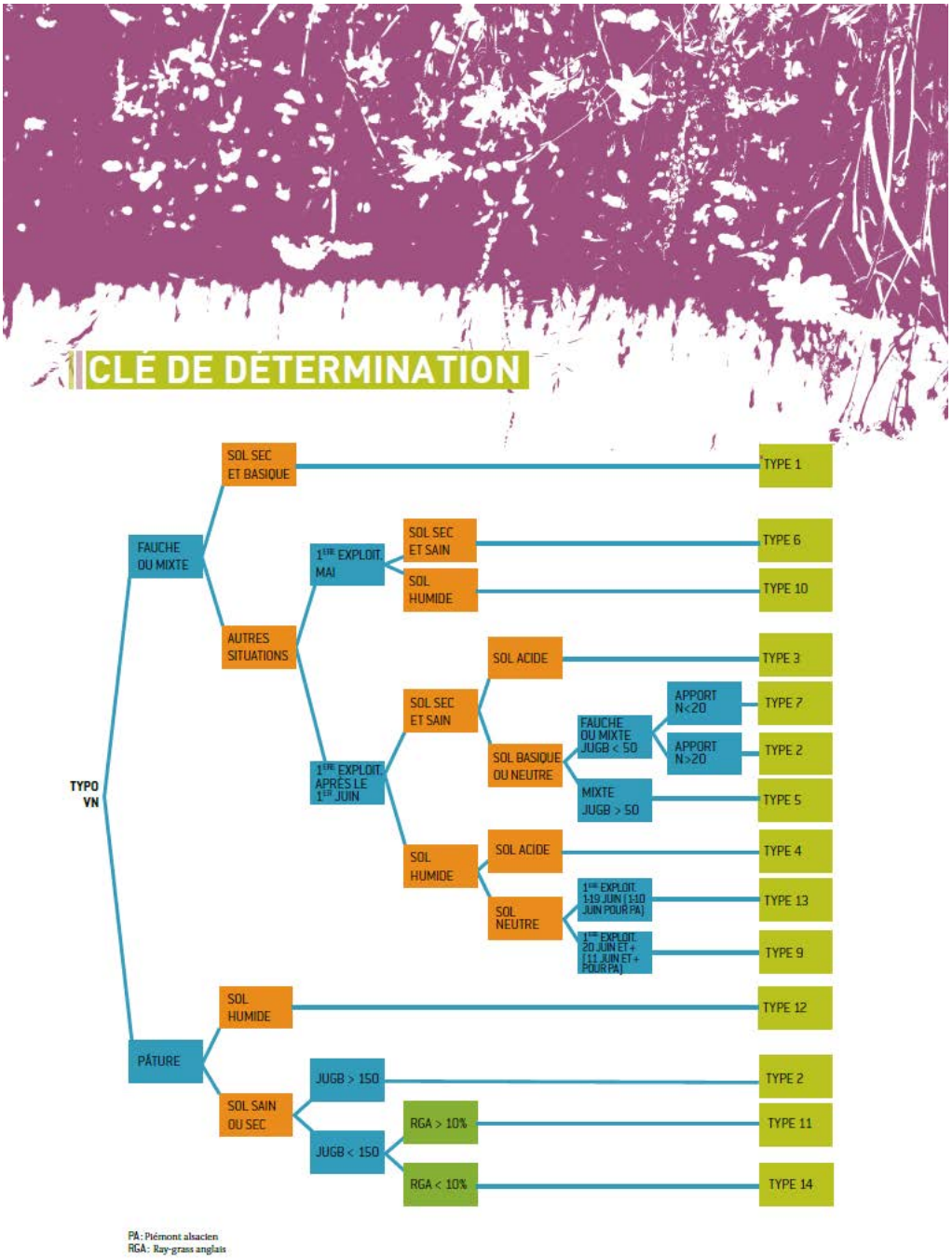
Type	Nom	Combinaison caractéristique
Prairies mésophiles des Arrhenatheretea		
Phy_01	Alchemillo xanthochlorae - Arrhenatheretum elatioris	*Anthoxanthum odoratum, Luzula campestris, Colchicum autumnale, Bistorta officinalis, Pimpinella major, Potentilla erecta, Alchemilla xanthochlora*
Phy_02	Arrhenatheretum elatioris	*Centaurea jacea, Arrhenatherum elatius, Trisetum flavescens, Crepis biennis, Rhinanthus alectorolophus, Medicago lupilina, Daucus carota, Anthriscus sylvestris*
Phy_03	Centaureo nigrae - Arrhenatheretum elatioris	*Arrhenatherum elatius, Luzula campestris, Leontodon hispidus, Pimpinella major, Potentilla erecta, Alchemilla xanthochlora, Centaurea decipiens*
Phy_04	Galio veri - Trigolietum repentis	*Poterium sanguisorba, Knautia arvensis, Medicago lupulina, Daucus carota, Ranunculus bulbosus, Scabiosa columbaria, Salvia pratensis*
Phy_05	Heracleo sphondylii - Brometum mollis	*Poa trivialis, Taraxacum officinale, Heracleum sphondylium, Lolium perenne, Rumex obtusifolius, Bromus hordeaceus*
Phy_06	Meo athamantici - Festucetum rubrae	*Festuca rubra, Meum athamanticum, Arrhenatherum elatius, Lathyrus linifolius, Potentilla erecta, Platanthera chloratha, Geranium sylvaticum*
Phy_07	Alchemillo monticolae - Brometum mollis	*Bistorta officinalis, Geranium sylvaticum, Lolium perenne, Anthriscus sylvestris, Alchemilla xanthochlora*
Phy_08	Luzulo campestris - Cynosuretum cristati	*Hypochaeris radicata, Trifolium repens, Luzula campestris, Agrostis capillaris, Potentilla erecta, Polygala vulgaris*
Phy_09	Medicagini lupulinae - Cynosuretum cristati	*Bromopsis erecta, Poterium sanguisorba, Festuca rubra, Achillea millefolium, Ranunculus bulbosus, Cynosurus cristatus, Medicago lupulina, Briza media, Trifolium dubium*
Phy_10	Alchemillo monticolae - Cynosuretum cristati	*Trifolium repens, Agrostis capillaris, Alchemilla monticola, Cynosurus cristatus, Alchemilla xanthochlora*
Phy_11	Leontodo - Festucetum	*Festuca rubra, Galium saxatile, Scorzoneroides pyrenaica, Viola lutea, Epikeros pyrenaeus, Trifolium repens, Meum athamanticum, Stellaria graminea*
Phy_12	Lolio perennis - Cynosuretum cristati	*Lolium perenne, Trifolium repens, Poa trivialis, Taraxacum officinale, Ranunculus repens*
Prairies inondables des *Agrostietea*		
Phy_14	Oenantho fistulosae - Caricetum vulpinae	*Carex vulpina, Phalaris arundinacea, Oenanthe fistulosa, Iris pseudacorus*
Phy_15	Senecioni aquatici – Brometum racemosi	*Schedonorus pratensis, Jacobaea aquatic, Plantago lanceolate, Carex disticha, Bromus racemosus*
Phy_16	Junco acutiflori - Cynosuretum cristati	*Juncus acutiflorus, Juncus effusus, Lotus pedunculatus, Trifolium repens, Ranunculus flammula, Cirsium palustre*
Prairies marécageuses des *Molinio-Juncetea*		
Phy_18	Junco conglomerati - Scorzoneretum humilis	*Scorzonera humilis, Lychnis flos-cuculi, Ranunculus acris, Juncus acutiflorus, Plantago lanceolata, Ranunculus repens, Trifolium pratense, Lotus pedunculatus, Juncus conglomeratus, Centaurea jacea, Trifolium repens*
Phy_20	Crepido paludosae - Juncetum acutiflori	*Juncus acutiflorus, Carex panicea, Cirsium palustre, Carex echinata, Potentilla erecta, Carex nigra, Bistorta officinalis, Succisa pratensis, Crepis paludosa, Viola palustris, Valeriana dioica, Eriophorum angustifolium, Luzula multiflora*

Pelouses calcicoles des *Festuco - Brometea*		
Phy_21	Xerobrometum erecti	*Teucrium chamaedrys, Trinia glauca, Globularia bisnagarica, Teucrium montanum, Allium sphaerocephalon, Potentilla pusilla, Galatella linosyris, Fumana procumbens, Galium glaucum, Koeleria vallesiana, Potentilla incana, Artemisia alba*
Phy_22	Onobrychido viciifoliae - Brometum erecti	*Bromopsis erecta, Onobrychis viciifolia, Salvia pratensis, Knautia arvensis, Primula veris, Dianthus carthusianorum*
Phy_23	Festuco lemanii - Brometum erecti	*Bromopsis erecta, Teucrium chamaedrys, Helianthemum nummularium Eryngium campestre, Festuca lemanii, Seseli montanum*
Pelouses acidiphiles des *Nardetea*		
Phy_25	Nardo stricta - Vaccinietum	*Galium saxatile, Nardus stricta, Scorzoneroides pyrenaica, Arnica montana, Viola lutea, Meum athamanticum, Epikeros pyrenaeus, Polygala serpyllifolia*
Phy_27	Nardo strictae - Juncetum squarrosi	*Nardus stricta, Juncus squarrosus, Molinia caerulea, Polygala serpyllifolia, Carex panacea, Pedicularis sylvatica, Agrostis canina*
Phy_29	Festuco rubrae - Genistetum sagittalis	*Festuca ovina* subsp. *Guestfalica, Genista sagittalis, Viola canina, Helianthemum nummularium, Galium pumilum, Euphorbia cyparissias*
Phy_30	Viscario vulgaris - Festucetum filiformis	*Festuca filiformis, Viscaria vulgaris, Botrychium lunaria, Botrychium matricariifolium, Oreoselinum nigrum, Festuca brevipila*
Phy_31	Caraci piluliferae - Agrostietum capillaris	*Galium saxatile, Avenella flexuosa, Agrostis capillaris, Rumex acetosella, Carex pilulifera, Festuca rubra*

