



HAL
open science

Influence du contexte pédoclimatique sur la biodiversité végétale des prairies permanentes du Massif-Central

Marie Bonnal

► **To cite this version:**

Marie Bonnal. Influence du contexte pédoclimatique sur la biodiversité végétale des prairies permanentes du Massif-Central. Sciences de l'environnement. 2022. hal-04068660

HAL Id: hal-04068660

<https://hal.inrae.fr/hal-04068660>

Submitted on 14 Apr 2023

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.

BONNAL Marie

Université Clermont Auvergne

Institut Universitaire de Technologie Clermont Auvergne

Campus universitaire Simone Veil, Aurillac

Département Génie Biologique

DUT Génie Biologique 2ème année option Agronomie



RAPPORT DE STAGE

Influence du contexte pédoclimatique sur la biodiversité végétale des prairies permanentes du Massif-Central

Du 4 avril au 24 juin 2022

Institut National de la Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement



Source personnelle

Maître de stage : M. RONDEAU Nathan

Enseignante référente : Mme GAGNE-CHABALIER Geneviève

Année universitaire 2021-2022

Sommaire

Remerciements

Résumé

Abstract

Introduction

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Organisme d'accueil | 2 |
| 2. État de l'art | 4 |
| 2.1. Massif central..... | 4 |
| 2.2. Prairies et services | 5 |
| 2.3. Facteurs influençant la biodiversité végétale des prairies | 6 |
| 3. Matériels et Méthodes | 8 |
| 3.1. Site d'étude..... | 8 |
| 3.2. Échantillonnage..... | 9 |
| 3.2.1. Densité apparente..... | 9 |
| 3.2.2. Constitution des échantillons composites..... | 9 |
| 3.2.3. Traitement des échantillons | 10 |
| 3.3. Tests statistiques..... | 10 |
| 3.3.1. ACP | 11 |
| 3.3.2. Régression simple et multiple | 12 |
| 4. Résultats et Interprétations | 12 |
| 4.1. Échantillonnage..... | 12 |
| 4.2. Variables édaphiques | 13 |
| 4.3. Facteurs influençant la biodiversité..... | 14 |
| 4.3.1. Richesse spécifique..... | 14 |
| 4.3.2. Rareté..... | 16 |
| Conclusion | 20 |

Bibliographie

Table des sigles

Glossaire

Lexique

Table des figures et tableaux

 Table des figures

 Table des tableaux

Table des annexes et annexes

Remerciements

À l'issue du stage de trois mois proposés par l'INRAE (Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement) de Clermont-Ferrand, je tiens tout d'abord à remercier Madame Catherine PICON-COCHARD, directrice de l'Unité mixte de Recherche sur l'Écosystème Prairial (UREP), de m'avoir acceptée et accueillie au sein de son équipe.

Merci à l'ensemble de l'unité : chercheur.euse.s, technicien.ne.s et l'administration pour leurs aides, leurs conseils, et pour l'accueil chaleureux au sein de l'UMR (Unité Mixte de Recherche).

Je remercie également les chercheur.euse.s : Pascal CARRERE, directeur de thèse, Nicolas GROSS et Katja KLUMPP, co-encadrants de la thèse, qui ont pu me partager leur savoir et leur ressenti sur cette étude tout en me conseillant sur la rédaction du rapport.

Il me tient à cœur de remercier Nathan RONDEAU, doctorant, mon maître de stage, pour m'avoir partagé de nombreuses notions (fonctionnement des prairies, botaniques, pédologie, etc.), et m'avoir accompagné durablement durant trois mois. Son aide m'a permis d'interpréter et de mieux comprendre le sujet. Je suis reconnaissante de sa bienveillance et de sa patience accordée lors de ces semaines de stage ; des conseils concernant les prélèvements, les analyses en laboratoires et statistiques ; et du partage de ses connaissances.

Nous remercions l'ensemble des structures impliquées dans les projets Prairies AOP (Appellation d'Origine Protégée), ATOUS (Approche Territoriale de l'autonomie fourragère et des services rendus par les Systèmes fourragers) et AEOLE (Atouts Économique pour construire des systèmes d'élevages performants), et leurs agents, qui ont contribué à la collecte des données, ré-exploité dans ce travail.

Également, merci à Geneviève GAGNE-CHABALIER, maître de conférences, maître universitaire, afin de m'avoir permis de mener à bien ce travail, de m'avoir aidée par ses conseils sur mon travail et pour son implication durant ces deux dernières années.

Résumé

L'agriculture de montagne est largement basée sur l'exploitation des ressources naturelles. Les prairies permanentes du **Massif central** représentent près de 48 % des terres agricoles. Ces écosystèmes offrent des services d'approvisionnement, de réglementation, de soutien et culturels. La valeur des **services écosystémiques** annuels des prairies et des parcours est d'environ 232 \$/ha/année[1]. La diversité végétale est un élément clé du fonctionnement tant **écologique** qu'**agronomique**.

Ainsi, un suivi de parcelles a été conduit afin de voir l'influence de certains facteurs (sol, climat, usage) sur la richesse spécifique et la rareté des communautés végétales du Massif. Les éléments affectant la composition botanique sont étudiés à l'aide d'analyses en composantes principales et de régression par un langage de programmation.

Cette recherche a mis en lumière la relation entre le contexte **pédoclimatique** et la **pratique agricole** et la **diversité végétale**. Par exemple, un taux élevé de carbone ou la constante climatique joue sur la biodiversité des écosystèmes prairiaux. D'autres facteurs (c'est-à-dire le pH, l'utilisation (pâture ou fauche)) ne montrent pas aussi clairement une relation avec la diversité végétale. En conséquence, la dynamique végétale répond à de nombreux paramètres. Cela souligne l'importance de comprendre les moteurs influençant les **prairies permanentes** et de les préserver face au changement global.

Abstract

Mountain agriculture is largely based on the exploitation of natural resources. Permanent grassland in **Massif Central** accounts for nearly 48% of the agricultural land. Ecosystems provide provisioning, regulating, supporting, and cultural services. The value of annual **ecosystem services** of grasslands and rangelands is about 232 \$-ha⁻¹ year⁻¹. Plant diversity is a key element in both **ecological** and **agronomic** functioning.

Thus, a monitoring of plots was conducted in order to see the influence of certain factors (soil, climate, use) on the specific richness and rarity of the Massif's plant communities. The elements affecting botanical composition have been investigated using principal component analysis and regression applying a programming language.

This research has highlighted the relationship between **soil** and **climate** conditions and **agricultural practice** and **plant diversity**. For example, high carbon or constant climate affects the biodiversity of grassland ecosystems. However, other factors (i.e. pH, use (grazing or mowing)) do not show as clear a relationship with plant diversity. In such a way, plant dynamics respond to many parameters. This underscores the importance of understanding the drivers influencing **permanent grasslands** and preserving them to global change.

Introduction

La prairie est une formation végétale composée de plantes herbacées. Les prairies représentent un cinquième (20,34%) de la surface du territoire national [2]. Toutefois, derrière ce chiffre global se cache une grande diversité de surfaces fourragères, dont la classification se fait en fonction de la nature des espèces présentes et de la durée de présence au sol. Les prairies temporaires sont incluses dans une rotation de culture, alors que les prairies permanentes, appelées aussi Surfaces Toujours en Herbe (STH), conservent un lien au sol pendant au moins 5 ans [3]. Toutefois, depuis 1970, on assiste à une érosion des STH à l'échelle nationale, en partie due à l'intensification agricole (remise en culture de ces surfaces) ou à l'artificialisation (construction d'infrastructures). Pourtant, les prairies rendent un grand nombre de services écosystémiques, et contribue à la multifonctionnalité des systèmes d'élevages [4]. Elles sont un élément incontournable des paysages et contribuent à leur typicité. Dans une question de durabilité et de sécurité alimentaire, il est important de repenser la place des prairies en conciliant les dimensions économiques, environnementales, sociales et culturelles [5]. Ces services résultant du fonctionnement de l'écosystème [6], lui-même conditionné par la biodiversité présente. Il est important de mieux identifier et caractériser les facteurs susceptibles d'influencer et modifier sa dynamique. Nous considérerons notamment des facteurs de changement du milieu (changement climatique) ou des pratiques agricoles.

L'objectif de ce travail est de contribuer à l'analyse de **l'influence du contexte pédoclimatique sur la biodiversité végétale des prairies permanentes du Massif central**. Il a été réalisé à l'UMR Ecosystème Prairial, qui étudie l'agroécologie de l'écosystème prairial dans un contexte de changement global, dont les changements climatiques et les pratiques de gestion [7]. Il s'inscrit dans un des grands défis scientifiques de l'INRAE qui cherche à « *répondre aux enjeux environnementaux et gérer les risques associés* », à horizon 2030 [8] ; ainsi que dans les attendus du méta programme BIOSEFAIR centré sur la gestion durable de services et fonctions assurés par les écosystèmes. Ce travail s'appuie sur les données acquises dans le projet AEOLE qui a permis d'étudier les prairies permanentes du Massif-Central [9]. L'objectif de cette étude est de déterminer les relations entre la biodiversité végétale des prairies permanentes et un ensemble de variables du sol, du climat et de pratique. Nous chercherons en particulier à analyser les différences entre les divers types de prairies semi-naturelles du Massif central, en considérant les propriétés chimiques et physiques du sol qui affectent la richesse et la rareté des plantes [10]. Il s'agira d'identifier et de comprendre les interactions qui se jouent entre les éléments floristiques et les facteurs de l'environnement (pédoclimatique, pratiques agricoles).

Dans la suite du rapport, la structure d'accueil sera présentée avant de décrire la démarche et les matériels et méthodes mobilisées. Les principaux résultats obtenus seront ensuite introduits pour pouvoir les discuter et conclure sur cette thématique.

1. Organisme d'accueil

Né le 1^{er} janvier 2020, l'Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE) est un établissement public français de recherche à caractère scientifique et technologique. Il résulte de la fusion de l'INRA, l'Institut National de la Recherche Agronomique et de l'IRSTEA, l'Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture. L'union réalisée fut initiée par les ministres de l'Agriculture et de la Recherche, en février 2018, afin de devenir un organisme public national sous la tutelle conjointe du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation et de celui chargé de l'Agriculture et de l'Alimentation.

Avant la fusion, l'INRA demeurait le 1^{er} institut de recherche agronomique en Europe et le 2^{ème} sur l'ensemble des continents. Son objectif consistait à mener des recherches pour une alimentation saine et de qualité, pour une agriculture durable, et pour un environnement préservé et valorisé. Il employait près de 8000 personnes réparties sur 17 centres de recherche en France. Suite à la seconde guerre mondiale, il fut créé afin de nourrir la France en situation de pénurie alimentaire. En effet, l'agriculture française ne permettait pas de subvenir à ses propres besoins alimentaires. Dès les années 1960 et grâce à l'INRA, la France a pu répondre aux demandes de sa population. L'institut s'est développé via des pôles régionaux. Par la suite, les missions ont évolué vers différentes recherches (par exemple : transformation de la matière première agricole en intégrant des recherches en microbiologie et des sciences de l'ingénierie, développement d'une agriculture autonome et économe) dans le but de répondre aux besoins du développement local et de l'environnement.

De son côté, l'IRSTEA fut un établissement public français des recherches en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture. Ses missions concédaient à une gestion durable des eaux et des territoires, une prévention et une anticipation des risques naturels et de la qualité environnementale. L'organisme se composait d'une dizaine de pôles de compétitivité et était engagé dans plus de 300 contrats de recherche avec des industriels et des petites ou moyennes entreprises. Il recrutait 1200 personnes et avait pour nom jusqu'en 2012, le Centre d'Étude du Machinisme Agricole du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (Cemagref).

INRAE représente le 1^{er} organisme de recherche spécialisé au monde en agriculture, alimentation et environnement. Il a pour objectif de réaliser, d'organiser et de coordonner, à son initiative ou à la demande de l'État, des travaux de recherche scientifique et technologique dans les divers domaines (l'agriculture, l'alimentation, la forêt, l'environnement, l'eau, la biodiversité, la bioéconomie, l'économie circulaire, la gestion durable des territoires et des risques, etc.).

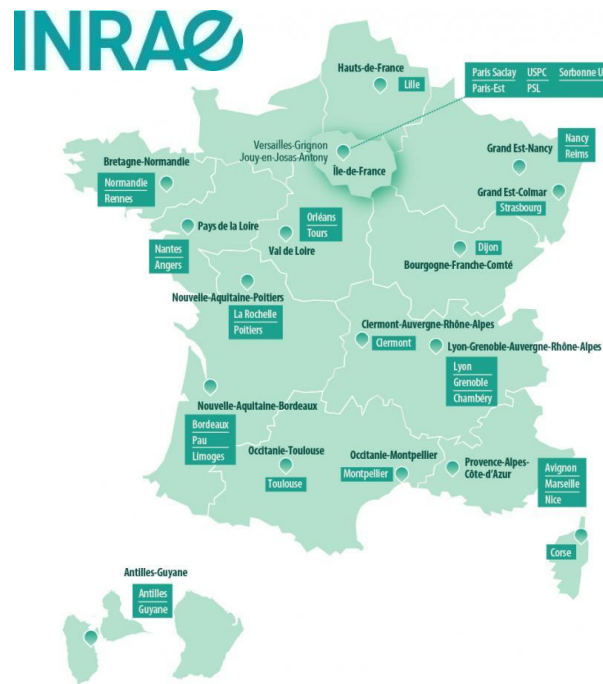


Figure 1 : Carte représentant les 18 centres de recherches de l'INRAE (avec logo)
 Source personnelle d'après l'INRAE

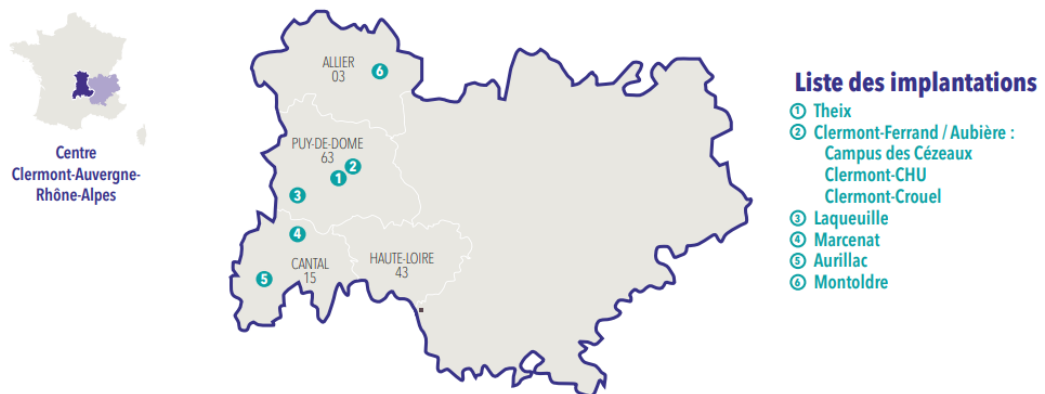


Figure 2 : Carte des implantations du Centre Clermont-Auvergne- Rhône-Alpes
 Source : INRAE



Figure 3 : Logo UREP
 Source : INRAE

Le but est de répondre aux objectifs de développement durable et devenir un des leaders mondiaux de la recherche. INRAE développe une recherche interdisciplinaire et s'accorde avec les grands enjeux sociétaux et/ou scientifiques. Les structures sont multiples avec 267 unités de recherche, expérimentale et service. Près de 11 000 personnes sont engagées au sein de l'organisme (8 229 agents titulaires et 2 798 contractuels). Plus de 300 projets européens et 20 instruments de partenariats internationaux (laboratoires associés, réseaux de recherche et appels conjoints) sont présents.