Annexe 3 Extrait de la typologie agronomique des Ballons des Vosges (Collectif, 2006)



Annexe 4 Extrait de la typologie agronomique des Vosges du Nord (Bayeur et al., 2013)



TYPE 3

Fauche ou mixte tardive d'altitude sur grès vosgien

MILIEU

PLATEAU OU COTEAU
300 À 400M D'ALTITUDE

ROCHE MÈRE GRÉSEUSE
SOL ACIDE

SOL SAIN À SÉCHANT

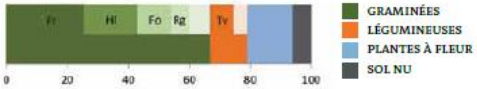
PRATIQUES AGRICOLES CORRESPONDANTES

UTILISATION → OU

1ère exploitation : après le 20 juin
Nombre de coupes : mixte : 1, fauche : 1 à 2
Chargement : 70 à 120 jours UGB/ha/an (100 en moyenne)
Apports azotés : 0 à 40 unités d'azote/ha/an (20 en moyenne) dont 0 à 20 unités (10 en moyenne) d'apports organiques et, si utilisation mixte, 10 à 20 unités (15 en moyenne) par restitution au pâturage

COMPOSITION DE LA VÉGÉTATION

Répartition moyenne des catégories botaniques :



Fond prairial :
Fétuque rouge (Fr), Flouve odorante (Fo), Houlque laineuse (Hl), Trèfle violet (Tv), Ray grass anglais (Rg)
Espèces caractéristiques et/ou indicatrices :
Fromental, Avoine jaunâtre, Trèfle douteux, Petite rhinanthe, Petite oseille, Stellaire graminée

TYPE 3

Fauche ou mixte tardive d'altitude sur grès vosgien

VALEUR AGRONOMIQUE

POTENTIEL DE PRODUCTION →

Rendement moyen observé : 4.2 tMS/ha

Gamme des rendements observés :

1 2 3 4 5 6 7 8

Rendement potentiel : 4.3 tMS/ha
Potentiel de production moyen lié à un mélange de graminées peu productives et de graminées à fort taux de croissance mais n'accumulant pas une forte biomasse sur pied.

VALEUR ALIMENTAIRE →

Faible valeur alimentaire liée à une faible proportion de graminées de qualité

SOUPLESSE D'EXPLOITATION →

Faible souplesse
Dominance de graminées précoces

COÛT DE PRODUCTION → 55 €/tMS en moyenne

Fonction fourragère sur l'exploitation :
Prairie à potentiel assez limité adaptée à une utilisation mixte permettant la constitution de stocks de valeur alimentaire médiocre, et un pâturage d'animaux tolérants une qualité moyenne de fourrage
Repousses estivales aléatoires

VALEUR ÉCOLOGIQUE

INTÉRÊT FLORISTIQUE →

Gamme de la richesse floristique :

20 30 40 50 60

Pas d'espèces protégées ou rares identifiées dans les relevés floristiques

6510 : prairies maigres de fauche, état de conservation mauvais à moyen

INTÉRÊT POUR
LES INSECTES POLLINISATEURS →

Abondance moyenne d'espèces entomogames mais qui atteignent souvent leur pic de floraison

CONSEIL DE GESTION PAR RAPPORT À L'INTÉRÊT ÉCOLOGIQUE ET AGRONOMIQUE

Intérêt floristique du fait de la présence d'espèces caractéristiques des milieux peu fertilisés, malgré un nombre global d'espèce peu important.
Le respect d'un niveau de fertilisation inférieur à 30-40 unités d'azote par hectare et par an, et un pâturage léger permettront de préserver la valeur écologique et la valeur alimentaire du fourrage. Une intensification forte de ce type de prairie risque de ne pas apporter un supplément important de rendement en raison du déficit en eau et de l'acidité du sol.

Annexe 5 Description des 25 types agronomiques du massif vosgien, d'après Collectif (2006) et Bayeur et al (2013)

A : Types de prairies des Ballons des Vosges

Type	**Nom**	**Combinaison caractéristique**
BV_01	Fauche d'altitude	*Viola lutea, Poa chaixii, Meum athamanticum, Bistorta officinalis*
BV_02	Pâture d'altitude	*Gentiana lutea, Arnica montana, Nardus stricta, Potentilla erecta, Vaccinium myrtillus, Poa chaixii*
BV_03	Pâture sur milieu humide	*Caltha palustris, Angelica sylvestris, Petasites hybridus, Heracleum sphondylium, Ranunculus repens*
BV_04	Fauche sur milieu humide	*Juncus effusus, Succisa pratensis, Heracleum sphondylium, Alchemilla vulgaris, Equisetum* sp., *Bistorta officinalis*
BV_05	Parcours de moyenne altitude	*Cytisus scoparius, Stachys officinalis, Viola canina, Centaurea jacea, Pteridium aquilinum, Rumex crispus*
BV_06	Pâture extensive	*Pteridium aquilinum, Cirsium arvense, Alchemilla vulgaris, Allium vineale, Rubus sp., Ranunculus repens*
BV_07	Pâture intensive	*Heracleum sphondylium, Cruciata laevipes, Rumex crispus, Ranunculus repens*
BV_08	Fauche extensive	*Centaurea jacea, Heracleum sphondylium, Equisetum* sp., *Bistorta officinalis*
BV_09	Prairie mixte extensive	*Pulmonaria officinalis, Lathyrus pratensis, Heracleum sphondylium, Allium vineale, Rumex crispus*
BV_10	Prairie mixte fertilisée tardive	*Heracleum sphondylium, Alchemilla vulgaris, Ranunculus bulbosus, Bistorta officinalis*
BV_11	Prairie mixte fertilisée précoce	*Pimpinella major, Plantago media, Heracleum sphondylium, Alchemilla vulgaris*

B : Types de prairies des Vosges du Nord

Type	Nom	Combinaison caractéristique
VN_01	Fauche ou mixte tardive sur sol sec et calcaire à brome dressé	*Briza media, Onobrychis viciifolia, Knautia arvensis, Sanguisorba minor, Plantago media, Ranunculus bulbosus, Salvia pratensis*
VN_02	Fauche sur sol sain à sec à houlque laineuse	*Briza media, Avenula pubescens, Arrhenatherum elatius, Campanula rapunculus, Leontodon hispidus, Rhinanthus minor, Hypochaeris radicata, Tragopogon pratensis, Polygala vulgaris, Lychnis flos-cuculi*
VN_03	Fauche ou mixte tardive d'altitude sur grès vosgien	*Arrhenatherum elatius, Trisetum flavescens, Trifolium dubium, Rhinanthus minor, Rumex acetosella, Stellaria graminea*
VN_04	Fauche sur sol humide et acide	*Deschampsia cespitosa, Cynosurus cristatus, Festuca pratensis, Holcus mollis, Carex* sp., *Juncus* sp., *Dactylorhiza majalis, Lysimachia nummularia, Filipendula ulmaria, Lychnis flos-cuculi*
VN_05	Prairie mixte tardive sur sol sain	*Briza media, Trisetum flavescens, Arrhenatherum elatius, Colchicum autumnale, Crepis biennis, Knautia arvensis, Leontodon hispidus, Sanguisorba minor*
VN_06	Fauche ou mixte précoce sur sol sain à séchant à flouve odorante	*Colchicum autumnale, Luzula campestris, Hypochaeris radicata, Saxifraga granulata, Lychnis flos-cuculi, Alopecurus pratensis*
VN_07	Fauche sur sol sain à séchant à brome dressé	*Bromus hordeaceus, Arrhenatherum elatius, Medicago lupulina, Colchicum autumnale, Sanguisorba minor, Tragopogon pratensis, Saxifraga granulata*
VN_08	Pâture à fort chargement sur sol sain	*Poa annua, Capsella bursa-pastoris, Cirsium sp., Urtica dioica, Bellis perennis, Taraxacum sp., Potentilla reptans*
VN_09	Fauche ou mixte tardive sur sol humide à colchique d'automne	*Agrostis stolonifera, Carex sp., Geum rivale, Colchicum autumnale, Lathyrus pratensis, Sanguisorba officinalis, Lysimachia nummularia, Filipendula ulmaria, Lychnis flos-cuculi*
VN_10	Prairie mixte ou pâturée précoce sur sol humide et fertile	*Cynosurus cristatus, Cardamine pratensis, Symphytum officinale, Convolvulus arvensis, Lysimachia nummularia, Potentilla anserina, Potentilla reptans*
VN_11	Pâture sur sol sain et fertile à ray-grass anglais	*Ranunculus* sp., *Cardamine pratensis, Cirsium arvense, Glechoma hederacea, Plantago media, Primula* sp., *Alopecurus pratensis*
VN_12	Pâture sur sol humide	*Agrostis stolonifera, Phleum pratense, Cirsium sp., Ficaria verna, Glechoma hederacea, Taraxacum* sp., *Urtica dioica*
VN_13	Fauche ou mixte sur sol humide et fertile à houlque laineuse et ray-grass anglais	*Cynosurus cristatus, Taraxacum sp., Ranunculus repens, Rumex obtusifolius*
VN_14	Pâture sur sol sain et peu fertile à fétuque rouge	*Bromus hordeaceus, Medicago lupulina, Daucus carota, Luzula campestris, Plantago lanceolata, Saxifraga granulata*

Annexe 6 Corrélations entre critères prédictifs

A : Critères climatiques

Les températures, précipitations et radiations mensuelles étant extrêmement corrélées aux moyennes annuelles et cumules annuels, elles ne sont pas affichées afin de simplifier la lecture du tableau

	Dimension 1	Dimension 2	Dimension 3	Dimension 4	Dimension 5
Altitude	0,98	0,06	-0,03	-0,05	0,00
Pente	0,39	-0,16	-0,03	-0,30	0,30
Températures annuelles moyennes	-0,97	-0,05	0,14	0,08	0,01
Température annuelles cumulées	-0,97	-0,05	0,14	0,08	0,01
Précipitations annuelles moyennes	0,94	0,08	0,11	0,02	-0,04
Précipitations annuelles cumulées	0,94	0,08	0,11	0,02	-0,04
Radiations annuelles moyennes	0,56	0,20	0,74	0,21	0,04
Radiations annuelles cumulées	0,56	0,20	0,74	0,21	0,04
Evapotranspiration annuelle moyenne	-0,75	0,09	0,55	0,27	0,08
Evapotranspiration annuelle cumulée	-0,75	0,09	0,55	0,27	0,08
Evapotranspiration moyenne janv.	-0,94	0,03	0,19	0,12	-0,01
Evapotranspiration moyenne fev.	-0,89	0,05	0,33	0,16	0,00
Evapotranspiration moyenne mars	-0,91	0,01	0,32	0,17	0,06
Evapotranspiration moyenne avril	-0,85	0,05	0,43	0,21	0,06
Evapotranspiration moyenne mai	-0,86	0,06	0,40	0,24	0,08
Evapotranspiration moyenne juin	-0,78	0,11	0,44	0,31	0,11
Evapotranspiration moyenne juil.	-0,66	0,15	0,59	0,35	0,10
Evapotranspiration moyenne aout	-0,39	0,16	0,81	0,36	0,11
Evapotranspiration moyenne sept.	-0,25	0,14	0,87	0,31	0,09
Evapotranspiration moyenne oct.	-0,13	0,12	0,91	0,30	0,10
Evapotranspiration moyenne nov.	-0,76	0,04	0,54	0,24	0,08
Evapotranspiration moyenne dec.	-0,93	0,02	0,16	0,09	-0,03
Réserve utile annuelle moyenne	-0,35	0,60	-0,33	0,50	0,27
Réserve utile annuelle cumulée	-0,35	0,60	-0,33	0,50	0,27
Réserve utile moyenne janv.	-0,59	0,57	-0,29	0,36	0,19
Réserve utile moyenne fev.	-0,25	0,51	-0,34	0,58	0,32
Réserve utile moyenne mars	-0,51	0,56	-0,30	0,45	0,25
Réserve utile moyenne avril	-0,60	0,57	-0,27	0,34	0,16
Réserve utile moyenne mai	-0,60	0,57	-0,27	0,34	0,17
Réserve utile moyenne juin	-0,55	0,59	-0,26	0,35	0,15
Réserve utile moyenne juil.	-0,42	0,63	-0,33	0,41	0,21
Réserve utile moyenne aout	-0,25	0,64	-0,30	0,48	0,27
Réserve utile moyenne sept.	0,11	0,61	-0,35	0,51	0,31
Réserve utile moyenne oct.	0,19	0,48	-0,32	0,59	0,35
Réserve utile moyenne nov.	0,00	0,52	-0,32	0,61	0,32
Réserve utile moyenne dec.	0,00	0,40	-0,29	0,62	0,39

B : Critères du paysage

		Dimension 1	Dimension 2	Dimension 3	Dimension 4	Dimension
CLC_112	Tissu urbain discontinu	-0,36	-0,17	0,08	0,27	0,14
CLC_142	Équipements sportifs et loisirs	0,02	-0,14	-0,20	-0,06	-0,02
CLC_211	Terres arables non irriguées	-0,40	0,57	0,00	-0,24	-0,17
CLC_222	Vergers et petits fruits	-0,27	-0,13	-0,03	-0,09	0,20
CLC_231	Prairies	-0,13	0,05	0,28	-0,08	0,07
CLC_242	Cultures et parcellaires complexes	-0,11	-0,05	-0,06	0,03	-0,05
CLC_243	Essentiellement agricoles et espaces naturels	0,12	0,13	0,16	0,02	-0,09
CLC_311	Forêts de feuillus	0,10	-0,10	-0,20	-0,07	-0,02
CLC_312	Forêts de conifères	0,36	-0,04	0,16	0,32	-0,12
CLC_313	Forêts mélangées	-0,10	-0,43	-0,16	0,00	0,07
CLC_321	Pelouses et pâturages naturels	0,68	0,18	-0,17	0,00	0,09
CLC_322	Landes et broussailles	0,28	0,03	0,40	0,06	-0,23

C : Critères des pratiques agricoles

	Dimension 1	Dimension 2	Dimension 3	Dimension 4	Dimension 5
Fertilisation : Organique N	0,29	-0,16	0,29	-0,17	-0,13
Fertilisation : Organique P	0,23	-0,14	0,28	-0,23	-0,12
Fertilisation : Organique K	0,26	-0,17	0,28	-0,21	-0,10
Fertilisation : Retour au pâturage N	0,07	-0,14	0,04	-0,46	0,70
Fertilisation : Retour au pâturage P	0,07	-0,14	0,04	-0,46	0,70
Fertilisation : Retour au pâturage K	0,07	-0,14	0,04	-0,46	0,70
Fertilisation : Minérale N	-0,18	-0,08	0,16	0,19	-0,09
Fertilisation : Minérale P	-0,22	-0,16	0,13	0,12	-0,11
Fertilisation : Minérale K	-0,22	-0,15	0,14	0,13	-0,11
Fertilisation : Totale N	0,24	-0,23	0,27	-0,41	0,35
Fertilisation : Totale P	0,19	-0,22	0,25	-0,48	0,37
Fertilisation : Totale K	0,23	-0,24	0,26	-0,44	0,35
Date de 1er utilisation (nb de jours)	0,34	0,20	-0,24	0,14	-0,55
Date de 1er utilisation (°C.j)	-0,21	0,21	-0,07	0,08	-0,63
Ratio Fauches/Pâturage	-0,27	0,12	0,19	0,27	-0,65
Nombre de fauches	-0,29	0,07	0,20	0,19	-0,42
Nombre de pâturage	0,16	-0,17	0,01	-0,36	0,72
Densité de pâturage (nb de jours)	0,06	-0,09	-0,34	-0,03	0,51
Densité de pâturage (j.UGB/ha)	0,07	-0,14	0,04	-0,46	0,70

D : Critères édaphiques

Les horizons superficiels (0-10 cm) et profonds (10-30 cm) étant fortement corrélés, seuls l'horizon superficiel est affiché afin de simplifier la lecture du tableau

	Dimension 1	Dimension 2	Dimension 3	Dimension 4	Dimension 5
Argile	-0,12	0,86	-0,11	-0,32	-0,01
Limons fins	0,14	0,78	0,06	0,01	0,11
Limons grossiers	-0,18	0,64	0,00	0,16	0,09
Sables fins	-0,20	-0,53	-0,08	0,16	-0,18
Sables grossiers	0,15	-0,76	0,07	0,03	0,02
Profondeur	-0,33	-0,09	-0,13	-0,09	-0,34
CEC (Metson)	0,61	0,70	-0,06	-0,10	0,00
CEC (Cobalti)	-0,13	0,78	0,06	-0,49	-0,14
pH	-0,55	0,47	0,19	-0,51	-0,27
C/N	0,76	0,07	-0,19	0,21	-0,18
Carbone organique	0,79	0,38	-0,17	0,07	-0,04
Matière organique	0,79	0,38	-0,17	0,07	-0,04
Azote total	0,75	0,45	-0,11	0,05	-0,02
Carbonate totaux	-0,29	0,47	-0,04	-0,40	-0,14
Aluminium échangeable (Cobalti)	0,59	0,10	-0,39	0,36	0,22
CaO échangeable (AES)	-0,33	0,70	0,09	-0,47	-0,20
CaO échangeable (Cobalti)	-0,26	0,71	0,13	-0,50	-0,21
Fer échangeable (Cobalti)	0,47	0,14	-0,30	0,24	0,18
K2O échangeable (AES)	0,28	0,18	0,33	-0,49	0,37
K2O échangeable (Cobalti)	0,26	0,07	0,32	-0,48	0,48
MgO échangeable (AES)	-0,32	0,59	0,11	-0,59	-0,12
MgO échangeable (Cobalti)	-0,31	0,58	0,13	-0,60	-0,10
Mn échangeable (AES)	0,11	-0,30	-0,23	0,34	0,31
Mn échangeable (Cobalti)	0,11	0,14	-0,20	0,01	0,33
Na2O échangeable (AES)	0,34	0,36	0,05	0,06	-0,37
Na2O échangeable (Cobalti)	0,28	0,46	0,07	-0,08	-0,33
P2O5 assimilable	0,11	-0,10	0,37	0,04	0,20

E : Indices d'Ellenberg

	Dimension 1	Dimension 2	Dimension 3	Dimension 4	Dimension 5
Indice de fertilité	-0,37	-0,03	0,36	-0,36	0,04
Indice d'état calcique	-0,41	-0,08	0,39	-0,20	-0,18
Indice d'humidité	-0,14	-0,23	0,07	-0,18	0,02
Indice de pâturage	0,27	-0,27	0,07	0,02	-0,12

Annexe 7 Scores des critères et des espèces selon les analyses de redondances (RDA)