En plus d'un centre siège à Paris, l'organisation dispose de 18 centres de recherche (en partenariat avec 33 sites universitaires), dont le Centre Clermont-Auvergne-Rhône-Alpes (CARA) comme l'indique la figure 1. Ce dernier est situé dans la région Auvergne-Rhône-Alpes (constitué de 2 centres de recherches). Avec près de 850 agents répartis dans 20 unités sur 8 implantations (du Bourbonnais à Aurillac en passant par Clermont-Ferrand, voir figure 2), le centre est largement ancré dans le territoire. Ainsi, CARA est acteur majeur de la recherche dans la nutrition humaine préventive, les céréales, la durabilité des systèmes d'élevage herbivores, la qualité des produits, les territoires, la robotique et les nouvelles technologies appliquées à l'agriculture, l'écologie et le fonctionnement de l'arbre. Six axes thématiques sont identifiés : agro-écologie des systèmes d'élevage herbagers, qualité des produits, santé animale ; biologie intégrative des plantes modèles et cultivées et adaptations à leur environnement ; eau, bassins versants, écologie aquatique et écotecnologies associées ; territoires et socio-écosystèmes ; risques naturels, sanitaires et environnementaux ; nutrition humaine, complexité alimentaire et santé.

L'institut bénéficie de 14 départements de recherche comme le relève l'annexe 1. Par exemple, le département écologie et biodiversité renseigne sur la structure, le fonctionnement et l'évolution des écosystèmes forestiers, partiels et aquatiques. ECODIV (département ECOlogie et bioDIVERSité des milieux forestiers, prairiaux et aquatiques) permet de proposer et co-construire des stratégies de gestion dans le but de répondre aux enjeux multiples de résilience et adaptation de ces écosystèmes aux changements globaux, de biodiversité et de bioéconomie. Il compte, en mars 2020, près de 800 acteurs répartis dans 35 unités sur 11 centres à travers la France. Il se structure avec quatre thématiques principales : fonctionnement des écosystèmes et des cycles biogéochimiques ; interactions entre espèces au sein des écosystèmes ; adaptation des organismes et des populations à leurs milieux ; méthodes et stratégie pour la gestion durable des ressources et des milieux naturels.

L'Unité mixte de Recherche sur l'Ecosystème Prairial (UREP) est rattachée à ce département et à VetAgro Sup (cf figure 3). Elle est située sur le site de Crouël avec des sites

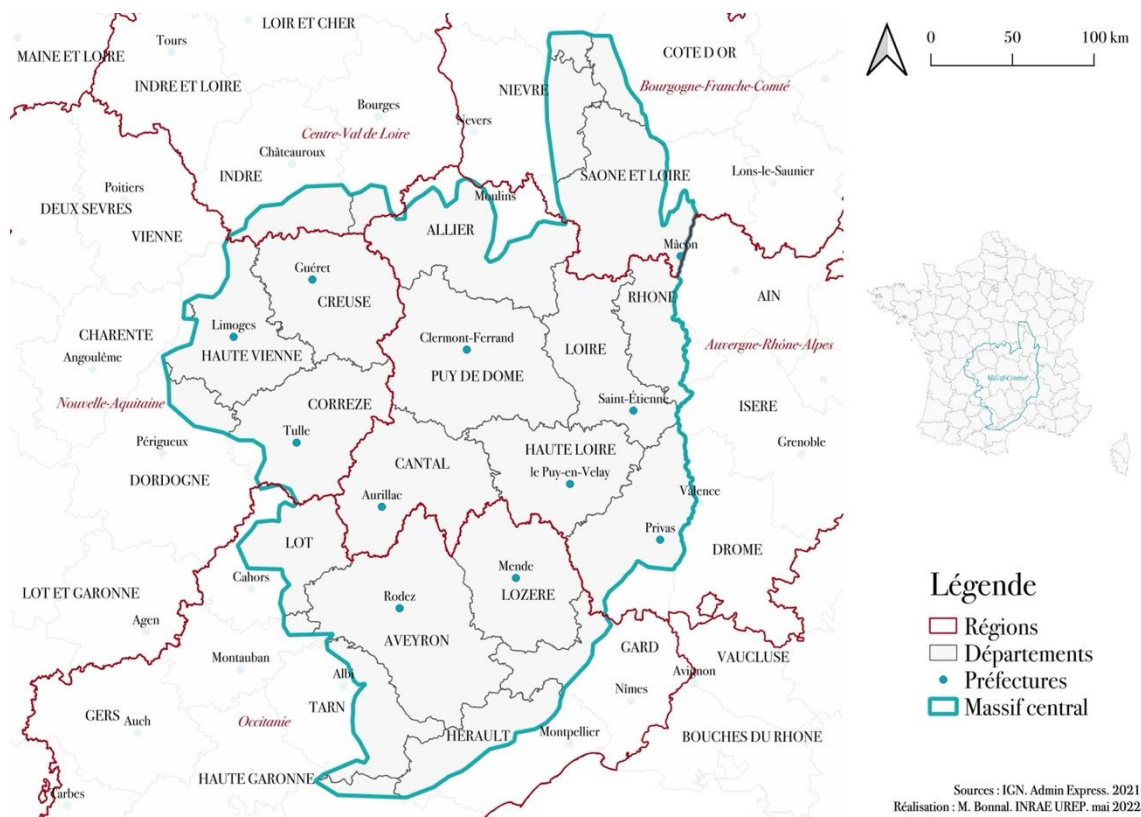


Figure 4 : Carte du Massif central

Source personnelle

expérimentaux présents sur Theix et Laqueuille (implantation Clermont-Ferrand, appartenant au Centre Clermont-Auvergne-Rhône-Alpes, CARA). L'unité est composée de 3 directeurs de recherche, 4 chercheurs (et chercheurs-enseignants), 8 ingénieurs, et une dizaine de techniciens, doctorants et post-doctorant. L'équipe scientifique étudie l'agroécologie de l'écosystème prairial dans un contexte de changement global, notamment les changements climatiques et les pratiques de gestion. L'unité détient une expertise internationale dans les domaines des cycles de l'azote et du carbone (bilan de gaz à effet de serre et la séquestration de carbone), l'assemblage des communautés végétales et leurs diversités, les interactions biotiques (plante-sol – animal) et leurs conséquences sur le fonctionnement des prairies. Il s'agit de comprendre le fonctionnement prairial dans le but de concevoir des agroécosystèmes durables et réfléchis dans un contexte changeant et incertain. L'UREP porte des projets scientifiques comme « l'écologie, le fonctionnement et les services de la prairie permanente dans un contexte de changement global ». À l'aide de démarches intégratives et prédictives, des observations, des modélisations, ou des recherches expérimentales ou participatives sont combinées (avec deux dispositifs longues durées et une installation expérimentale). L'enjeu est de comprendre les variables du fonctionnement de ces systèmes et mécanismes afin d'assurer une gestion raisonnée des ressources du territoire.

2. État de l'art

2.1. Massif central

Le Massif central, massif ancien de l'époque hercynienne, a de multiples influences (volcanique, granitique et métamorphique). Il couvre tout ou partie de 5 régions et de 22 départements (figure 4), en s'étendant sur 85 000 km², dont les 2/3 sont situés en zone de montagne. Le massif compte 1 parc national (les Cévennes) et 11 parcs naturels régionaux. La zone abrite plus de 80% de Surface Agricole Utile (SAU). La Surface Toujours en Herbe (STH) du Massif central représente 60% de cette SAU [11]. À l'échelle européenne, le Massif constitue un des plus importants ensembles géographiques dominé par des végétations agropastorales et toujours en herbe. Ainsi, elles forment un élément paysager majeur et identitaire. Pour de nombreux.euses d'éleveur.euse.s du massif, les STH représentent la base de l'alimentation de leur troupeau. Ces espaces constituent une grande diversité paysagère et offrent une hétérogénéité de types de végétation, d'étendus (prairies, pelouses, landes), ou d'autres spatialement plus limités (zones humides ou rocheuses). Ces types de végétation se déclinent en de nombreux types locaux résultant des différences géologiques (roches cristallines, volcaniques et calcaires), géomorphologiques et climatologiques (avec des

Tableau I : Descriptif des différents types de prairies dans le domaine agricole

| | |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Prairies artificielles | Prairies semées exclusivement avec des fabacées* (=légumineuses) fourragères (au moins 80% ; luzerne, sainfoin, trèfles, lotier...) pendant 2 à 5 ans en culture pure ou en mélange, incorporée dans un assolement. Potentiel à produire un fourrage de haute valeur nutritive. |
| Prairies temporaires | Prairies semées et implantées pendant moins de 5 ans entrant en rotation avec d'autres productions végétales. Généralement, elles sont ensemencées avec des poacées* (=graminées) fourragères ou/et des fabacées fourragères en culture pure, ou en mélange simple ou complexe (plusieurs espèces). En Europe : 9,7 millions d'hectares soit un peu moins de 6% de la SAU |
| Prairies permanentes ou STH | Surfaces utilisées pour la production de plantes herbacées, ressemées naturellement ou cultivées mais qui ne sont pas retournées pendant au moins 5 ans « toute surface de production d'herbe qui n'a pas été retournée depuis 5 ans au moins » (article 4 du règlement UE n°1307/2013 établissant les règles relatives aux paiements directs). Grande diversité floristique et stockage considérable de carbone Présence de prairie permanentes productives et peu productives (exemple : landes, les estives, les parcours, les pelouses) Europe : 57 millions d'hectares soit 33% de la Surface Agricole Utile (soulevant son importance)[12]. |

Source personnelle

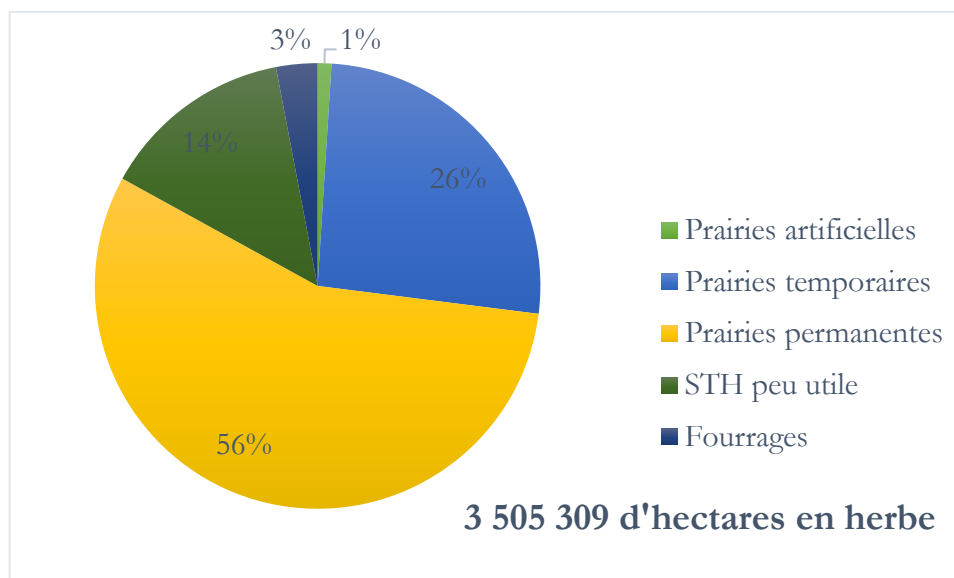


Figure 5 : Diagramme de la répartition des prairies du Massif central
(STH : Surface Toujours en Herbe)

Source personnelle d'après le SIDAM (Service Inter-Départemental pour l'Animation du Massif Central) 2016 [13].

influences diverses : méridionales, océaniques, montagnardes et continentales). Généralement, ces milieux présentent des combinaisons floristiques originales et typiques du Massif central [14], [15].

2.2. Prairies et services

Quant aux prairies, elles représentent des écosystèmes composés de communautés végétales dominées par des herbacées et où les espèces ligneuses sont peu présentes (voire inexistantes). Elles présentent une diversité importante, notamment du fait de leur durée d'installation (Tableau I). Dans le Massif central, les Surfaces Toujours en Herbe sont largement majoritaires (figure 5), et se répartissent en différentes catégories :

- Prairies permanentes semées : pas retournées, pendant au moins 5 ans.
- Prairies naturelles (ou nommées à flore diversifiée ou fleuries) : maintiennent une flore diversifiée (mais dépend des pratiques agricoles, conditions écologiques, de l'histoire). La richesse botanique est très présente tant en nombre d'espèces et, qu'en nature d'espèces, microbienne, animale. Globalement, dans le Massif central : 20 à 60 espèces
- **Prairies semi-naturelles** : végétation spontanée sous l'effet des pratiques agricoles (fauche, pâture, fertilisation minérale ou organique) et des conditions des milieux. Elles ne sont pas semées. Ces dernières représentent la majeure partie des prairies de la zone où la diversification est modérée en fonction des facteurs (intensification, utilisation, amendements, engrais)[14].

Les prairies sont des formations végétales liées aux **activités d'élevage**. Les animaux exploitent régulièrement, la biomasse produite, et bloquent ainsi la dynamique végétale vers la forêt (ou le stade climacique). La consommation de ce fourrage peut être réalisée directement au champ par **pâture**, ou indirectement par la **fauche** et distribuée à l'auge sous forme de fourrage vert (venant juste d'être coupé) ou conservé (par fermentation comme l'ensilage ou par dessiccation tel que le foin). Ces écosystèmes résultent d'une histoire influée par le milieu et la gestion, les différentes interactions, les conditions, les pratiques. La prairie s'insère dans un « agroécosystème » avec des finalités de production, intégré dans une problématique d'utilisation des terres d'où son importance relative dans les études menées [16]. Aujourd'hui, cette richesse nécessite une attention pour être préservée, mais aussi pour constituer une marque identitaire et valoriser les produits issus de ces terroirs.