A : Prédiction des présences d'espèces

	RDA 1	RDA 2	RDA 3	RDA 4	RDA 5	RDA 6
Agrostis capillaris	0,10	-0,10	0,01	-0,02	-0,03	-0,01
Anthriscus sylvestris	-0,05	-0,06	-0,02	-0,01	0,00	0,10
Arrhenatherum elatius	-0,11	0,09	-0,04	-0,06	-0,08	0,09
Bromus erectus	-0,05	0,12	-0,04	0,07	0,00	-0,02
Carex sp.	0,14	0,12	0,05	0,00	0,01	-0,02
Cytisus scoparius	0,13	0,02	0,07	0,03	0,00	0,05
Daucus carota	-0,04	0,12	-0,03	0,04	-0,04	0,01
Festuca rubra	0,10	-0,01	0,00	-0,02	-0,02	-0,03
Galium saxatile	0,22	-0,02	0,00	0,08	0,03	0,02
Hieracium pilosella	0,02	0,01	0,06	-0,05	-0,03	-0,01
Holcus lanatus	-0,16	-0,01	0,10	-0,11	0,06	0,00
Hypochaeris radicata	-0,03	0,01	0,06	-0,03	-0,01	-0,07
Lolium perenne	-0,18	-0,05	0,05	0,09	0,04	0,05
Lotus corniculatus	-0,05	0,14	-0,03	-0,07	0,05	-0,05
Plantago lanceolata	-0,16	-0,02	0,01	-0,05	-0,01	0,01
Poa trivialis	-0,14	0,01	0,04	0,04	0,01	0,04
Potentilla erecta	0,17	0,01	0,01	0,01	0,05	-0,01
Primula veris	-0,03	0,09	-0,03	0,05	-0,01	-0,01
Ranunculus acris	-0,12	-0,13	-0,02	0,06	0,01	-0,04
Stachys officinalis	0,05	-0,01	-0,01	0,01	0,03	-0,01
Taraxacum sp.	-0,13	-0,13	0,00	0,04	0,06	-0,03
Trifolium pratense	-0,04	-0,04	0,03	-0,01	-0,07	0,07
Trifolium repens	-0,17	-0,03	-0,03	-0,03	-0,04	-0,03
Trisetum flavescens	-0,14	-0,02	-0,02	-0,04	-0,05	-0,05
Vaccinium myrtillus	0,19	-0,02	-0,03	0,06	0,04	0,02
Aluminium échangeable (Cobalti, 0-10 cm)	0,89	-0,15	-0,11	0,10	0,06	0,05
Aluminium échangeable (Cobalti, 10-30 cm)	0,76	-0,31	-0,34	-0,03	0,02	-0,09
Azote total (0-10 cm)	0,50	-0,28	-0,43	0,37	0,14	-0,01
C/N (0-10 cm)	0,62	-0,27	-0,44	-0,02	0,06	-0,16
Carbone organique (10-30 cm)	0,47	-0,39	-0,48	0,24	0,07	-0,08
CEC (Metson, 10-30 cm)	0,19	-0,22	-0,50	0,47	0,09	0,05
Date de 1er utilisation (°C.j)	-0,19	0,45	-0,54	-0,31	0,15	0,15
Date de 1er utilisation (nb de jours)	0,28	0,16	-0,73	-0,25	0,05	0,03
Fertilisation organique (u/ha)	-0,22	-0,39	-0,23	0,02	-0,18	0,45
Forêt de conifères	0,34	-0,18	-0,20	0,00	0,24	0,52
Forêts mélangée	0,04	-0,01	0,32	-0,27	-0,60	0,04
K2O échangeable (0-10 cm)	-0,20	-0,29	-0,05	0,45	-0,37	-0,04
Matière organique (%, 0-10 cm)	0,55	-0,30	-0,45	0,30	0,11	-0,11
MgO échangeable (0-10 cm)	-0,38	0,50	-0,18	0,50	-0,17	0,08
Mn échangeable (0-10 cm)	-0,06	0,05	0,32	-0,40	-0,10	-0,03
Mode de la 1er utilisation (Pâturage)	0,52	-0,24	0,39	0,27	-0,18	-0,20
pH (10-30 cm)	-0,54	0,66	-0,13	0,46	-0,08	-0,01
Précipitations moyennes (février)	0,32	-0,67	-0,58	0,07	-0,03	0,04
Précipitations moyennes (juillet	0,55	-0,62	-0,42	0,12	-0,01	0,06
Précipitations moyennes (juin	0,29	-0,74	-0,49	0,10	0,01	0,10
Précipitations moyennes (mars	0,24	-0,71	-0,49	0,04	-0,02	0,14
Précipitations moyennes (novembre)	0,25	-0,64	-0,61	0,04	-0,08	0,00
Température moyenne (juillet)	-0,58	0,51	0,47	-0,20	0,18	-0,01
Terres arables	-0,22	0,65	-0,24	0,39	-0,01	0,07

B : Prédiction des abondances

	RDA 1	RDA 2	RDA 3	RDA 4	RDA 5	RDA 6
Agrostis capillaris	0,25	-0,18	-0,19	-0,02	0,16	-0,02
Anthriscus sylvestris	-0,02	-0,01	-0,02	-0,01	0,01	0,00
Arrhenatherum elatius	-0,12	0,32	-0,06	-0,05	0,01	-0,04
Bromus erectus	-0,06	0,30	-0,09	0,08	-0,10	0,07
Carex sp.	0,07	0,06	0,06	-0,02	-0,03	0,06
Cytisus scoparius	0,06	0,00	-0,01	-0,04	0,00	0,02
Daucus carota	-0,01	0,05	-0,02	0,00	0,00	-0,01
Festuca rubra	0,48	-0,07	0,12	-0,05	-0,11	-0,13
Galium saxatile	0,20	-0,02	-0,04	-0,09	0,02	0,10
Hieracium pilosella	0,01	0,03	0,04	-0,03	0,03	-0,02
Holcus lanatus	-0,36	-0,13	0,19	-0,12	0,07	-0,02
Hypochaeris radicata	0,00	0,01	0,03	-0,01	0,01	-0,08
Lolium perenne	-0,35	-0,17	-0,18	-0,13	-0,14	0,06
Lotus corniculatus	-0,01	0,14	0,02	0,02	0,00	-0,01
Plantago lanceolata	-0,12	-0,03	0,10	0,09	0,05	-0,01
Poa trivialis	-0,15	-0,01	-0,08	-0,08	0,10	-0,02
Potentilla erecta	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00	0,03
Primula veris	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ranunculus acris	-0,12	-0,18	-0,10	0,01	-0,17	-0,05
Stachys officinalis	0,00	0,00	0,02	0,01	-0,01	0,02
Taraxacum sp.	-0,08	-0,13	-0,06	0,00	-0,04	-0,03
Trifolium pratense	-0,03	0,02	-0,06	-0,11	0,01	-0,07
Trifolium repens	-0,13	0,03	0,02	0,15	0,02	-0,07
Trisetum flavescens	-0,16	-0,03	-0,03	0,12	-0,09	-0,07
Vaccinium myrtillus	0,16	-0,02	-0,02	-0,05	0,01	0,12
Aluminium échangeable (Cobalti, 0-10 cm)	0,85	-0,17	-0,03	-0,10	0,06	0,34
Aluminium échangeable (Cobalti, 10-30 cm)	0,79	-0,25	-0,03	0,16	0,11	0,02
Carbonates totaux (10-30 cm)	-0,08	0,79	-0,30	0,20	-0,24	0,11
Date de 1er utilisation (°C.j)	-0,13	0,52	0,20	0,40	0,49	0,09
Date de 1er utilisation (nb de jours)	0,35	0,26	0,08	0,55	0,45	0,16
K2O échangeable (AES, 0-10 cm)	-0,16	-0,13	-0,62	0,09	-0,25	-0,17
Limons grossiers (%, 0-10 cm)	-0,32	0,09	-0,22	0,05	0,30	0,29
Mode de la 1er utilisation (Pâturage)	0,51	-0,33	-0,30	-0,32	-0,35	-0,07
Na2O échangeable (AES, 10-30 cm)	-0,15	-0,05	-0,09	0,46	-0,12	0,38
P2O5 assimilable (0-10 cm)	-0,31	-0,27	-0,20	-0,07	0,27	-0,08
Pente	0,30	-0,22	-0,47	-0,26	-0,05	-0,33
Prairies	-0,32	-0,12	-0,08	0,01	-0,06	0,09
Précipitations moyennes (février)	0,34	-0,52	-0,20	0,47	0,21	-0,05
Précipitations moyennes (juillet	0,53	-0,53	-0,14	0,25	0,09	0,08
Précipitations moyennes (juin	0,29	-0,59	-0,17	0,34	0,17	-0,03
Température moyenne (juillet)	-0,60	0,36	0,29	-0,28	-0,06	-0,04
Terres arables	-0,20	0,68	-0,30	0,15	-0,08	0,09
Tissu urbain	-0,23	0,00	0,57	0,06	-0,29	-0,17
Vergers et petits fruits	-0,11	-0,19	-0,17	-0,01	-0,44	0,11

Annexe 8 Description des classes de milieux et de pratiques

Les critères peuvent être positivement corrélés (+, vert) ou négativement (-, rouge) à chaque classe

A : Critères du milieu : climat, paysage et sol

	Classe 1 (noir)	Classe 2 (rouge)	Classe 3 (vert)	Classe 4 (bleu)	Classe 5 (turquoise)	Classe 6 (violet)	Classe 7 (jaune)
Altitude	-	-				+	+
Pente			-	+	+		
Températures	+	+	+ (oct et nov)			-	-
Précipitations	-	-			+ (sept)	+	+
Radiations		-	+		-	+	
Evapotranspiration	+	+	+		-	+ oct. -	-
Réserve utile	+	-	+	-	+ (fin automne)	-	
CLC 112			+				
CLC 142					+		
CLC 211	+						
CLC 222		+					
CLC 231		-	+			+	-
CLC 242					+		
CLC 312						+	
CLC 313		+					
CLC 321							+
CLC 322						+	
Argile	+	-					
Limons fins	+	-	+				
Limons grossiers	+	-	+				
Sable fins	-	+					
Sables grossiers	-	+		+			
pH	+				-		
CEC	+	-					+
Matière organique		-				+	+
C/N	-	-		-		+	+
Carbone organique		-				+	+
N total		-				+	+
Carbonates	+						
Al échangeable	-	-		-	+	+	+
CaO échangeable	+	-					
Fe échangeable							+
K_2O échangeable		-		+			
MgO échangeable	+						
Mn échangeable (0-10)	-	+					
Mn échangeable (10-30)	+	+					
Na_2O échangeable	+	-					+
P_2O_5 assimilable			+	+			

B : Critères des pratiques agricoles

	Classe 1 (noir)	Classe 2 (rouge)	Classe 3 (vert)	Classe 4 (bleu)	Classe 5 (turquoise)	Classe 6 (violet)	Classe 7 (jaune)
Date d'utilisation (°C.j)				-			
Date d'utilisation (jours)				-		+	+
Fertilisation minérale N			+				
Fertilisation minérale P		+					
Fertilisation organique K				+			
Fertilisation totale N	-			+			
Fertilisation totale P				+			
Fertilisation totale K				+			
Nombre de fauches			+				
Nombre de pâturages				+			
Nombre de jours pâturés					+		
Ratio Fauches/Pâturage			+		-		

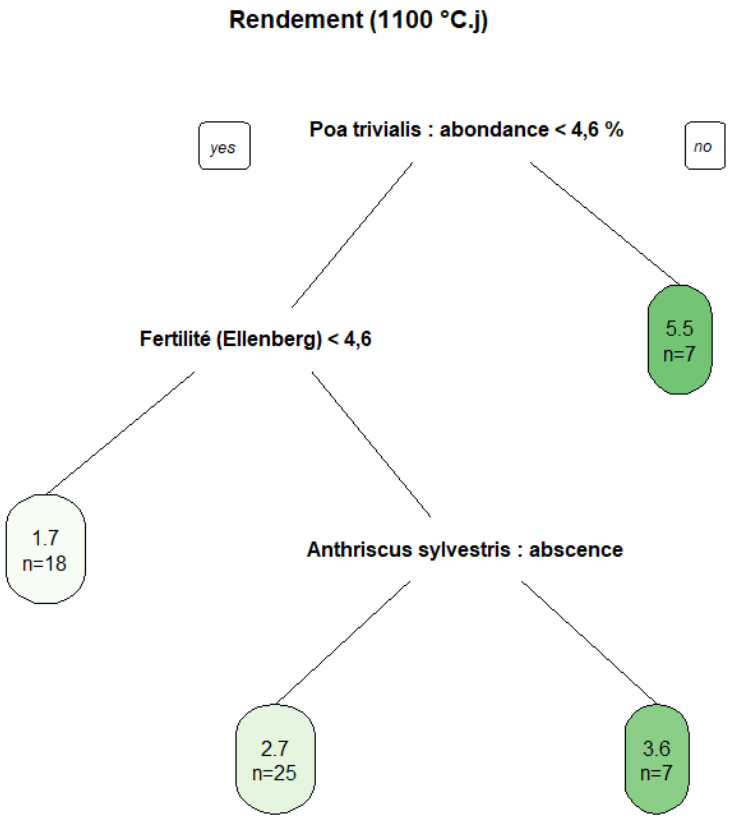
C : Indices d'Ellenberg

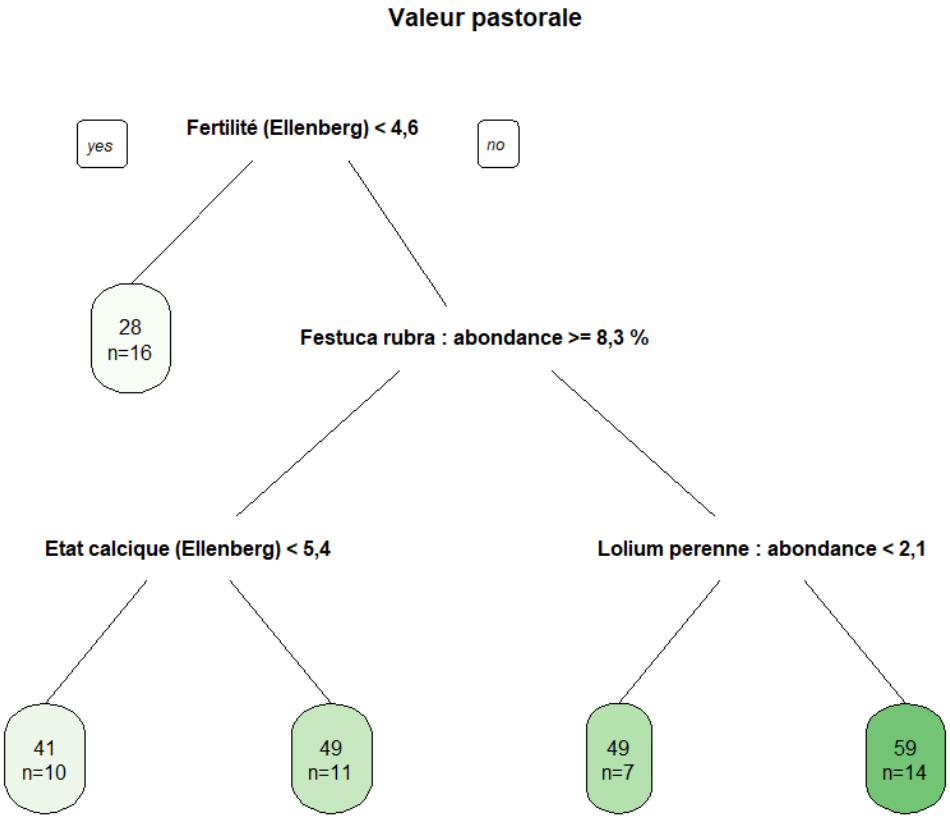
	Classe 1 (noir)	Classe 2 (rouge)	Classe 3 (vert)	Classe 4 (bleu)	Classe 5 (turquoise)	Classe 6 (violet)	Classe 7 (jaune)
Ellenberg : état calcique				+	-		-
Ellenberg : fertilité				+	-		-
Ellenberg : pâturage						+	

Annexe 9 Détail des modèles créés pour prédire chaque propriété prairiale par les typologies uniquement

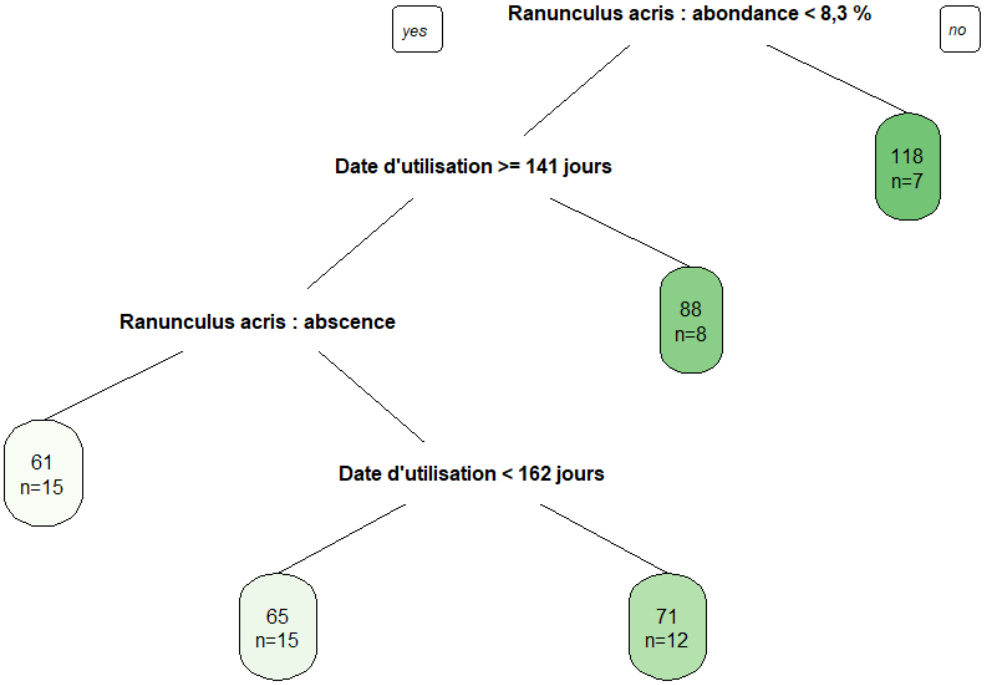
	Propriétés	Type de modèle et famille	Critères prédictifs			
			Classifications seules A, P, F	Effets principaux A+P, A+F, P+F, A+P+F	Interactions A×P, A×F, P×F, A×P×F	Modèle nul
Ecologiques	Richesse spécifique	GLM, gamma	Oui	Oui	Oui	Oui
	Richesse en espèces oligotrophiles	GLM, gamma	Oui	Oui	Oui	Oui
	Richesse en familles	GLM, gamma	Oui	Oui	Oui	Oui
	Indice de Shannon	GLM, gamma	Oui	Oui	Oui	Oui
	Indice de Simpson	GLM, gamma	Oui	Oui	Oui	Oui
	Valeur pollinisateurs	GLM, gamma	Oui	Oui	Oui	Oui
	Richesse en indice d'Ellenberg pour la profondeur	GLM, gamma	Oui	Oui	Oui	Oui
	Moyenne des indices d'Ellenberg pour la profondeur	GLM, gamma	Oui	Oui	Oui	Oui
	Abondance des formes de vie	GLM, binomial	Oui	Oui	Oui	Oui
Agro.	Rendement	GLM, gamma	Oui	Oui	Oui	Oui
	Valeur pastorale	GLM, gamma	Oui	Oui	Oui	Oui
	Précocité	GLM, binomial	Oui	Oui	Oui	Oui
Enviro.	Indice d'Ellenberg pour l'humidité	GLM, gamma	Oui	Oui	Oui	Oui
	Indice d'Ellenberg pour la fertilité	GLM, gamma	Oui	Oui	Oui	Oui
	Altitude	GLM, gamma	Oui	Oui	Oui	Oui
	Mode d'utilisation	Modèle logit	Oui	Oui	Non	Oui