L'étude se focalise sur les prairies permanentes et semi-naturelles, en considérant leur multifonctionnalité et leur effet structurant sur la diversité des paysages, mais également la diversité des **services écosystémiques**. Dans le cadre du Millenium Ecosystem Assessment,

publié en 2005, il émerge la notion de service écosystémique : ensemble des propriétés des écosystèmes permettant de produire le bien-être de l'homme ou de la nature (services d'approvisionnement, de régulation, culturels, de soutien) [17]. Le service d'approvisionnement permet une estimation, du point de vue agricole, de la valeur fourragère produite. Les prairies semi-naturelles restent la principale ressource pour l'alimentation des herbivores (58% des ressources alimentaires des animaux d'élevage) et la plus économe tout en diminuant la fertilisation minérale avec une couverture végétale composée de poacées*, de fabacées* et d'autres espèces (complémentarité des espèces et de leur utilisation de l'azote). En ce qui concerne les services de régulation, des prairies contribuent à la disponibilité, la purification, la qualité de l'eau, le ralentissement des crues en cas de conditions extrêmes, ou également le filtrage biologique avec les bandes enherbées (entre cours d'eau, ou cultures, fossés). La stabilité structurale et la fertilité sont favorisées à l'aide de la faune du sol et de son maintien par le chevelu racinaire. Par exemple, les poacées possèdent des systèmes racinaires accentuant la densité du chevelu et la stabilité, donc la biomasse. Avec la matière organique, les pertes du sol sont limitées. Leurs rôles écologiques fournissent un rempart contre l'érosion, un habitat et des refuges pour des espèces menacées. Les prairies sont utilisées par la faune sauvage à divers titres : zone d'alimentation, zone de reproduction et de refuge. Suivant les espèces, il est remarqué une diminution de la perte des nitrates en jouant sur la complémentarité des stratégies d'acquisition des ressources par les espèces (services intrants/environnementaux et agro-écologiques). Également, le stockage du carbone dans les sols prairiaux peut varier (modification du cycle de carbone) grâce à la diversité végétale et l'abondance. Le carbone est stocké sous forme organique dans le sol provenant des organes des plantes, des fèces, des organismes morts, molécules organiques ou activité microbienne. Puis, cette matière est minéralisée. Ainsi, les prairies semi-naturelles sont multifonctionnelles et répondent à des enjeux pluridisciplinaires [6]. Ces différents services éclairent sur la part et l'importance des prairies permanentes dans la recherche. Le Massif central est par ailleurs le support de nombreux travaux et réflexions scientifiques pluridisciplinaires.

2.3. Facteurs influençant la biodiversité végétale des prairies

Actuellement, les sols font l'objet d'un intérêt grandissant. Ils constituent la « clé » du fonctionnement des agroécosystèmes et la base sur laquelle reposent les paysages et les activités. Les sols possèdent une diversité qui s'exprime à toutes les échelles d'espace. Les sols du Massif ont la particularité d'être très diversifiées. Effectivement, les matériaux géologiques varient : roche granitique, métamorphique, volcanique, bassins sédimentaires marno-calcaires.

Un **sol** résulte de l'interaction entre la roche, les êtres vivants, le climat, la géomorphologie, le temps et l'Homme. Il est constitué par un mélange de matière minérale (sable, limon, argile) et de matière organique morte accompagnés d'une biodiversité abondante (macrofaune, mésofaune, microfaune et microflore). La matière minérale est issue de la dégradation et de la transformation de la roche. La matière organique est produite par les plantes et l'ensemble des organismes [18], [19]. Les sols et la flore sont intimement liés et interdépendants. De nombreux **facteurs édaphiques** influencent la végétation. Il peut s'agir de facteurs physiques (texture, densité, structure, température, etc.), de facteurs chimiques (quantité de matière organique, potentiel redox, capacité d'échange anionique et cationique), de facteurs biologiques ou de la disponibilité en ressources. Par exemple, il a été montré, en Europe, que la diversité végétale est corrélée positivement au pH (potentiel Hydrogène) du sol [20], [10].

Au cœur des écosystèmes, les sols et les plantes sont à la fois sous l'influence des organismes vivants et de paramètres abiotiques. L'ensemble de ces influences biotiques et abiotiques ont de multiples implications en termes de genèse, d'organisation spatiale, de fonctionnement des sols et de structuration des communautés de plantes. Ainsi, la diversité végétale peut dépendre de **facteurs climatiques**. Le climat du Massif-Central est sous une quadruple influence océanique, méditerranéenne, continentale et montagnarde. Les bassins d'effondrement et les massifs montagneux sont responsables d'importants contrastes climatiques. La pluviométrie s'étale de 600 mm dans certaines coteaux subissant des influences méditerranéennes à plus de 2000 mm sur les hautes terres volcaniques de l'ouest [21]. Ainsi, le Massif-Central se présente comme un carrefour biogéographique. La composante climatique joue un rôle important dans la genèse de la couche superficielle du sol. Effectivement, la composition chimique d'un sol est la résultante de la dégradation de la roche mère sous-jacente mais également du lessivage des ions par les eaux d'infiltration. Notamment, les climats avec une forte pluviométrie ont tendance à favoriser l'acidification du sol et donc des types de végétation plus pauvres floristiquement [18]. La température, oscillant en fonction de l'altitude, est variable au sein du Massif. Des études ont révélé que le réchauffement de l'air entraîne une perte d'espèces végétales, de manière directe [22]. La constante climatique peut influencer l'assemblage des communautés végétales via une multitude de voies indirectes et directes.

Le climat et le sol influencent aussi les **pratiques agricoles**, qui elles-mêmes agissent sur la composition des végétations [18]. Suivant l'utilisation de la prairie (fauche ou pâture et intensité), les stratégies des plantes varient comme le développe l'annexe 2. Entre autres, des études exposent que la diversité des espèces de prairies de montagne est affectée négativement

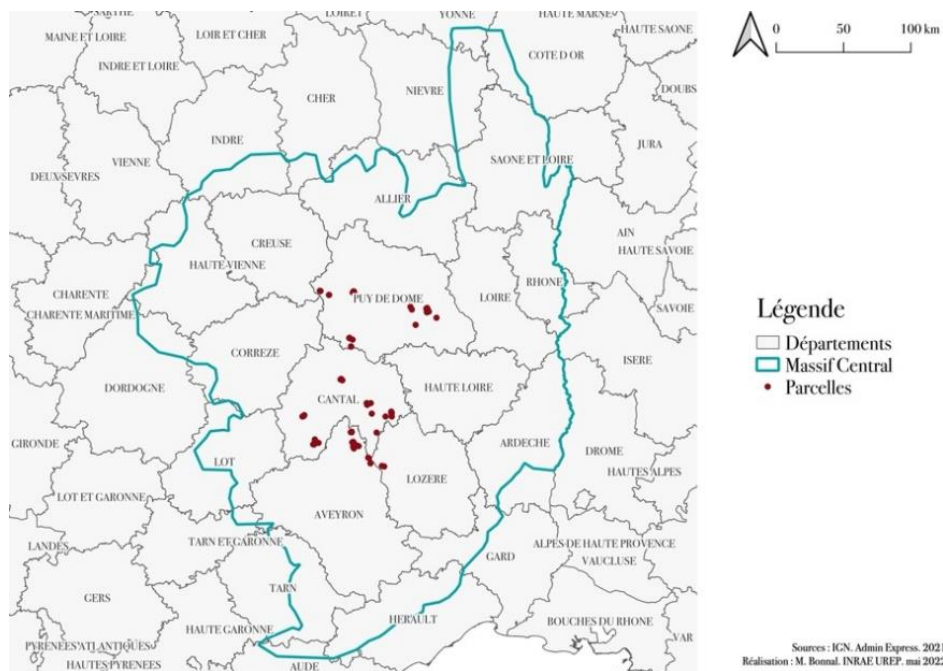


Figure 6 : Carte des parcelles étudiées pour la campagne terrain 2022

Source personnelle

Tableau II : Indicateurs du sol mesurés lors de la campagne terrain 2022

Remarque : Le projet global s'intéresse à différents pools de carbone afin d'analyser son temps de résidence dans le sol en fonction des variables environnementales, climatiques, pratiques (approche temporelle).

| | |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Biologique | Activité biologique : Humads* |
| Physique | Densité apparente (DA) |
| Chimique | Carbone CEC (Capacité d'Echange Cationique), taux de saturation Macroéléments (ex : P2O5, K2O, MgO, Na2O, CaO) pH Matière Organique Particulaire* (Particulate Organic Matter POM*) Matière Organique du Sol * (Soil Organic Matter SOM*) |

Source personnelle

à l'ajout d'azote [23]. Cela amène à penser que la diversité des prairies est multifactorielle et répond à de nombreuses variables. De cette manière, il est pertinent de s'intéresser aux liens entre le contexte pédologique et la biodiversité végétale en y incluant des facteurs directs et indirects (climat et/ou pratiques). Nos hypothèses de travail sont de tester pour les prairies semi-naturelles du Massif-Central :

- H0 : poids des traits **édaphiques** sur la biodiversité végétale,
- H1 : effet du contexte **pédoclimatique** sur la diversité végétale,
- H2 : l'influence du **sol, du climat et de l'usage** sur la flore des couverts prairiaux.

Il est choisi de caractériser la biodiversité végétale des prairies permanentes par des approches de rareté* et de richesse* spécifique.

3. Matériels et Méthodes

3.1. Site d'étude

Le projet global, dans lequel s'insère ce stage, s'inscrit dans une recherche impliquant une collaboration entre éleveur.euse.s du Massif-Central et chercheur.euse.s afin de répondre aux variations des prairies permanentes face au **changement global**. L'étude s'appuie sur une approche combinant agronomie et phytosociologie, développé dans le programme initial AEOLE. Une de nos finalités est de réaliser, quelques années après, de nouveaux prélèvements sur les parcelles AEOLE afin d'étudier l'évolution des prairies.

Le programme donne lieu à des observations. Dans le cadre du projet actuel, 87 parcelles réparties dans le Massif-Central (voir figure 6) sont observées. Ce réseau couvre une gamme de pratiques et de milieux rencontrés dans 4 départements du Massif-Central, à savoir : l'Aveyron, le Cantal, la Lozère et le Puy-de-Dôme. Les prairies semi-naturelles présentent des dissimilitudes par leur localisation, leur climat, leur fertilité, leur sol, leur gestion (pâturage, fauche, rotation), leurs pressions. Nous avons construit un plan d'échantillonnage reposant sur un groupe de parcelles représentatif du gradient d'usage, du gradient climatique, du gradient pédologique, des gradients de biodiversité floristique, ... Au sein de ce territoire, les prélèvements de sols sur les 87 parcelles permettront d'acquérir des connaissances physico-chimiques, biologique (cf. tableau II) et d'associer une approche socio-temporelle avec le jeu de données antérieur.

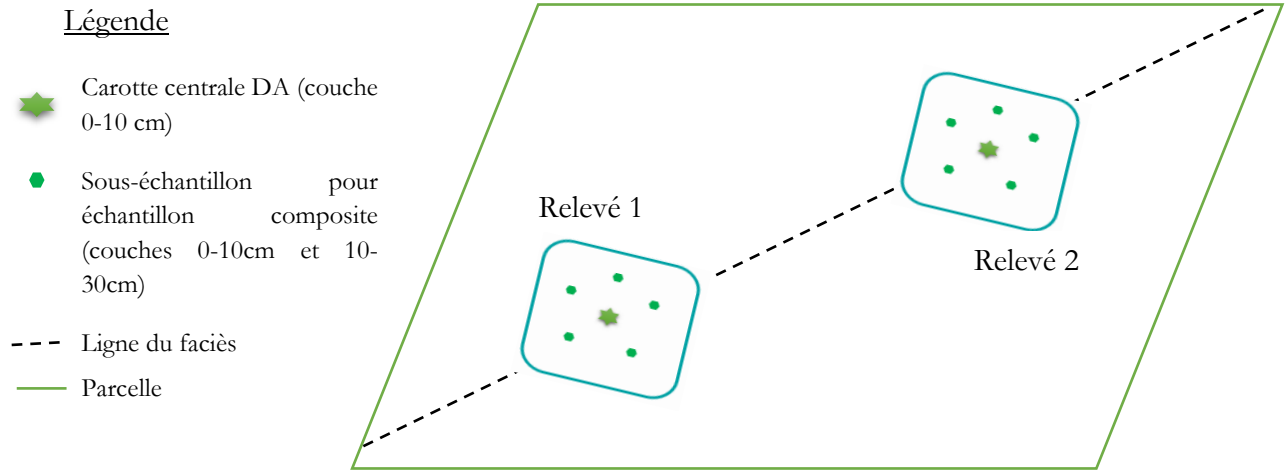


Figure 7 : Présentation de la méthode de prélèvement sur les parcelles
Source personnelle

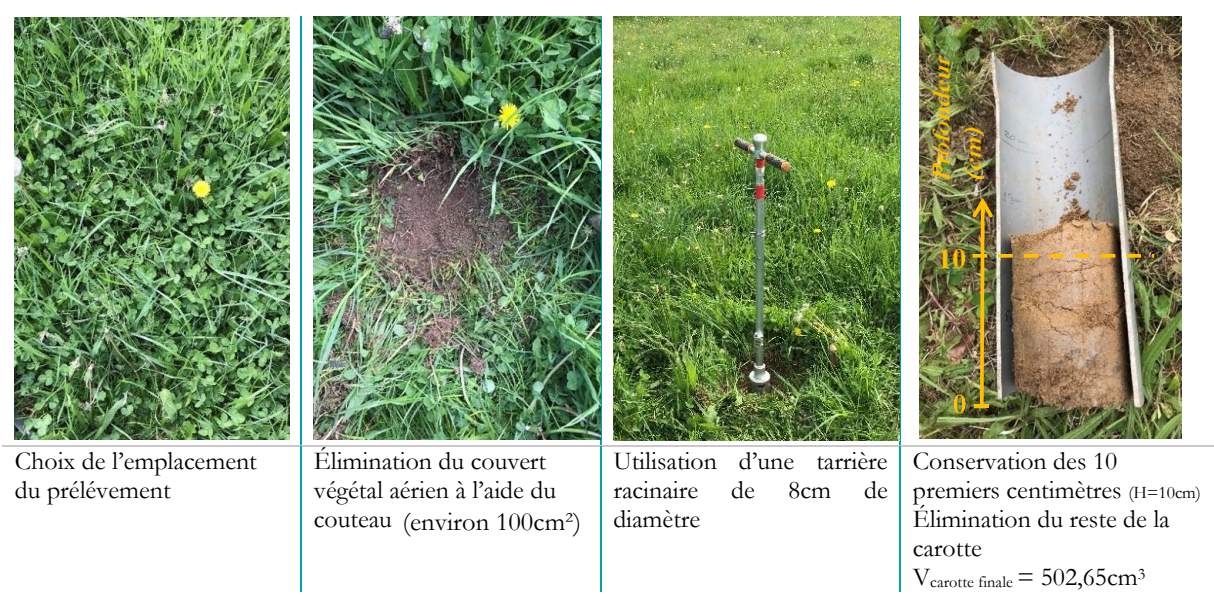


Figure 8 : Photos du prélèvement de la carotte pour la DA (tarière racinaire)
Source personnelle

3.2. Échantillonnage


Sur chaque parcelle deux zones sont identifiées au sein desquelles les prélèvements de sol sont réalisés. Les lieux des relevés (zones) sont référencés et sont identiques aux prélèvements antérieurs. Pour l'échantillonnage de sol, plusieurs prélèvements sont opérés. La figure 7 présente la méthode de prélèvement. Premièrement, par relevé, il est produit une mesure de la densité apparente sur la couche 0-10 cm (2 carottes par parcelles). Une tarière racinaire à manivelle est utilisée. Puis, un échantillon composite est réalisé via le prélèvement de 5 sous échantillons par relevé sur la couche 0-10 cm. Cela représente 1 échantillon composite par parcelle composé de 10 sous échantillons pour la couche 0-10 cm. Enfin, un échantillon composite est constitué par le prélèvement de 5 sous échantillons par relevé sur la couche 10-30 cm. Cela correspond à 1 échantillon composite par parcelle composé de 10 sous échantillons (5 par relevé) pour la couche 10-30 cm. Pour les composites, il est utilisé une tarière Edelman. Il est nécessaire de constituer un échantillon représentatif et homogène.