Annexe 10 Arbres de décisions des propriétés agroécologiques prédites par les pratiques, le milieu et la végétation

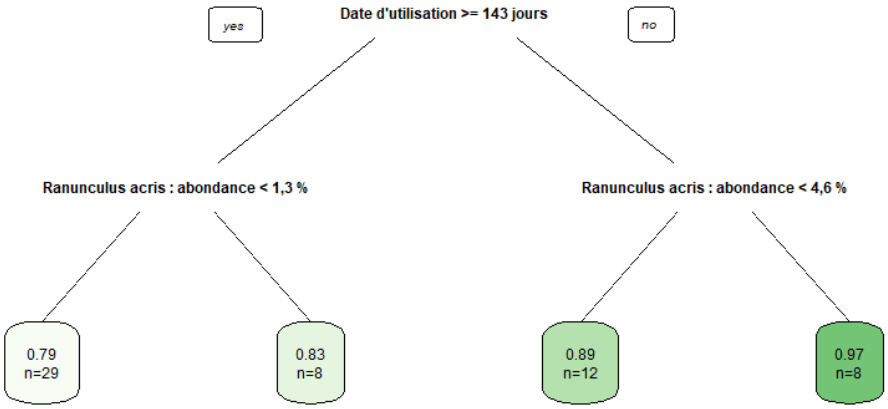




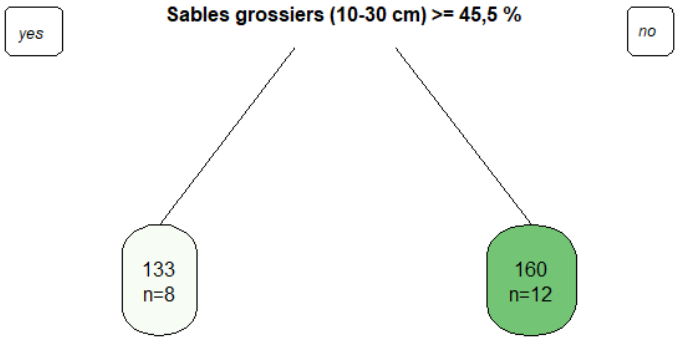
Protéines (PDIN)



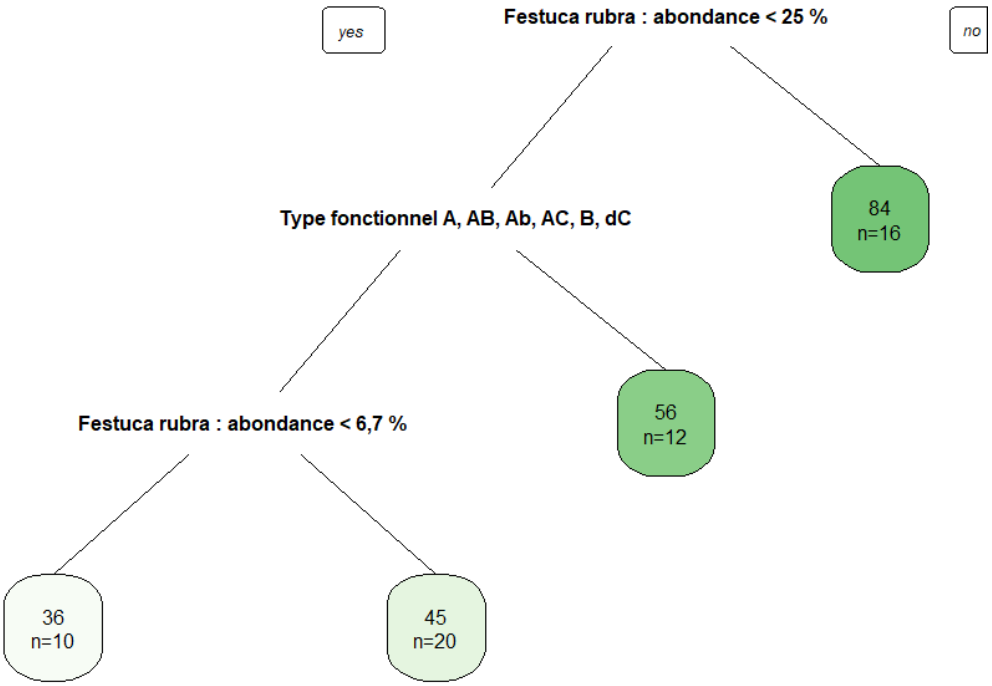
Energie (UFL)



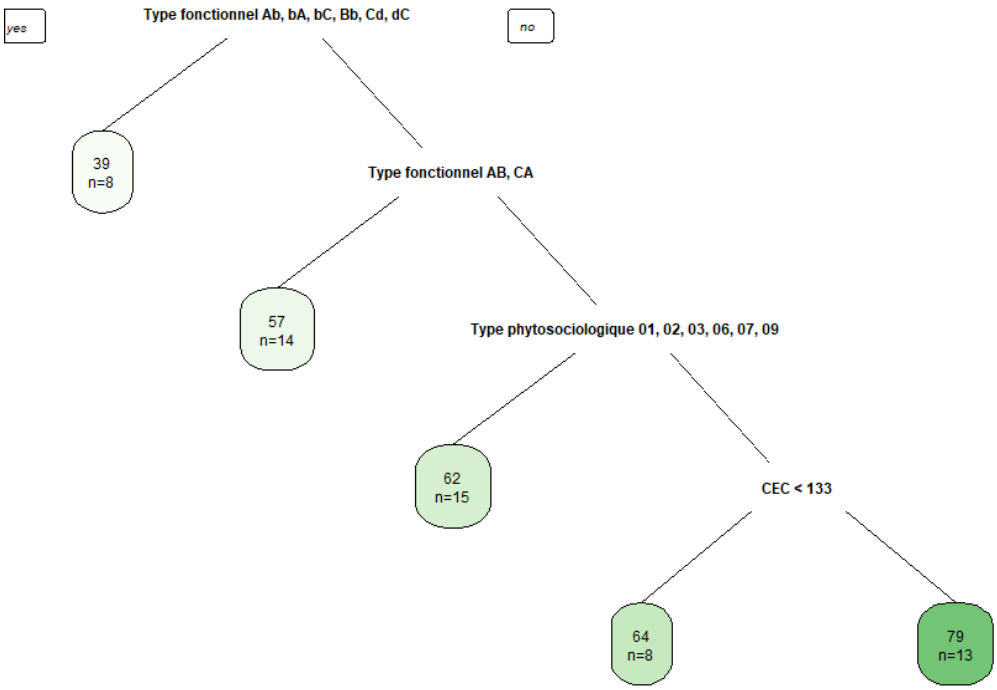
Antioxydants



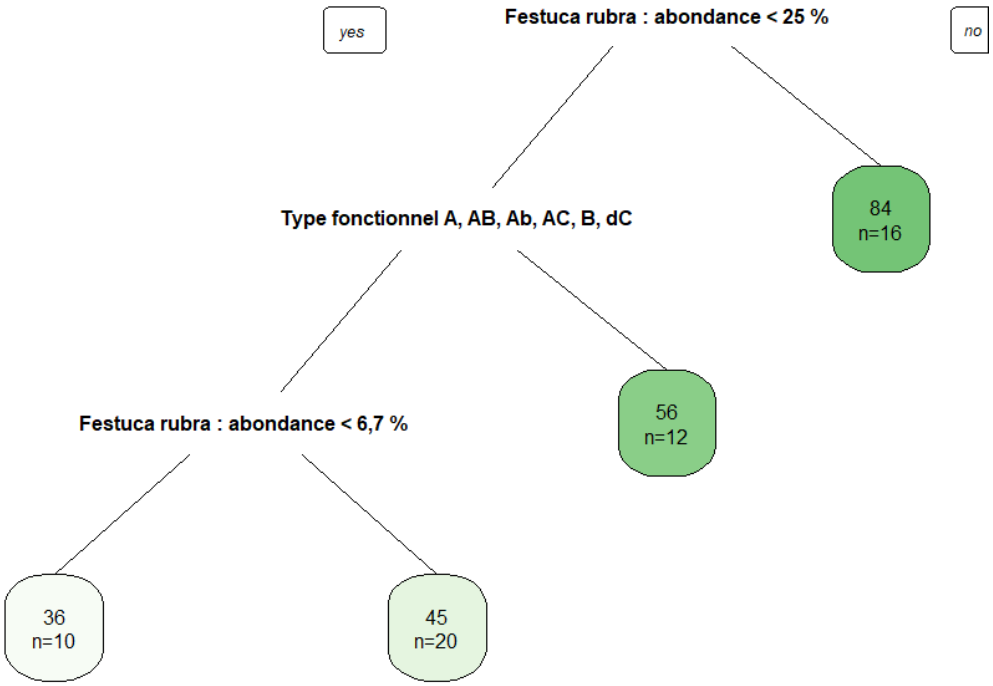
Souplesse d'exploitation



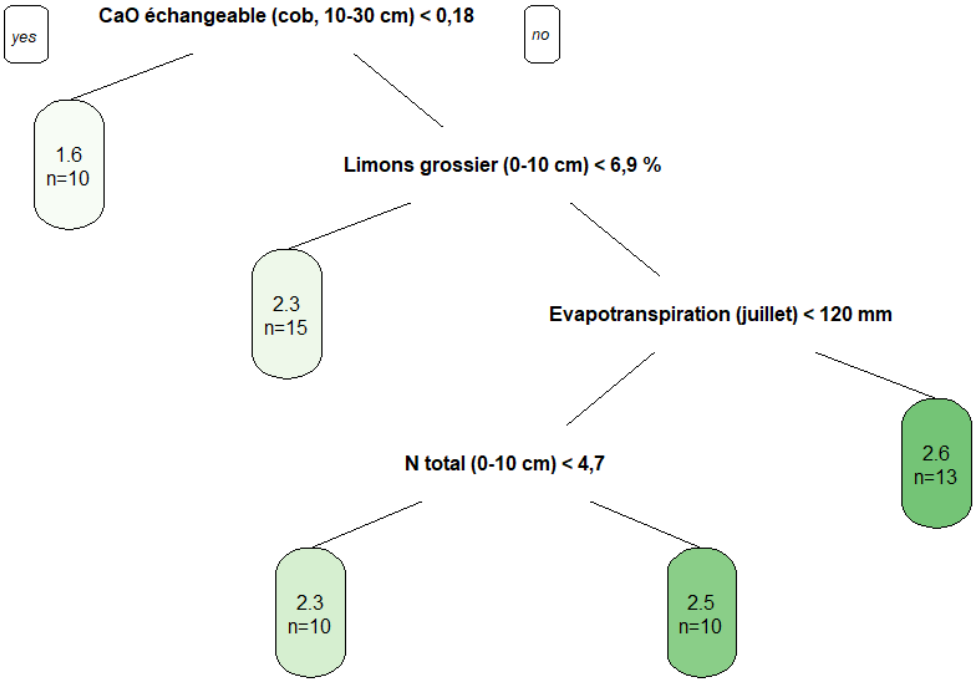
Précocité



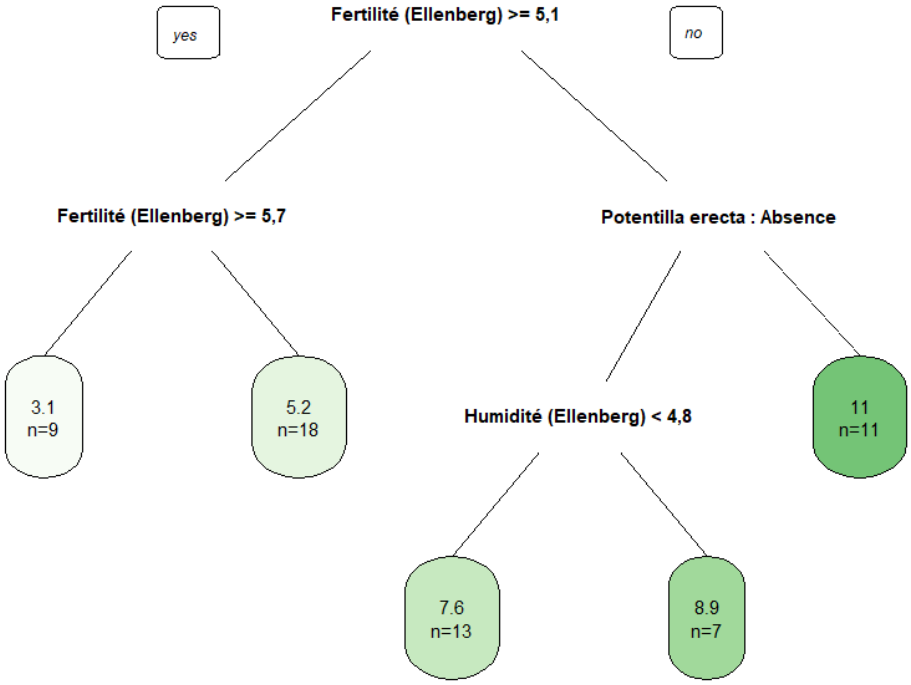
Souplesse d'exploitation



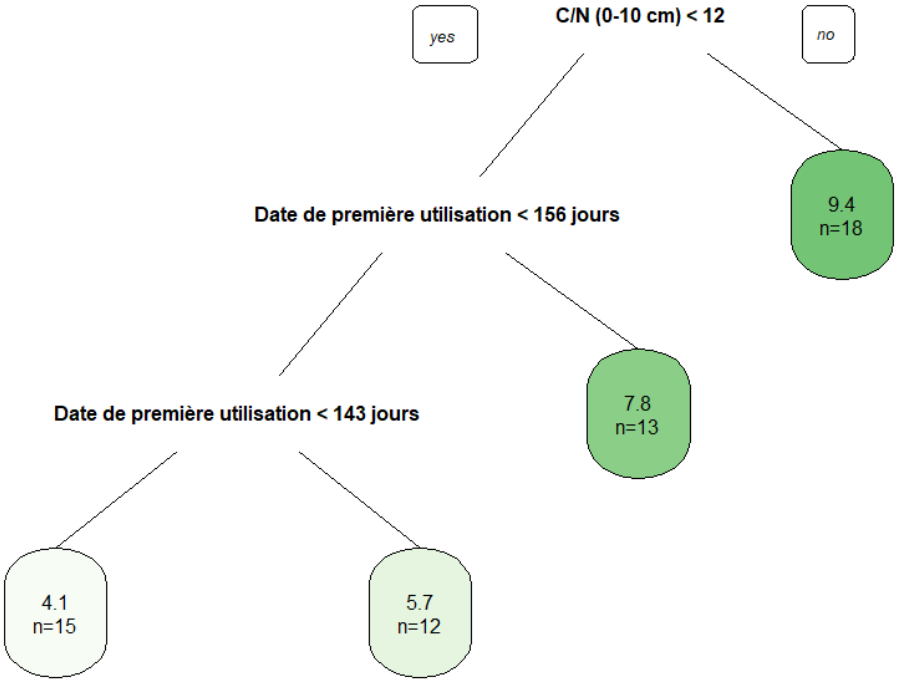
Indice de Shannon *



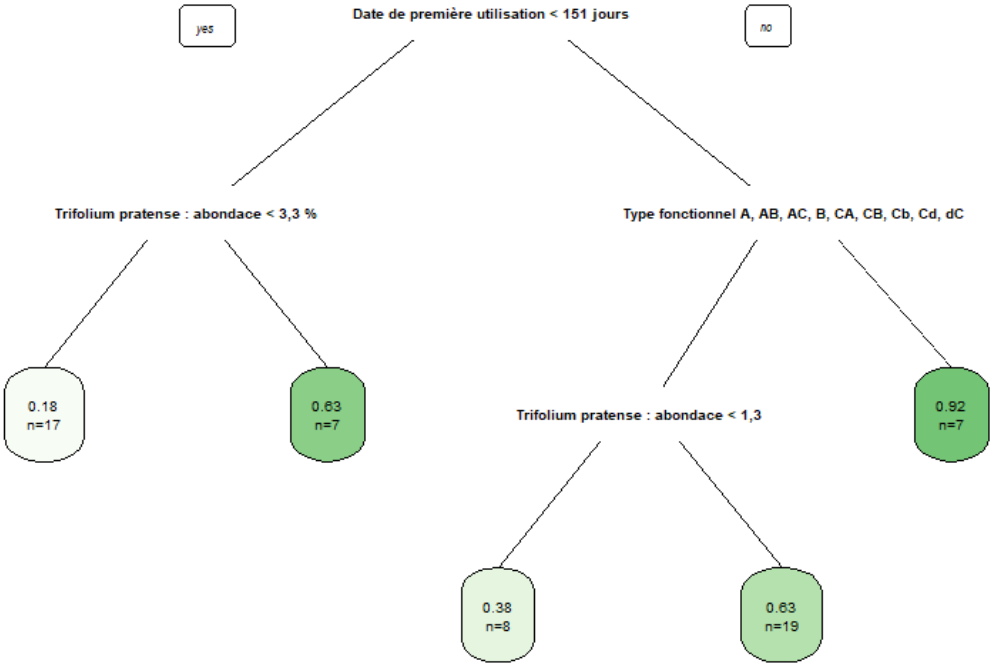
Richesse en oligotrophe



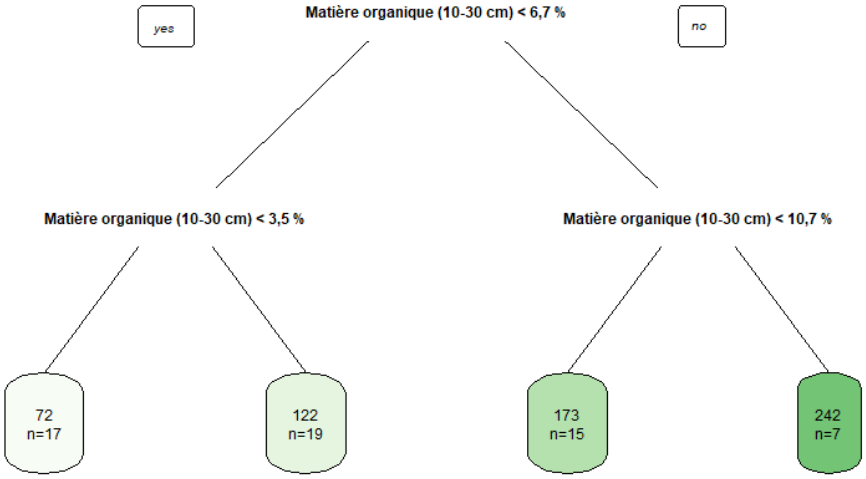
Richesse en oligotrophe *



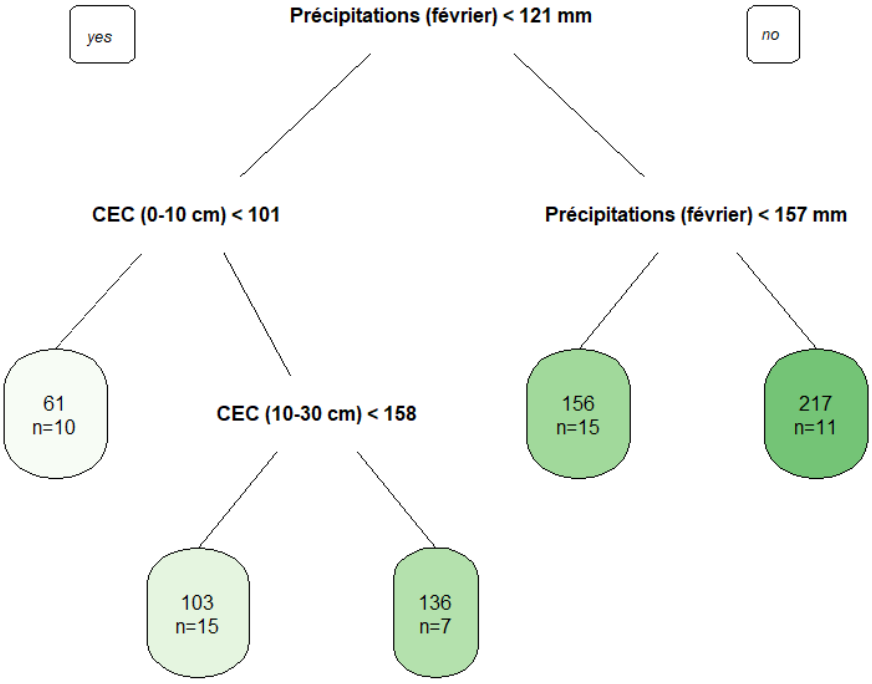
Valeur nectarifère



Stock de carbone



Stock de carbone **



Annexe 11 Descriptif des attentes exprimées par les agriculteurs spontanément ou sélectionnées parmi notre liste