3.2.1. Densité apparente

La porosité totale d'un sol permet de caractériser de façon globale l'état physique d'une couche de sol. Le plus souvent, il est utilisé des mesures issues de la Densité Apparente (DA). Les carottes de sol pour calculer la densité apparente sont prélevées, à l'aide d'une tarière racinaire (diamètre de 8 cm), en prenant soin d'avoir un volume constant et connu. Préalablement, le couvert végétal aérien est enlevé en utilisant un couteau. Il faut veiller à ne pas tasser le sol pendant le forage (piétinement, découpe circulaire sans appuyer...). La carotte extraite est découpée afin de ne conserver que les 10 premiers centimètres (repérage avec une gouttière graduée) (voir figure 8). De cette manière, la carotte finale a un volume standard connu ($V_{\text{carotte}} = \pi * r^2 * h = \pi * 4^2 * 10$, avec r le rayon du carottier). Dans notre cas, ce volume V_{carotte} a été estimé à 502,65 cm³. Individuellement, chaque carotte est placée dans une barquette en aluminium à l'intérieur d'un sachet zip étiqueté (Code parcelle- Type de prélèvement- Numéro carotte, *ex :28-FO DA1*).

3.2.2. Constitution des échantillons composites

La réalisation des échantillons composites constitue un prélèvement aléatoire à la tarière classique à gouge de 15 cm, de 5 sous échantillons par relevé. Le prélèvement à la tarière se compose de deux parties. D'abord, une carotte est prélevée, correspondant à la couche 0-15 cm de sol. Elle est séparée en deux. Dans une barquette identifiée (Code parcelle- Type de

| | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |  |
| Prélèvement à la tarière Edelman autour de la carotte centrale : PREMIER COUP (couche 0-15 cm) | 1 ^{ère} carotte horizon 0-15 (séparée et déplacée) <u>Couche 0-10</u> : Barquette aluminium composite couche 0-10 cm <u>Couche 10-15</u> : Barquette aluminium composite couche 10-30 cm | DEUXIÈME COUP (couche 15-30 cm) | 2 nd carotte horizon 15-30 <u>Couche 15-30</u> : Barquette aluminium composite couche 10-30 cm |

5 prélèvements par Relevé et par Profondeur



Pour chaque horizon : 10 prélèvements groupés des 2 relevés dans une barquette aluminium

Figure 9 : Photos du prélèvement des échantillons Composites à la tarière Edelman

Source personnelle

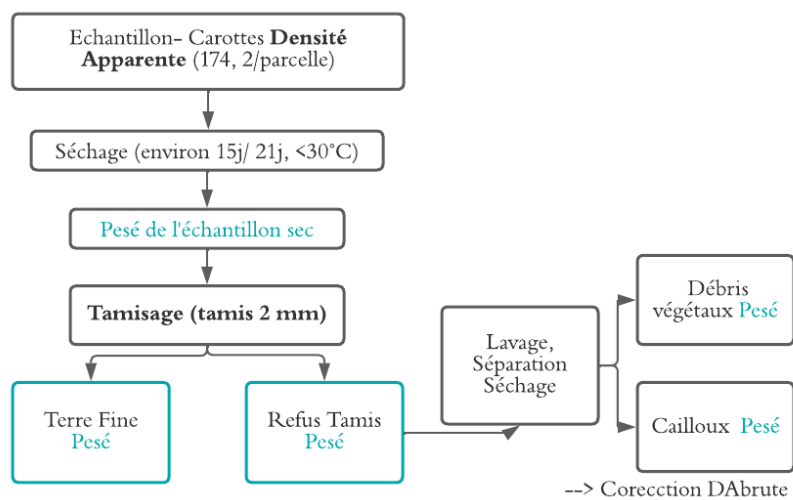


Figure 10.a. : Protocole simplifié pour la Densité Apparente

Suite de la figure sur la page suivante

prélèvement- Profondeur, *ex :28-FO- C010*), il est placé les 10 premiers cm correspondant à la couche 0-10 cm et les 5 derniers cm dans une 2nd barquette identifiée la couche 10-30 cm. Par la suite, au même point, une seconde carotte est prélevée. Les 15 cm de sol sont placés dans la 2nd barquette et complète la couche 10-30 cm. Il faut veiller à ne pas avoir une accumulation de la terre de la couche supérieure, au risque de fausser le diagnostic des couches. Ces étapes sont réitérées pour les 10 sous échantillons de la parcelle (dont 5 par zone). Pour finir, individuellement, chaque échantillon est placé dans une barquette en aluminium à l'intérieur d'un sachet zip étiqueté (figure 9).

La totalité de l'échantillonnage d'une parcelle, est amenée au laboratoire, où elle est séchée, tamisée, homogénéisée, et répartie en plusieurs fractions. Pour l'ensemble des 87 parcelles, 174 carottes sont collectées pour la DA et 174 échantillons composites sont réalisés.

3.2.3. Traitement des échantillons

Le traitement du sol est essentiel et permet d'obtenir la **DA** par des pesées et des estimations ; et à l'aide des composites, de générer des échantillons homogènes pour ensuite être soumis aux analyses **physiques, chimiques** et **biologiques** décrites précédemment. Il est distingué 2 modes de traitement en fonction du type d'échantillon (Densité Apparente ou composite) comme le révèle la figure 10 (10.a. et 10.b.). Dans un premier temps, les échantillons DA sont mis à sécher. Quant aux échantillons composites, ils sont mis à sécher puis homogénéisés, quartés et séparés. Il est important de noter que le temps de séchage est variable et dépend du contexte du prélèvement, de la CEC, et de la texture/granulométrie des sols. L'annexe 3 propose des tableaux plus détaillés des protocoles à réaliser.

Par la suite, il est nécessaire de conduire une analyse en laboratoire. À partir de la densité apparente, il résulte de nombreuses données/rerelations comme une estimation du stockage de carbone ou de matière organique à l'hectare. Des méthodes de référence d'analyse du sol sont utilisées pour mesurer des indicateurs comme le pH, le phosphore, le potassium, le magnésium, l'azote, etc. Grâce à ces démarches, il est possible d'avoir des données chiffrées afin d'étudier les hypothèses.

3.3. Tests statistiques

La durée du stage n'a pas permis d'avoir les résultats des analyses qui sont en cours de réalisation (planification de fin mai à novembre 2022) au laboratoire de l'UREP. Par conséquent, dans ce stage, seules les données relatives aux variables de sol et de flore sont traitées (acquises lors des projets précédents). C'est sur ce jeu de données disponible que nos

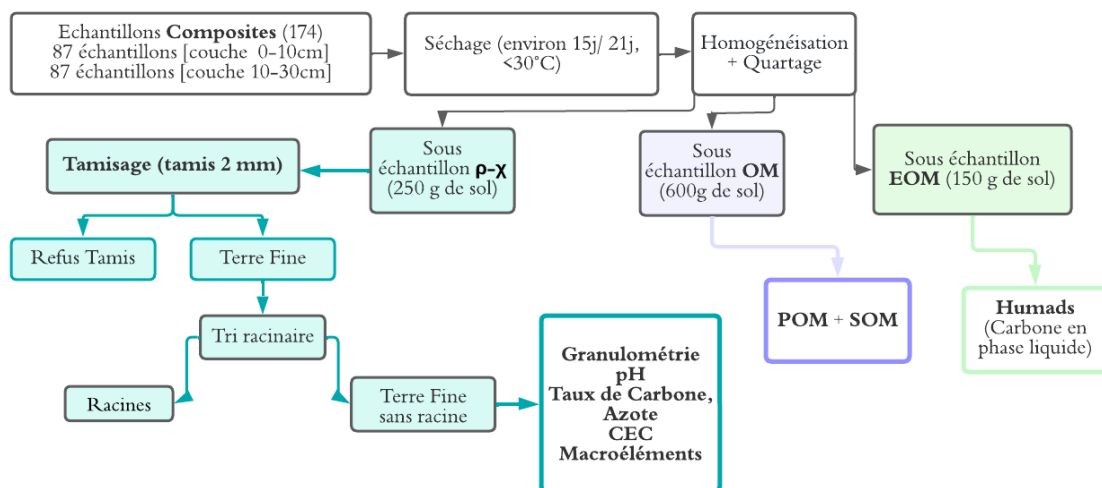


Figure 10.b. : Protocole simplifié pour les Composites

Figure 10 : Présentation synthétique des protocoles de traitement des échantillons de la Densité Apparente et des Composites

Source personnelle

Tableau III : Variables prises en compte pour l'Analyse en Composantes Principales

| Variables édaphiques : |
|------------------------------------------------------------------|
| Parcelles (noms) |
| pH |
| Densité Apparente |
| Teneur en Carbone |
| Teneur en Azote |
| Teneur en Phosphore |
| Teneur en Potassium |
| Teneur en Magnésium |
| Teneur en Calcium |
| Capacité d'échange cationique (CEC) |
| Teneur en Sodium |
| Teneur en Sables (sables fins + sables grossiers, granulométrie) |
| Teneur en Limons (limons fins + limons grossiers, granulométrie) |
| Argile (granulométrie) |

Capture d'écran des noms des variables (après la fonction `colnames` de R)

```
colnames(datacpsol)
[1] "Parc"      "pH"        "C"         "N"         "DA"        "P205"      "K20"       "MgO"
[9] "CaO"      "CEC"       "Na20"      "Sables_tot" "Limons_tot" "A"
```

Source personnelle

hypothèses de travail ont été testées.

Le **jeu de données** est vaste et complexe, et organisé en plusieurs bases de données (voir annexe 4). À l'aide de **R*** (langage de programmation), il est ré-analysé et ré-exploité les données existantes (issue de la base AEOLE) en lien avec les différents modèles formulés dans l'état de l'art. Pour les 143 individus (parcelles), 44 variables sont étudiées (cf annexe 5).

Les données de botanique des 143 parcelles ont été acquises à l'aide des relevés phytosociologiques sur le même transept des parcelles lors des campagnes. À l'issue de ces observations floristiques, des indices de Braun et Blanquet* sont apparus. Lors du stage, ils ont été approfondis et transformés en indice de Van Der Maarel* afin de les rendre plus compréhensibles et accessibles pour les analyses statistiques suivantes [24]. Au moyen de ces derniers, il en découle la rareté* et la richesse* spécifique (moyenne) des communautés.

Les données d'usage et climatiques sont issues des agriculteurs et respectivement des stations-météos proches des parcelles. L'étude statistique se découpe en deux parties.

3.3.1. ACP

Au moyen de l'application R, une première approche statistique est réalisée avec une Analyse en Composantes Principales (ACP). La méthode descriptive multidimensionnelle dépeint une technique d'ordination c'est-à-dire une classification non hiérarchique (explication plus détaillée en annexe 6). Elle permet de structurer et de mieux comprendre le jeu de données (étude des relations linéaires et des variances entre les variables édaphiques). En effet, les relations accomplies conduisent à une répartition des individus (nuage de points, nommé carte) qui forme une structure à interpréter. Pour apprécier cette carte, il est nécessaire que les données soient simplifiées (réduites). L'étude des corrélations entre variables et leurs intensités permet de sélectionner ou de réduire des dimensions tout en conservant un maximum d'informations [25].

Dans un premier temps, les variables sol de la base de données sont triées (choix de 14 variables, cf. tableau III). L'annexe 7 montre le script tapé pour aboutir à l'ACP. Aussi, un diagramme d'éboulis* est construit, montrant le pourcentage de variance expliquée de chaque dimension de l'ensemble des données. Cet outil permet de vérifier si l'analyse fonctionne correctement. Le nombre de variables explicatives quantitatives est réduit, en regroupant celles qui sont proches. Après le choix des variables sol via l'ACP, il peut en découler des graphiques avec les différentes dimensions choisies et également, des régressions simples et multiples, en lien avec les marqueurs de biodiversité.