Seules les 16 premières attentes ont été proposées aux agriculteurs. Les attentes exprimées mais que nous n'avions pas proposée sont remplacées par – dans la colonne « Nombre d'apparitions sur proposition »

Attentes	Abréviation	Nombre d'apparitions	
		spontanément	sur proposition
Absence de plantes indésirables	AbsPlantes	2	5
Appétence	Appetence	2	9
Participe à la santé et au bien-être animal	BienEtre	2	18
Résistance aux aléas climatiques	Climat	8	13
Digestibilité	Digestibilite	0	6
Bonne diversité faune et/ou flore	Diversite	27	20
Participe à la beauté du paysage	Paysage	2	4
Accueil de nombreux pollinisateurs	Pollinisation	0	1
Bonne portance et/ou mécanisation	Portance	2	3
Pas d'utilisation de produits phytosanitaires	ProdPhyto	0	6
Bonne qualité des produits (lait, fromage, viande)	QualiteProd	2	19
Bon rendement	Rdt	38	18
Bonne repousse automnale	RepousseAut	2	5
Bonne repousse estivale	RepousseEsti	2	16
Bonne souplesse d'exploitation	Souplesse	4	13
Participe au stockage de carbone	-	0	0
Absence d'animaux indésirables	AbsAnimaux	2	-
Accessibilité simplifiée	Accessibilite	2	-
Augmentation des MAE	-	1	-
Atteindre l'autosuffisance alimentaire	-	1	-
Favorise la faune	-	1	-
Maintien de terres maigres	-	1	-
Lutte contre l'érosion des sols	-	1	-
Maintien de prairies naturelles	Naturelle	2	-
Nourrir les animaux	NourrirAnimaux	6	-
Réouverture du paysage	-	1	-
Avoir une végétation plus précoce	-	1	-
Meilleur qualité fourragère	QualiteFourragere	21	-
Meilleur rendement laitier	-	1	-
Meilleure rentabilité	-	1	-
Soulager la charge de travail estivale	-	1	-

Prédiction de propriétés agroécologiques de prairies permanentes et de leurs compromis : l'exemple du massif vosgien

Les surfaces en herbe ont une place majeure dans les agrosystèmes mondiaux. En France, les prairies permanentes sont associées à des propriétés agronomiques, car elles assurent près de la moitié de la production fourragère. Elles sont aussi associées à des propriétés écologiques car elles accueillent une riche biodiversité végétale et animale, et séquestrent le carbone. Mieux comprendre les déterminants des propriétés agroécologiques, mais aussi leurs synergies et compromis, pourra aider les agriculteurs et leurs conseillers agricoles et écologues à valoriser des prairies diversifiées, et une diversité de prairies. Les objectifs de cette thèse sont donc 1) d'identifier les critères du milieu, des pratiques agricoles et de la végétation qui prédisent les propriétés prairiales, 2) de prédire les propriétés agroécologiques à l'aide de typologies de prairies, sans connaissance précise des critères environnementaux ni des pratiques agricoles, 3) d'étudier et prédire les synergies et compromis entre propriétés d'une même prairie, 4) de se questionner sur la transmission des connaissances scientifiques aux agriculteurs et leurs conseillers. Pour atteindre ces objectifs, j'ai valorisé une base de données de près de 800 prairies permanentes de précédentes études. J'en ai ensuite extrait 59 prairies représentatives du massif vosgien, sur lesquelles, j'ai réalisé des relevés botaniques, des mesures de rendement, des prélèvements de fourrage pour en connaitre la qualité et la teneur en antioxydants, et des prélèvements de sol pour en connaitre la composition précise. Enfin, j'ai collecté des informations sur les pratiques agricoles, le climat et la topographie de chacune de ces prairies. Les résultats montrent que les compositions botaniques sont influencées par des gradients d'intensité des pratiques, de sol et d'altitude, mais que la connaissance des pratiques agricoles est dispensable car fortement corrélée aux critères du milieu. Bien que de nombreux critères soient pris en compte dans l'analyse, la qualité prédictive reste faible. La prédiction des propriétés agroécologiques montre de grandes variabilités de qualité. Des propriétés écologiques (indice de Shannon, richesse en espèces oligotrophiles, valeur nectarifère et stock de carbone), et agronomiques (valeur pastorale, UFL, PDIN) sont correctement prédites par des ensembles de critères du sol, du climat, du paysage et de la composition botanique (présence et abondance d'espèces, types prairiaux). Cependant, la prédiction des propriétés uniquement grâce aux typologies prairiales montre que les propriétés écologiques sont difficilement prédictibles, bien que combiner différentes méthodes typologiques améliore la qualité des prédictions. L'étude des synergies et compromis entre propriétés montre qu'il n'est pas possible de cumuler toutes les propriétés agroécologiques sur une même prairie. Cependant, il est possible d'associer rendement et diversité botanique ; les différents indices de qualité nutritive; ou encore espèces patrimoniales et souplesse d'exploitation. Enfin, la réflexion sur la transmission des connaissances scientifiques aux acteurs de terrain montre de nombreuses solutions, et que les outils utilisés doivent pouvoir s'adapter aux attentes de chacun. En particulier, la définition de la qualité fourragère varie fortement entre agriculteurs (quantité et/ou qualité), et il est nécessaire de trouver un équilibre entre précision des outils et facilité d'utilisation. Cette thèse apporte donc de nouvelles connaissances sur la prédiction des propriétés agroécologiques des prairies permanentes et de leurs compromis, notamment grâce à la prise en compte de nombreux critères prédictifs liés au milieux, aux pratiques agricoles et à la végétation, mais aussi grâce à la prédiction de propriétés encore méconnues. Enfin, cette thèse soulève le problème de la création d'outils polyvalents permettant de prédire les propriétés agroécologiques des prairies permanentes.

Mots clés : biodiversité, rendement, qualité fourragère, sol, climat, pratiques agricoles

Prediction of permanent grasslands' agroecological characteristics and compromises: focus on the Vosges Mountains

Grasslands play a key role in global agrosystems. In France, permanent grasslands are associated with agronomic and ecological characteristics: they provide half of overall forage, shelter vegetal and animal species, and store carbon. Increasing our understanding of agroecological characteristic determinants, and the synergies and trade-offs between characteristics, could help farmers and advisors to promote high-diversity grasslands, but also a diversity of grasslands. The objectives of this thesis are 1) to predict grassland characteristics using environmental, agricultural practices and vegetation criteria, 2) to predict grassland characteristics using vegetation classifications without information about environment and agricultural practices, 3) to study and predict trade-offs between characteristics at grassland scale, 4) to query knowledge transfer between researchers, farmers and farmer advisors. For this purpose, I run statistical analyses on a database of almost 800 permanent grasslands from previous studies. I then selected a representative sample of 59 grasslands for this database over which I conducted field and lab analyses of botanical compositions, yields, forage qualities, antioxidant contents and soil properties. I also collected information about agricultural practices, climate and topography for each of these grasslands. My results show that botanical compositions are mainly influenced by agricultural intensification, soil and elevation gradients, and that knowledge about agricultural practices are dispensable because already correlated to other criteria. However, despite I used several criteria, the quality of botanical composition prediction remains weak. Prediction of agroecological characteristics show wide variabilities: some agronomical- and ecological- characteristics are predicted well by soil, climate, landscape and botanical composition (species presence and abundance, vegetation classes) criteria. The agronomic characteristics that are predicted well comprise pastoral value, metabolisable energy, and assimilable proteins; the ecological characteristics predicted are Shannon index, richness in oligotrophic species, nectar production index and soil carbon stock. However, using only vegetation classifications could not reliably predict ecological characteristics, despite the improvement of prediction quality when combining classifications. Study of synergies and trade-offs highlighted the impossibility to combine all the agroecological characteristics for one grassland. However, I observed synergies between yield and botanical diversity, between the different indices of nutritive value, and between patrimonial species and flexibility of management. Finally, all studied tools can be used to transfer scientific knowledge to farmers and their advisors, but need to be carefully chosen to match their individual expectations. In particular, the definition of forage quality greatly varies between farmers (i.e., it can be based on quantity or quality), and a difficult equilibrium between tools accuracy and ease to use have to be found. This thesis work brings new insights in our understanding of permanent grassland agroecological characteristics and their trade-offs, thanks to the inclusion of many predictive criteria related to environment, agricultural practices and vegetation, but also thanks to the prediction of unknown characteristics. Finally, this thesis addresses the issue of developing polyvalent tools that can be used to predict grassland agroecological characteristics.

Key words: biodiversity, yield, forage quality, soil, climate, agricultural management