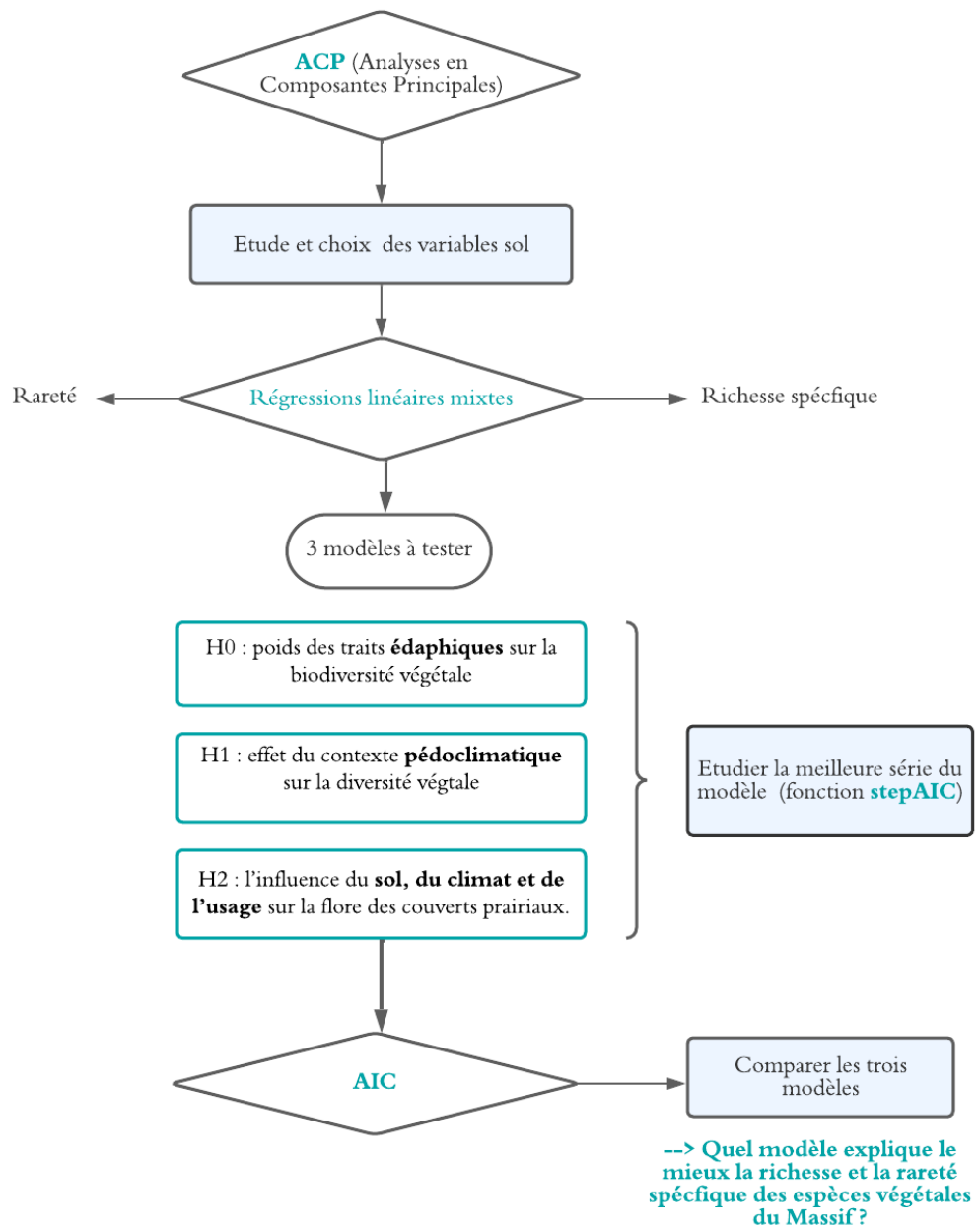


Figure 11 : Schéma simplifié du programme d'analyse statistique réalisée durant ce travail

Utilisation de RStudio (R version 4.1.3)

Source personnelle

3.3.2. Régression simple et multiple

Par la suite, des modèles sont construits en accord avec les hypothèses formulées (H0, H1, H2). Les régressions simples ou multiples sont conçues en lien avec les données de biodiversité dont la richesse spécifique et la rareté (à l'échelle régionale) pour pouvoir répondre aux questionnements. D'une part, une régression simple est un ajustement de la fonction affine ($f(x)=ax+b$) avec une seule variable explicative. D'autre part, la régression multiple explique une variable numérique par plusieurs autres variables numériques indépendantes. Elle modélise la relation entre la variable à expliquer et les variables explicatives sous la forme d'une équation de type $Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots$ où

Y est la variable à expliquer, X_n les variables indépendantes,
a une constante b_n les coefficients de régression partiels.

La fonction *stepAIC* du logiciel R effectue une sélection de modèle pas à pas par AIC* (Akaike Information Criterion). Elle permet de déterminer la meilleure série pour un modèle/hypothèse. En ajout, la fonction *AIC* évalue la bonne adéquation d'un modèle et compare des modèles entre eux (et celui qui convient le mieux). Ce critère peut évaluer des régressions multiples. La figure 11 présente le schéma des statistiques réalisées au cours de ce stage.

Pour finir, ces méthodes et analyses permettent d'étudier des liens sur la relation sol/biodiversité dans le Massif-central. Ainsi, il est possible d'établir l'influence du contexte pédoclimatique sur la biodiversité végétale des prairies semi-naturelles du Massif-Central.

4. Résultats et Interprétations

4.1. Échantillonnage

À la suite de l'échantillonnage et du traitement des échantillons, il est retrouvé 174 carottes pour la DA et 174 échantillons composites à analyser, pour l'ensemble des 87 parcelles. Parmi ces prairies, certaines étaient mésotrophes ou oligotrophes, et d'autres étaient acides (influence de la roche-mère). Il est retrouvé également d'autres types de végétation herbacée qui sont associés à des prairies et gérés comme telles. Notamment, les prairies humides étaient principalement des pâturages de jonc. La texture du sol variait considérablement et comprenait des sols plus ou moins minéraux (sables, limons et argiles) et des sols organiques /tourbeux. Pour une zone relativement réduite, la diversité de sol, de végétation était considérable, ce qui fait du Massif un territoire d'intérêt. Elle permet d'étudier l'impact de différents facteurs et de leur variation dans l'espace sur la dynamique des prairies permanentes

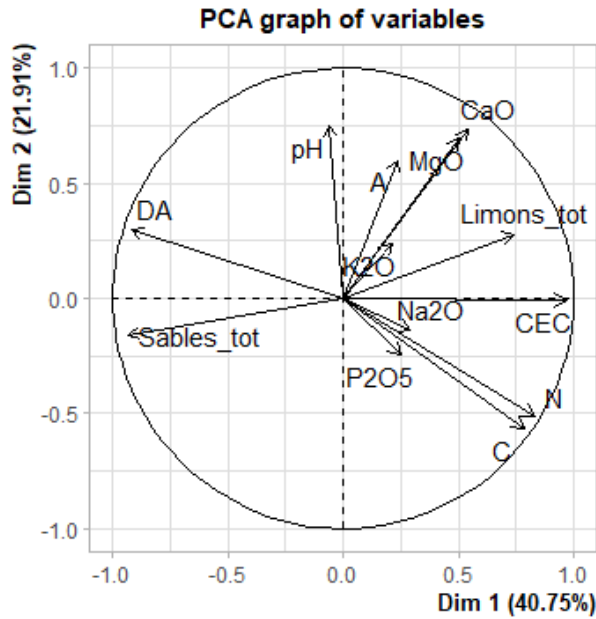


Figure 12 : Analyse en composantes principales (ACP) réalisée sur des variables édaphiques de 74 parcelles de parcours situés sur le Massif central.

Ces variables sont les suivantes : pH, teneur en Carbone (C) ; teneur en Azote (N) ; Densité Apparente (DA) ; teneur en Phosphore (P2O5), teneur en Potassium (K2O) ; teneur en Magnésium (MgO) ; teneur en Calcium (CaO) ; Capacité d'échange cationique (CEC) ; teneur en Sodium (Na2O) ; teneur en Sables (Sables_tot), teneur en Limons (Limons_tot) ; teneur en Argile (A)

Source personnelle

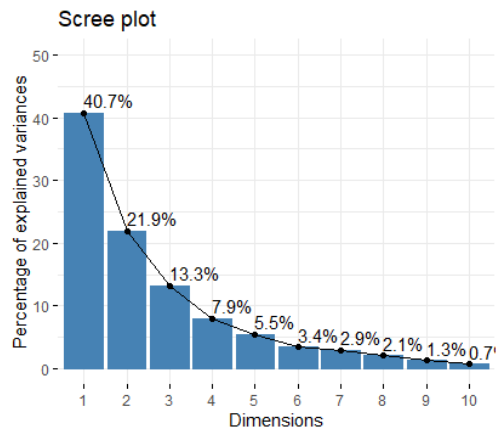


Figure 13 : Diagramme d'éboulis de l'ACP (à l'aide de la fonction *fviz_eig* de R)

Représentation graphique de la variance de chaque composant afin de déterminer le nombre de dimension à conserver. Les trois premières dimensions expliquent 75% des variations observées.

Source personnelle

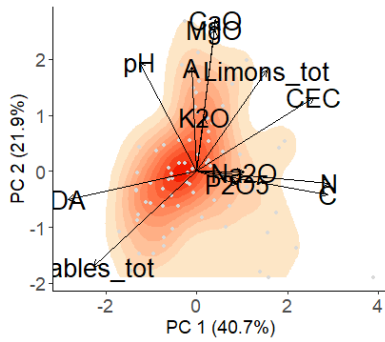
du Massif Central. La méthode d'échantillonnage permet d'approcher avec précision, régularité et précision les paramètres du sol.

Par la suite, ces analyses serviront à l'étude du sol des et permettront de voir l'évolution de ce dernier dans un contexte de changement global. Par exemple, à l'aide des données des relevés précédents, il peut être conçu des analyses statistiques comme l'ACP.

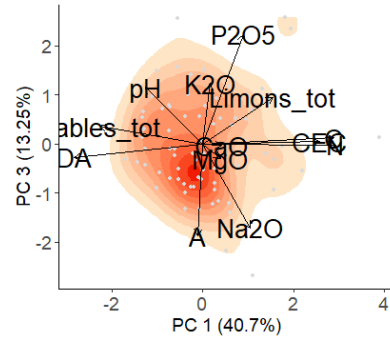
4.2. Variables édaphiques

Tout d'abord, l'Analyse en Composantes Principales est reliée à 14 variables de sol étudiées. Il faut noter que le script tapé dans R centre et réduit les variables et élimine les individus avec des valeurs manquantes. Suite au script fourni (annexe 7), il en résulte l'ACP avec 14 variables et 74 individus (parcelles) (voir figure 12). Les deux axes centraux expliquent 62,66% des variations observées sur les parcelles. L'axe 1 explique 40,75% de la variation des variables édaphiques. Il explique principalement les variables caractérisant les indicateurs physiques (Densité Apparente), granulométrique (sables, limons) et les autres variables mesurées dont la Capacité d'Échange Cationique (CEC), teneur en sodium, phosphore, en potassium. Le second axe qui explique 21,91% de la variation est corrélé positivement au pH et à l'argile. Pour résumé, la dimension 1 permet de séparer des parcelles selon des paramètres physique du sol : en fonction de leur texture et de leur compaction ; la dimension 2 est un axe qui pourrait être associé à la « fertilité » / « chimie » du sol avec des variations associées au C, au N, au pH, Ca, Mg ,

Grâce au diagramme d'ébouillis (figure 13), il est visualisé le pourcentage de variance expliquée de chaque dimension de l'ensemble de données. Il aide à choisir les dimensions à retenir. Ainsi, l'interprétation des 3 premières dimensions explique 75% (40,75+21,91+13,3) des variations et synthétise donc bien les changements au sein d'un gradient édaphique. Cela est jugé suffisant puisque la plupart des informations sont conservées. La figure 14 montre les résultats des analyses en composantes principales sur les trois premières dimensions de l'ACP initiale (D1 et D2, D1 et D3, D2 et D3). La troisième dimension justifie 13,25% de la variance totale. Ainsi, ces graphiques rendent compte de la relation entre le carbone et l'azote et aussi, la relation entre le phosphore et le sodium (vecteurs dans les mêmes directions). De plus, elle met en évidence le lien entre le magnésium et le calcium du sol (cations liés à la capacité d'échange cationique). La densité apparente semble dépendante de la teneur en sable du sol (corrélation négative). Les variables comme le pH et la CEC sont inversement proportionnelles (vecteurs qui pointent en directions opposés).

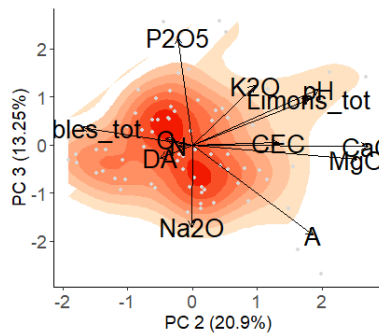


Représentation graphique de l'ACP sur la dimension 1 et 2



Représentation graphique de l'ACP sur la dimension 1 et 3

(ACP identique à la **figure 11** mais pas projetée dans les mêmes configurations)



Représentation graphique de l'ACP sur la dimension 2 et 3

Figure 14 : Résultats de la représentation graphique des trois premières dimensions de l'Analyses en Composantes Principales des données de pédologie (D1 et D2, D1 et D3, D2 et D3 ; 75% de la variance)

Les points grisés représentent les individus (parcelles). Les aires rouges expliquent comment les individus se répartissent.

Source personnelle

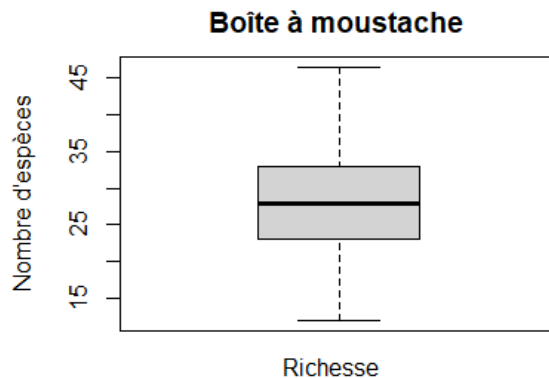


Figure 15 : Boîte à moustache de la richesse spécifique des prairies étudiées du Massif central

Source personnelle

Les ACP amènent à une vision synthétique des différentes corrélations entre les données édaphiques. De cette manière, il est conservé un indicateur de texture : les **sables totaux**. Sa projection est correcte. Cette teneur est corrélée négativement à la CEC donc explique relativement les mêmes choses (mêmes poids). Le **pH** est sauvegardé en raison de sa projection, et sa notification dans les 3 dimensions (et son regard sur certains oligo-éléments). Le **carbone** est également conservé à la vue de sa projection et de sa relation avec l'azote.

L'analyse a permis de sélectionner 3 principaux indicateurs de sol afin de construire les modèles (indices physiques, chimiques). Ces 3 paramètres reflètent la grande diversité des parcelles et caractérisent les variations édaphiques du jeu de données.

4.3. Facteurs influençant la biodiversité

La diversité végétale peut-être expliquée par plusieurs types comme à l'échelle de l'espèce, par des groupes fonctionnels (fabacées, poacées, diverses), par la richesse spécifique ou la rareté spécifique. Dans ce rapport, l'approche de la biodiversité des écosystèmes prairiaux se fera par la **richesse spécifique** et la **rareté**. Généralement, les prairies ayant la plus grande valeur pour la biodiversité sont associées à des systèmes d'agriculture extensive. Cependant, l'intensification (changement de pratiques, intensité de semis, fertilisation) accrue de l'agriculture au cours des dernières décennies a contribué à leur déclin [26]. Cela se manifeste par des changements dans la composition des espèces végétales et une réduction générale de la richesse et rareté des espèces végétales. De nombreux facteurs influencent cette diversité. De cette manière, il a été testé l'influence :

- du sol sur la biodiversité (modèle 0, Hypothèse 0),
- du contexte pédoclimatique (modèle 1, H1),
- des variables édaphiques, climatiques et pratiques agricoles (modèle 2, H2) sur la diversité végétale.

4.3.1. Richesse spécifique

La richesse spécifique globale correspond aux nombres d'espèces végétales rencontrées au sein de la communauté végétale. La boîte à moustache (figure 15) décrit la richesse du jeu de données. Sur les parcelles d'étude, cet indice s'étend de 7 à 56 espèces végétales, avec une moyenne de 27,93. Des valeurs aberrantes ne sont pas présentes. Pour les quartiles (Q1, Q2, Q3), il est constaté peu d'écart entre le nombre d'espèces. Le logiciel R permet de réaliser des régressions linéaires mixtes pour pouvoir étudier l'impact de variables

| Coefficients: | | |
|---------------|----------|---------------|
| | Estimate | Std. Pr(> t) |
| (Intercept) | 0.2594 | 0.033951 * |
| Pente | 0.1415 | 0.173564 |
| pH | 0.1355 | 0.505181 |
| Stock_C | 0.4739 | 0.000358 *** |

Relation entre la richesse spécifique et le pH, le stock carbone.

Modèle 0 (H0) : influence du sol sur la richesse spécifique végétale.

| Coefficients: | | |
|-------------------|----------|---------------|
| | Estimate | Std. Pr(> t) |
| (Intercept) | 0.40720 | 0.04117 * |
| Pente | 0.15458 | 0.15317 |
| SIN_Orientation | -0.12053 | 0.22091 |
| Stock_C | 0.31454 | 0.00937 ** |
| Temp_MoyAn | -0.31043 | 0.04274 * |
| I(Temp_MoyAn^2) | -0.28075 | 0.05227 . |
| I(Precip_MoyAn^2) | 0.08475 | 0.33351 |

Relation entre la richesse spécifique et le stock carbone, la température et les précipitations annuelle.s moyenne.s.

Modèle 1 (H1) : influence du sol +climat sur la richesse spécifique végétale.

| Coefficients: | | |
|-------------------|----------|---------------|
| | Estimate | Std. Pr(> t) |
| (Intercept) | 0.54847 | 0.010220 * |
| Pente | 0.27301 | 0.010421 * |
| SIN_Orientation | -0.15605 | 0.096723 . |
| I(pH^2) | -0.20301 | 0.243862 |
| Stock_C | 0.38198 | 0.000451 *** |
| I(Temp_MoyAn^2) | -0.09721 | 0.480220 |
| Precip_MoyAn | -0.23117 | 0.022816 * |
| I(Precip_MoyAn^2) | 0.20488 | 0.022783 * |
| NTot | 0.35284 | 0.015792 * |
| I(NTot^2) | -0.53714 | 0.001718 ** |
| Use.type | -0.08791 | 0.237283 |

Relation entre la richesse spécifique et le sol, le climat, la fertilisation azotée (azote totale), l'usage.

Modèle 2 (H2) : influence du sol +climat + usage sur la richesse spécifique végétale.

```

> #Comparaison de model
> AIC(Mod0best)
[1] 117.9527
>
> AIC(Mod1best)
[1] 113.8945
>
> AIC(Mod2best)
[1] 109.1782

```

Résumés de la fonction AIC (choix du meilleur modèle)

Figure 16 : Résumés des régressions de la **richesse spécifique** des espèces en fonction des différents modèles proposés (n=51)

Légende : estimate : relation entre la variable réponse (richesse) et la variable explicative

p-value : indication sur le niveau de confiance (significative si p-value <0,1)

signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Source personnelle

sur la richesse. Il est possible de faire une AIC car les modèles testés se basent sur une méthode statistique comparable et un même jeu de données.

Pour rappel, la fonction *stepAIC* construit chaque modèle (sol / sol climat/ sol climat usage), avec l'ensemble des variables sélectionnées. Elle compare l'ensemble des modèles réalisable avec les données d'intérêt, en réduisant pas à pas le nombre de variables dans le modèle. Elle teste la robustesse des modèles. *StepAIC* retient le meilleur modèle pour chaque hypothèse dans le but d'étudier la relation avec la richesse-climat/sol/usage.

À travers ces analyses, il est montré l'influence des facteurs sur la richesse. Aussi, il est étudié quel modèle permet d'interpréter, au mieux, l'influence du contexte (sol, climat, usage) sur le nombre d'espèce. La figure 16 montre les résumés des modèles issus du script édité dans R (disponible en annexe 8). Ces condensés justifient l'interprétation et la discussion des modèles.

Le modèle 0 étudie la richesse spécifique en fonction de **variables édaphiques** (H0). D'une part, le pH est une variable peu significative dans le modèle ($p\text{-value}=0,5052$). Pourtant, la science s'accorde pour écrire que le sol à travers le pH influence positivement la richesse spécifique [20], [10]. D'autre part, le carbone est corrélé positivement à la richesse (estimate=0.4739 / positif ; intervalle de confiance $> 99,9\%$ / $p\text{-value}= 3,58*10^{-4}$). Ainsi, si le sol dispose davantage de carbone, le nombre d'espèces est plus élevé. Le sol a une influence sur la biodiversité végétale mais ne permet pas de l'expliquer entièrement.

Le modèle 1 illustre l'effet du contexte **pédoclimatique** sur la richesse (H1). Les variables les plus pertinentes sont : le carbone du sol, la température. Cette dernière est corrélée négativement à la richesse spécifique (estimate=-0,310 ; $p\text{-valeur}=0,0427$; confiance à 99%), comme la température quadratique dans un effet moindre (estimate=-0,280 ; $p\text{-valeur}=0,0523$; confiance plus basse à 95%). Donc, plus la température augmente, moins la diversité spécifique est importante. De même, les températures extrêmes ne favorisent pas le nombre d'espèces dans la zone. Cette observation s'accorde avec la littérature scientifique : le réchauffement de l'air entraîne une perte d'espèces végétales [22]. Le gradient climatique traduit une partie de la diversité spécifique de la zone.

Enfin, le modèle 2, **l'usage des prairies** est ajouté. La fauche ou la pâture (*usage*) n'affecte peu la richesse ($p\text{-value}=0,237$, valeur très élevée). Néanmoins, la constante biogéographique, la pente, l'orientation nord (*sin orientation*) semblent avoir un effet notable sur la richesse (intervalle de confiance compris entre 99% à 95%). Une exposition nord entraîne moins de richesse sur les communautés végétales (estimate de *sin orientation*= -0,156).

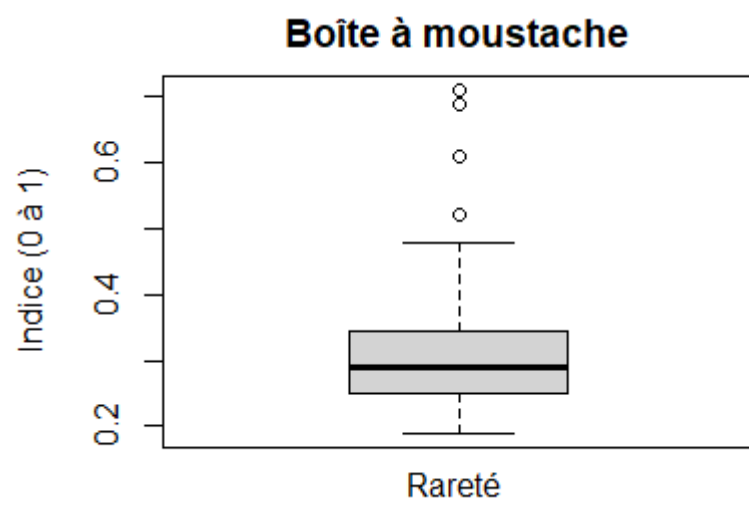


Figure 17 : Boîte à moustache de la rareté des prairies étudiées du Massif Central

Source personnelle

Par ailleurs, l'effet du carbone est d'autant plus significatif dans ce modèle (intervalle de confiance plus faible). Aussi, il est considéré l'effet de la pluviométrie sur la biodiversité des parcelles (corrélation négative, $r = -0,23$; confiance à 99%). Il est remarqué qu'une très forte pluviométrie diminue la quantité d'espèces. Or, dans le Massif, certaines zones ont une pluviométrie forte à l'année (aux alentours de 2000mm). Effectivement, ce paramètre favorise l'acidification du sol et donc des types de végétation plus pauvres floristiquement, selon Henaff [18]. Pour l'azote, il est indiqué significatif ($p\text{-value} = 0,0158$ donc une confiance à 99%). À savoir, les doses d'azotes sont relativement faibles pour les éleveur.euse.s du projet AEOLE. Ce qui peut expliquer la corrélation positive avec la richesse. À contrario, certaines études montrent que l'ajout d'azote affecte négativement la diversité des espèces de prairies de montagne [23]. Dans des conditions de dosage important, un petit nombre d'espèces compétitives ont tendance à dominer la végétation, ce qui entraîne l'exclusion de petites espèces à croissance lente (et donc l'élimination de certaines espèces)[26]. Donc, l'interprétation de l'azote total issue de l'AIC correspond peu à la lecture scientifique. Pour répondre à cette interrogation, il serait envisageable de découpler l'azote total avec la partie minérale puis organique afin de voir son origine et d'analyser l'influence de ces dernières. La pratique culturale peut donc influencer la diversité spécifique. Dans les deux derniers modèles l'ajout de variables peut accentuer les interactions entre elles.

Pour finir, la fonction *AIC* compare les modèles. Le modèle 2 a un indicateur d'AIC, significativement, inférieur que les autres modèles ($AIC(\text{Mod0best}) : 117,9527$; $AIC(\text{Mod1best}) : 113,8945$; $AIC(\text{Mod2best}) : 109,1782$). Le contexte plus général explique davantage la richesse spécifique des communautés végétales du Massif. Pour expliquer cette notion de richesse, il est nécessaire de prendre en compte des facteurs pédoclimatique et de pratiques agricoles. La production agricole et l'environnement peuvent être impactés par cette richesse. En effet, la biodiversité est directement corrélée au fonctionnement et services rendue par les écosystèmes.

4.3.2. Rareté

L'indice de rareté indique si la communauté est constituée d'espèces plutôt communes ou au contraire d'espèces plutôt rares à l'échelle du Massif central. Plus l'indice est élevé, et plus les espèces qui composent la parcelle sont rares au sein de la zone. La boîte à moustache (figure 17) décrit la rareté au sein des parcelles du jeu de données. Sur les parcelles d'étude, cet indice s'étend de 0,18 à 0,76, avec une moyenne de 0,30. Il est remarqué que quelques prairies ont un cortège floristique relativement rare. Pour rappel, les procédés statistiques issues de R

```

Coefficients:
              Estimate Pr(>|t|)
(Intercept) -0.56746 7.62e-10 ***
pH           -0.10663 0.40052
I(pH^2)      0.15767 0.16407
Sables_tot   0.10361 0.15031
stock_C      0.27015 0.00242 **

```

Relation entre la rareté et le pH, les sables et le stock carbone

Modèle 0 (H0) : influence du sol sur la rareté

```

Coefficients:
              Estimate Pr(>|t|)
(Intercept) -0.56159 2.32e-09 ***
SIN_Orientation -0.04474 0.39952
Sables_tot    0.11532 0.08454 .
stock_C       0.21769 0.00397 **
Temp_MoyAn   -0.17650 0.03556 *
I(Temp_MoyAn^2) 0.08975 0.22986

```

Relation entre la rareté et le sol, la température annuelle moyenne.

Modèle 1 (H1) : influence du sol +climat sur la rareté

```

Coefficients:
              Estimate Pr(>|t|)
(Intercept) -0.47792 8.71e-11 ***
Sables_tot   0.11172 0.09658 .
stock_C      0.23927 0.00196 **
Temp_MoyAn  -0.19895 0.01687 *
NTot         -0.05459 0.42716

```

Relation entre la rareté et le sol, le climat, la fertilisation azotée (azote totale).

Modèle 2 (H2) : influence du sol +climat+ usage sur la rareté

```

> #Comparaison de model
> AIC(Mod0best)
[1] 52.63826
>
> AIC(Mod1best)
[1] 48.32593
>
> AIC(Mod2best)
[1] 48.08987

```

Résumés de la fonction AIC (choix du meilleur modèle)

Figure 18 : Résumés des régressions de la **rareté** des espèces végétales en fonction des différents modèles proposés (n=50)

Légende : estimate : relation entre la variable réponse (rareté) et la variable explicative

p-value : indication sur le niveau de confiance (significative si p-value <0,1)

signif. codes: 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Source personnelle

sont comparables à ceux associés de la richesse (cf. partie 4.3.1. *Richesse spécifique*). À travers ces analyses, il est montré l'influence des facteurs sur la rareté. Aussi, il est étudié quel modèle permet d'interpréter, au mieux, l'évolution d'espèces plus ou moins communes au sein des parcelles. La figure 18 illustre les résumés issus du script édité dans R (disponible en annexe 8). Ces condensés permettent d'interpréter et de discuter les modèles.

Le modèle 0 (H0) étudie la richesse spécifique en fonction de **variables édaphiques** (H0). À nouveau, le carbone est corrélé positivement à la rareté (estimate= 0,27015 ; positif). La confiance est aux alentours de 99,7% (p-value = 0,00242). Ainsi, si le sol dispose davantage de carbone, la rareté des espèces est plus élevée.

Le modèle 1 (H1) illustre l'effet du contexte **pédoclimatique** sur la richesse (H1). Le carbone du sol rentre en jeu pour ce modèle. Pour la texture et la température, elles sont significatives. Une spécificité pédologique résulte du climat et de la roche-mère. Les propriétés d'un sol dépendent de lien entre le climat et le contexte géologique. Ces derniers sont les principaux facteurs qui déterminent la formation et l'évolution du sol. Un taux élevé en sable entrainerai des espèces plus rares au sein des prairies du Massif (estimate=0,11532, positif ; confiance comprise entre 90% et 95%). Donc, en fonction du climat et de la teneur en sable du sol, la rareté des espèces serait plus notable. Effectivement, certains types de végétaux poussent seulement dans des sols très sableux. Ce qui en fait des végétaux rares dans le territoire. Ensuite, la température représente une variable significative (p-value=0,03556). Elle est corrélée négativement à la rareté(estimate=-0,176). Effectivement, la hausse de température réduit l'indice de rareté dans une communauté végétale [22].

Enfin, le modèle 2 (H2), **l'usage des prairies** est ajouté. Une équivalence est observée au modèle 1 (H1). D'une part, les pratiques culturales (fauche/pâture) ne sont pas sélectionnées par la fonction *StepAIC*. Il est supposé qu'elles ne doivent pas être significative pour expliquer la rareté dans le Massif. D'autre part, l'azote est pris en compte mais la valeur de la p-value est très élevée (p-value=0,42716 donc intervalle de confiance très faible), ce qui ne permet pas de faire une interprétation significative. Cependant, les différentes modalités d'utilisation des végétations agro-pastorales ont un impact sur la diversité végétale. Pour autant, celui-là n'est pas linéaire du fait d'un côté de la difficulté de séparer chaque facteur [18]. D'un autre côté, l'importance de l'historique et la diversité des compartiments écologiques à l'échelle d'une exploitation agricole rend la compréhension de ces variables plus compliquées.

Le modèle 2 a un coefficient d'AIC inférieur que les autres modèles (AIC(Mod0best) : 52,63826 ; AIC(Mod1best) : 48,32593 ; AIC(Mod2best) : 48,08987). Le modèle M0 (sol

seulement) explique moins la rareté au sein du territoire. Néanmoins, les meilleurs modèles 1 et 2 sont très proches (différence faible/nulle). Dans ce cadre-là, l'usage n'a pas beaucoup de poids. En effet, les propriétés du sol (influencées par l'histoire du lieu, sa topographie et la nature de la roche-mère) et le régime de perturbation sont deux des principaux facteurs qui déterminent la présence des espèces [22]. Il est nécessaire d'étudier le contexte global pour appréhender la rareté des espèces végétales. Ainsi, le contexte pédoclimatique explique en partie la rareté dans le Massif central.

En complément, il pourrait être intéressant de tester l'influence de la rareté sur la richesse pour les prairies permanentes du Massif. En effet, KULL souligne que la rareté est corrélée positivement à la richesse spécifique[27].

En conclusion, l'ajout de variable a permis de voir leur rôle respectif et leur impact plus ou moins important sur la rareté et la richesse des prairies permanentes. La littérature scientifique indique que la diversité des espèces végétales des prairies est généralement plus grande sur des sols neutres ou basiques que sur des sols acides[26]. Dans l'étude le pH est une variable liée à la richesse spécifique et à la rareté. Cependant, nous pensions voir un effet plus notable de ce dernier dans le territoire étudié. Les facteurs (notamment le pH, l'utilisation (pâturage ou fauche)) ne montrent pas clairement une relation avec la diversité végétale. Dans le jeu de données AEOLE, les parcelles sont, globalement, acides (moyenne du pH= 5,84, seulement 5 parcelles basiques). Certes, l'ACP a permis de différencier des niveaux d'acidité mais, a priori, cela n'a pas d'impact particulier sur la biodiversité (en tout cas dans ce jeu de données).

En somme, pour les deux types de diversité végétale, il est retenu le meilleur modèle (entre les trois hypothèses étudiées : sol / sol + climat/ sol + climat + usage). L'AIC indique la valeur la plus basse pour le modèle 2 (richesse : 109,1782 ; rareté : 48,08987). En effet, ce modèle est le plus explicatif. Ainsi, l'hypothèse 2 (H2) illustre davantage les changements de flore d'une prairie semi-naturelle. La végétation et les sols sont des systèmes dynamiques. Les relations entre les paramètres de diversité et les propriétés du sol, à un moment donné, ne reflètent pas toujours l'adéquation des espèces végétales présentes à cet ensemble de conditions. De cette manière, la diversité floristique ne répond pas seulement au contexte pédologique mais a un ensemble pédoclimatique, et pratiques agricoles.

Généralement, les prairies permanentes contiennent une grande biodiversité des territoires agricoles en raison de la grande diversité végétale. Celle-ci peut résulter de l'action

combinée de différents facteurs : édaphiques, climatiques et pratiques agricoles, comme cela a été énoncé. Cette diversité offre de nombreux avantages connus pour le fonctionnement écologique et la production agricole. La stabilité de l'écosystème est avantagée face aux perturbations abiotiques. La production fourragère augmente. L'invasion d'espèces, appelées aussi adventices, diminue. Le cycle des nutriments se voit amélioré [1]. Les prairies semi-naturelles ont tendance à avoir une proportion plus élevée d'espèces tolérantes au stress[26].

La diversité végétale est donc un élément clé à la fois écologique et agronomique pour un territoire donné. Donc, il est nécessaire de continuer la recherche sur cette thématique afin de conserver cette diversité au sein des prairies permanentes. Actuellement, il est indispensable d'avoir des réponses pour faire face aux changements globaux. Il semble important de mieux comprendre les relations entre la biodiversité, le fonctionnement des écosystèmes prairiaux et les services écosystémiques qui en découlent.

Conclusion

Pour conclure, ce projet a permis de se renseigner sur les prairies permanentes et leurs importances par le biais, entre autres, des services écosystémiques offerts. L'analyse globale de l'influence pédoclimatique sur la biodiversité végétale des prairies semi-naturelles a amené à réaliser des échantillonnages afin de pouvoir avoir des données et les exploiter. L'interprétation du jeu de données est passé par une découverte d'analyses statistiques. De surcroît, l'étude permet de conclure au regard des hypothèses énoncées que :

H0 : le pH ne contribue peu à expliquer la richesse spécifique ; le sol par le carbone justifie une part de la diversité spécifique,

H1 : le contexte pédoclimatique via la température et la pluviométrie éclaire davantage la biodiversité des prairies,

H2 : le sol, le climat et les pratiques (dont la fertilisation azotée) expliquent la flore et sa fonctionnalité dans les prairies permanentes.

Il en découle que le modèle le plus explicatif est celui qui correspond au modèle (H2) : l'influence du **sol, du climat et de l'usage** sur la flore des couverts prairiaux.

Néanmoins, le contexte édaphique, climatique et pratique n'apportent qu'une réponse minime sur la diversité de la flore des prairies du Massif-Central. (En effet, la dynamique des plantes des prairies permanentes du Massif ne peut pas s'expliquer simplement par des règles de gestion agricole (comme la fertilisation) ou par l'influence du sol (pH, granulométrie). Certains chercheurs ont montré que la configuration du paysage environnant, l'hétérogénéité du paysage, la fragmentation de l'habitat et la connectivité, agit comme un filtre d'espèces qui définit le pool régional d'espèces et contrôle le flux de graines. Le pool régional d'espèces contient souvent une plus grande richesse en espèces dans un paysage hétérogène, en raison d'une plus grande diversité d'habitats convenables [1].

De manière générale, il est nécessaire de prendre en compte tous les indicateurs pour conclure sur les nombreux paramètres influençant la diversité végétale des prairies permanentes. Dans un contexte changeant, ces éléments doivent être identifiés dans le but de cibler les politiques visant la préservation ou la restauration de la diversité végétale et pour conseiller les acteurs agricoles sur des décisions efficaces.

Bibliographie

- [1] E. Gaujour, B. Amiaud, C. Mignolet, et S. Plantureux, « Factors and processes affecting plant biodiversity in permanent grasslands. A review », *Agron. Sustain. Dev.*, vol. 32, n° 1, p. 133-160, janv. 2012, doi: 10.1007/s13593-011-0015-3.
- [2] C. Barry et V. Polvêche, « Recensement Agricole 2020 », *Agreste*, n° 5, p. 4, déc. 2021.
- [3] S. Plantureux, E. Pottier, et P. Carrère, « La prairie permanente : nouveaux enjeux, nouvelles définitions ? », *Assoc. Fr. Pour Prod. Fourrag.*, n° 211, p. 181-193, 2012.
- [4] P. Granval, B. Muys, et D. Leconte, « Intérêt faunistique de la prairie permanente pâturée », *Assoc. Fr. Pour Prod. Fourrag.*, n° 162, p. 157-167, 2000.
- [5] A. Michaud, P. Carrère, Farrugia, et Jeangros, « Construire des typologies de prairies pour évaluer leur potentiel à rendre des services agro-environnementaux », *Assoc. Fr. Pour Prod. Fourrag.*, n° 213, p. 35-44, sept. 2013.
- [6] B. Amiaud et P. Carrère, « La multifonctionnalité de la prairie pour la fourniture de services écosystémiques », *Assoc. Fr. Pour Prod. Fourrag.*, n° 211, p. 229-238, sept. 2012.
- [7] « UMR Ecosystème Prairial (UREP) », 2022. <https://www6.clermont.inrae.fr/urep/> (consulté le 19 mai 2022).
- [8] INRAE, « INRAE INSTITUT », 2022. <https://www.inrae.fr/> (consulté le 22 juin 2022).
- [9] Sidam COPAMAC, « AEOLE », *Le SIDAM et la COPAMAC*, 2022. <https://www.sidam-massifcentral.fr/developpement/aeole/> (consulté le 7 juin 2022).
- [10] M. Pärtel, A. Helm, N. Ingerpuu, Ü. Reier, et E.-L. Tuvi, « Conservation of Northern European plant diversity: the correspondence with soil pH », *Biol. Conserv.*, vol. 120, n° 4, p. 525-531, déc. 2004, doi: 10.1016/j.biocon.2004.03.025.
- [11] B. Fontaine, « Portrait agricole Massif central », n° 18, p. 4, nov. 2019.
- [12] P. Carrère, P.-M. Le Hénaff, et N. Vény, « La diversité des prairies d'Auvergne », *Agric. En Auvergne*, p. 395-414, 2018.
- [13] DRAAF Auvergne-Rhône-Alpes, SRISET, et Sidam COPAMAC, « Atlas cartographique », *Atlas du Massif Central, caractérisation des systèmes d'exploitation du Massif central*. <https://www.sidam-massifcentral.fr/massif-central/atlas-cartographique/> (consulté le 30 avril 2022).
- [14] J.-N. Galliot *et al.*, *Typologie multifonctionnelle des prairies du Massif central*, Sidam-AEOLE. Clermont-Ferrand: Sidam, 2020.
- [15] S. Hulin, J.-N. Galliot, P. Carrère, et P.-M. Le Hénaff, « Les prairies naturelles du Massif central », *Assoc. Fr. Pour Prod. Fourrag.*, n° 239, p. 223-229, sept. 2019.

- [16] P. Carrère, S. Costaouec, Y. Michelin, et M. Streith, *Catalogue de l'exposition « Innov'Herbe, élevages et éleveurs de demain »*. Clermont-Ferrand: UCA- Bibliothèque Université Clermont Auvergne, 2019.
- [17] R. M. Hassan, R. J. Scholes, N. Ash, et Millennium Ecosystem Assessment (Program), Éd., *Ecosystems and human well-being: current state and trends: findings of the Condition and Trends Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [18] P.-M. L. Hénaff, « Les milieux naturels et leur valorisation », *Agric. En Auvergne*, p. 89-111, 2018.
- [19] V. Genevois, P.-B. Gaignard, J.-M. Morel, N. Fayet, L. Andanson, et N. Guix, « Les sols auvergnats : mieux les comprendre pour comprendre les paysages agricoles du territoire », *Agric. En Auvergne*, p. 31-59, 2018.
- [20] J. Ewald, « The calcareous riddle: Why are there so many calciphilous species in the Central European flora? », *Folia Geobot.*, vol. 38, n° 4, p. 357-366, déc. 2003, doi: 10.1007/BF02803244.
- [21] Météo France et DIR Massif Central, « Les particularités climatiques du territoire du Massif Central ». 2014.
- [22] S. R. White, E. W. Bork, et J. F. Cahill, « Direct and indirect drivers of plant diversity responses to climate and clipping across northern temperate grassland », *Ecology*, vol. 95, n° 11, p. 3093-3103, nov. 2014, doi: 10.1890/14-0144.1.
- [23] J.-Y. Humbert, J. M. Dwyer, A. Andrey, et R. Arlettaz, « Impacts of nitrogen addition on plant biodiversity in mountain grasslands depend on dose, application duration and climate: a systematic review », *Glob. Change Biol.*, vol. 22, n° 1, p. 110-120, janv. 2016, doi: 10.1111/gcb.12986.
- [24] R. Meddour, « La méthode phytosociologique sigmatiste ou Braun-Blanqueto », p. 41, janv. 2011.
- [25] P. Grosjean et G. Engels, « 7.1 Analyse en composantes principales », in *Science des données biologiques II*, Université de Mons., Charleroi, 2021. Consulté le: 16 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://wp.sciviews.org/sdd-umons2/>
- [26] C. N. R. Critchley, B. J. Chambers, J. A. Fowbert, A. Bhogal, S. C. Rose, et R. A. Sanderson, « Plant species richness, functional type and soil properties of grasslands and allied vegetation in English Environmentally Sensitive Areas », *Grass Forage Sci.*, vol. 57, n° 2, p. 82-92, 2002, doi: 10.1046/j.1365-2494.2002.00305.x.
- [27] T. Kull *et al.*, « Distribution trends of rare vascular plant species in Estonia », vol. Biodiversity and Conservation, n° 11, p. 26, 2002.

- [28] J. Hatten et Soil Microbiol., Ecology and Biochemistry, « Soil Organic Matter », *Science Direct*, 2019. <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/soil-organic-matter> (consulté le 12 mai 2022).
- [29] J.-N. Galliot, S. Hulin, P.-M. Le Hénaff, et A. Farruggia, *Typologie multifonctionnelle des prairies du Massif central Les annexes*, Sidam. Clermont-Ferrand: Sidam, 2020.
- [30] C. Duby et S. Robin, « Analyse en Composantes Principales », Département O.M.I.P., Institut National Agronomique Paris - Grignon, Paris-Grignon, Scientifique, juill. 2006.

Table des sigles

ACP : Analyses en Composantes Principales

AEOLE : Atouts Économique pour cOnstruire des systèmes d'ÉLEVages performants (projet porté par le Massif-Central)

AIC : Akaike Information Criterion (Critère d'Information d'Akaike)

AOP : Appellation d'Origine Protégée

ATOUS : Approche Territoriale de l'autOnomie fourragère et des services rendUs par les Systèmes fourragers

CARA : Centre Clermont-Auvergne-Rhône-Alpes

CEC : Capacité d'Echange Cationique

ECODIV : département ECOlogie et bioDIVERSité des milieux forestiers, prairiaux et aquatiques

GES : Gaz à Effet de Serre

GIRE : Gestion Intégrée des Ressources en Eau

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement

IRSTEA : Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

pH : potentiel Hydrogène

PME : Petite ou Moyenne Entreprise

SAU : Surface Agricole Utile

SIDAM : Service Interdépartemental pour l'Animation du Massif central

STH : Surface Toujours en Herbe

UMR : Unité Mixte de Recherche

UREP : Unité mixte de Recherche sur l'Écosystème Prairial

Glossaire

Activité biologique Humads : Indicateur de carbone soluble via la matière organique labile du sol (extrait dans de l'eau chaude).

Diagramme d'éboullis : en statistique, est une représentation graphique de la variance de chaque composant dans l'ensemble de données qui est utilisé pour déterminer le nombre de composants à conserver afin d'expliquer un pourcentage élevé de la variation des données. Il aide à choisir le nombre d'axes à conserver (espace à dimensions réduites avec perte minimale d'information).

Fabacées : (connue sous le nom de légumineuses), famille de plantes herbacées, d'arbustes, d'arbres ou de lianes, dicotylédones de l'ordre des Fabales. La famille compte environ 765 genres regroupant plus de 19 500 espèces. Elles constituent une source de protéines végétales indispensable pour l'alimentation humaine et animale.

- Prairies : Centrosema (pois), Fénugrec, Fèverole, Lotier, Luzerne, Pois, Sainfoin, Trèfles, Vesces, etc.

Indice de Braun et Blanquet (1964) : permet d'étudier la phytosociologie (sciences des groupements de végétaux : diagnose floristique, classification des associations végétales et étude de leur dynamique, de leurs relations avec les variables de l'environnement, de leur histoire, c'est-à-dire de leur évolution et de leur genèse). L'indice repose sur une échelle mixte d'abondance-dominance :

| Coefficients : | |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| r | Individus très rares et leur recouvrement est négligeable |
| + | Individus rares et recouvrement très faible |
| 1 | Individus peu ou assez abondants, mais de recouvrement faible < 1/20 de la surface |
| 2 | Individus abondants ou très abondants, recouvrant 1/20 à 1/4 de la surface |
| 3 | Nombre d'individus quelconque, recouvrant de 1/4 à 1/2 de la surface |
| 4 | Nombre d'individus quelconque, recouvrant de 1/2 à 3/4 de la surface |
| 5 | Nombre d'individus quelconque, recouvrant plus de 3/4 de la surface |

Ainsi, le nom de chacune des espèces présentes est affecté d'un coefficient qui indique, avec suffisamment de précision, son abondance relative. A partir de cette échelle, plusieurs auteurs ont établi une transformation de ces coefficients d'abondance-dominance (AD) à des valeurs quantitatives, correspondant aux recouvrements (R%) moyens, à la médiane des classes en général [24].

Indice de Van Der Maarel (1979) : il transforme les notes d'abondance-dominance (AD) de Braun-Blanquet en valeurs ordinales. L'auteur propose une échelle qui donne plus de poids à la présence de l'espèce dans la station, puisqu'elle pondère légèrement sa présence par une

échelle de 1 à 9 correspondants à sa dominance. Cela permet de rendre le coefficient semi-quantitatif d'abondance-dominance en quantitatif et de répondre aux besoins des traitements dans les analyses numériques [24].

Transformation des notes d'abondance-dominance (AD) en valeurs ordinales :

| | | | | | | | |
|------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| Braun-Blanquet Abondance/Dominance | R | + | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Van Der Maarel | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | 8 | 9 |

Matière organique du sol (connue sous le nom anglophone : Soil Organic Matter, SOM) : définie comme toutes les matières organiques présentes dans le sol qui font partie ou ont fait partie d'organismes vivants. Composante du sol constituants les résidus végétaux, microbiens et animaux à différents stades de décomposition, de cellules et de substances synthétisées par les organismes du sol. Composés organique hétérogènes dépourvue de résidus non décomposés ou partiellement décomposés. Elle a un effet sur les fonctions hydrologiques et réduit l'infiltration des nutriments. C'est un grand réservoir terrestre de carbone organique [28].

Matière organique particulière (connue sous le nom anglophone : Particulate Organic Matter, POM) : biologiquement et chimiquement active et fait partie du pool labile (facilement décomposable, après la biomasse microbienne) de la matière organique du sol. C'est une source de nourriture / énergie pour les micro-organismes, les animaux du sol, les nutriments pour la croissance des plantes. Elle améliore la stabilité des agrégats, l'infiltration d'eau et l'aération du sol.

Poacées (ou graminées) : Famille de plantes monocotylées appartenant à l'embranchement des angiospermes, de l'ordre des Poales, qui comprend environ 12 000 espèces et produisant des caryopses (fruit sec indéhiscant et uniséminé à péricarpe mince soudé à la graine). Généralement, ce sont des plantes herbacées. Les espèces domestiquées sont :

- Céréales : Blé, Riz, Maïs, Orge Et Millet, etc
- Prairies : Agrostide, Avoine, Brome, Dactyle, Fétuque, Fléole, Houlque, Molinie, Pâturin, Ray-Grass, Vulpin, etc.

R : plateforme de développement gratuite et libre qui permet de réaliser des programmations pour le traitement de données et d'analyses statistiques (R version 4.1.3 (2022-03-10)).

Rareté : L'indice de rareté (de 0 à 1) indique si le type est constitué d'espèces plutôt communes ou au contraire d'espèces plutôt rares à l'échelle du Massif central. Plus l'indice est élevé, et plus les espèces qui composent la parcelle sont rares au sein de la zone. Cette notion dépend du lieu l'étude (aire géographique ou écosystème de référence) et est liée à un type de milieu. Dans cette étude, la rareté est caractérisée à l'échelle régionale (Massif central) [29]. *Dans le cadre de l'étude, le Conservatoire botanique national du Massif central a réalisé des inventaires systématiques*

par mailles de la flore. Chaque espèce possède un indice de rareté (de 0 à 1) à l'échelle du Massif central en fonction de sa fréquence et de sa répartition. À l'échelle d'un relevé, l'indice de rareté correspond à la moyenne des indices des espèces composant le relevé. Pour finir, les indices de rareté des parcelles suivies ont été moyennés sur l'ensemble des relevés phytosociologiques de la parcelle ; ils varient de 0,18 (flore commune) à 0,76 (flore rare) sur le réseau.

Richesse spécifique : nombres d'espèces différentes présente au sein de la communauté végétale. La richesse en espèces est un dénombrement d'espèces, sans tenir compte de l'abondance biologique de l'espèce, ni de la distribution de son abondance relative. Plus le nombres d'espèces est élevée, et plus la richesse floristiques est forte [29]. *Sur l'étude, le calcul a été moyenné sur l'ensemble des relevés phytosociologiques rattachés à la parcelle. Le nombre d'espèces varie de 7 à 56 espèces dans les parcelles suivies.*

Lexique

AIC, Akaike Information Criterion : Critère d'Information d'Akaike

EOM, extracellular organic matter : matière organique extracellulaire

OM, Organic Matter : matière organique

POM, Particulate Organic Matter : matière organique particulaire

SOM, Soil Organic Matter : matière organique du sol

Table des figures et tableaux

Table des figures

| Numéro | Titre | Source |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Figure 1 | Carte représentant les 18 centres de recherches de l'INRAE (avec logo) | Personnelle d'après l'INRAE |
| Figure 2 | Carte des implantations du Centre Clermont-Auvergne- Rhône-Alpes | INRAE |
| Figure 3 | Logo UREP | INRAE |
| Figure 4 | Carte du Massif central | Personnelle |
| Figure 5 | Diagramme de la répartition des prairies du Massif central | Personnelle d'après le SIDAM |
| Figure 6 | Carte des parcelles étudiées pour la campagne terrain 2022 | Personnelle |
| Figure 7 | Présentation de la méthode de prélèvement sur les parcelles | Personnelle |
| Figure 8 | Photos du prélèvement de la carotte pour la DA (tarière racinaire) | Personnelle |
| Figure 9 | Photos des prélèvements des échantillons composites à la tarière Edelman | Personnelle |
| Figure 10 | Présentation synthétique des protocoles de traitement des échantillons de la Densité Apparente et des Composites | |
| | <u>Figure 10. a.</u> | Protocole simplifié pour la Densité Apparente |
| | <u>Figure 10. b.</u> | Protocole simplifié pour les Composites |
| Figure 11 | Schéma simplifié du programme d'analyse statistique réalisée durant ce travail | Personnelle |

| | | |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Figure 12 | Analyse en composantes principales (ACP) réalisée sur des variables édaphiques de 74 parcelles de parcours situés sur le Massif central | Personnelle |
| Figure 13 | Diagramme d'éboulis de l'ACP | Personnelle |
| Figure 14 | Résultats de la représentation graphique des trois premières dimensions de l'Analyses en Composantes Principales des données de pédologie | Personnelle |
| Figure 15 | Boîte à moustache de la richesse spécifique des prairies étudiées du Massif Central | Personnelle |
| Figure 16 | Résumés des régressions de la richesse spécifique des espèces en fonction des différents modèles proposés | Personnelle |
| Figure 17 | Boîte à moustache de la rareté des prairies étudiées du Massif Central | Personnelle |
| Figure 18 | Résumés des régressions de la rareté des espèces végétales en fonction des différents modèles proposés | Personnelle |

Table des tableaux

| Numéro | Titre | Source |
|-------------|----------------------------------------------------------------------|-------------|
| Tableau I | Descriptif des différents types de prairies dans le domaine agricole | Personnelle |
| Tableau II | Indicateurs du sol mesurés lors de la campagne terrain 2022 | Personnelle |
| Tableau III | Variables prises en compte pour l'Analyse en Composantes Principales | Personnelle |

Table des annexes et annexes

Annexe 1 : Liste des 14 départements de recherche de l'INRAE (source interne : INRAE)

Annexe 2 : Stratégies des espèces végétales (source personnelle)

Annexe 3 : Présentation des protocoles de traitement des échantillons en laboratoire (source personnelle)

Annexe 4 : Présentation base de données (source : CARRÈRE Pascal ; INRAE (rapport d'activité 2020))

Annexe 5 : Présentation des variables enregistrées pour l'étude des individus (source personnelle)

Annexe 6 : l'Analyse en Composantes principales (ACP) (source personnelle)

Annexe 7 : Script R : ACP (source personnelle)

Annexe 8 : Script R : Modèles (source personnelle)

Annexe 1 : Liste des 14 départements de recherche de l'INRAE

Source interne (INRAE)

| | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
|  | Action, transitions et territoires Christophe Soulard |  | Économie et sciences sociales Pierre Dupraz |
|  | Agroécosystèmes Philippe Hinsinger |  | Génétique animale Edwige Quillet |
|  | Alimentation humaine Lionel Bretilon |  | Mathématiques et numérique Hervé Monod |
|  | Aliments, produits biosourcés et déchets Michael O'Donohue |  | Microbiologie et chaîne alimentaire Sylvie Dequin |
|  | Biologie et amélioration des plantes Isabelle Litrico-Chiarelli |  | Physiologie animale et systèmes d'élevage Françoise Medale |
|  | Écosystèmes aquatiques, ressources en eau et risques Mohamed Naaim |  | Santé animale Muriel Vayssier-Taussat |
|  | Écologie et biodiversité Catherine Bastien |  | Santé des plantes et environnement Marie-Hélène Ogliastro |

Annexe 2 : Stratégies des espèces végétales

Source personnelle

L'écologie fonctionnelle permet de caractériser les stratégies mises en œuvre par les espèces végétales pour s'adapter aux différents habitats et pratiques. Les stratégies d'espèces traitent les caractères morphologiques, physiologiques ou phénologiques qui déterminent les performances individuelles (les traits fonctionnels). Ces stratégies d'espèces correspondent à des **réponses fonctionnelles** ou des **trajectoires d'adaptations**, en termes d'acquisition des ressources (capture ou conservation) ; ou de régénération des tissus (compétitrices ou conservatrices).

Il est distingué 2 grandes stratégies de réponse vis-à-vis de la diversité des **prairies** aux pratiques agricoles :

- Espèces à stratégie de **capture des ressources** sont caractéristiques des milieux riches (forte disponibilité en nutriments) et à des fréquences de défoliation élevée. Elles possèdent des feuilles fines (en captant efficacement la lumière), une teneur azotée élevée et des durées de vie des organes relativement faible. Par conséquent, la productivité est plus importante avec une maturité précoce, mais une faible flexibilité d'exploitation.
- Espèces à stratégies de **conservation des ressources** sont caractéristiques des milieux plus pauvres (faible disponibilité en nutriments) et à une fréquence de défoliation plus faible (*Agrostis capillaire*, *Fétuque rouge*, *Brachypode penné*). Ces espèces ont des feuilles épaisses, avec une durée de vie longue, et un recyclage interne des nutriments.

Également, il existe des stratégies de **défense** (vis-à-vis des herbivores) c'est-à-dire des stratégies d'évitements. Elles se caractérisent par des organes prostrés près du sol (rampants), et le développement de mécanismes physiques (pilosité, épines, rigidité des tissus) ou chimiques (amertume, toxicité) permettant de réduire l'attractivité pour les animaux de pâture. Les mécanismes de **tolérance** ou d'évitement se composent de bourgeons proches du sol et des durées de vie des feuilles courtes. Par exemple, cela leur permet d'émettre rapidement de nouvelles feuilles après une pâture [16].

Les stratégies des espèces peuvent expliquer la flexibilité des prairies des exploitations agricoles.

Annexe 3 : Tableaux des protocoles de traitement des échantillons de densité apparente et des composites

Source personnelle

Traitement des échantillons de DA

- 1. Séchage à l'air** (≈ 15 jours) : les 178 échantillons de DA sont émiettés grossièrement en barquette puis laissé sécher environ 15 jours à l'air libre.
- 2. Pesée de l'échantillon sec.**
- 3. Tamisage à 2 mm** : les échantillons secs sont tamisés à 2 mm. Obtention de 2 fractions :
 - La Terre Fine avec des débris racinaires nommée TF
 - Le Refus Tamis
- 4. Pesée des deux fractions** (obtention d'une première DA)
- 5. Lavage** : le refus tamis est lavé puis on procède à une séparation des racines des cailloux.
- 6. Récupération du sol** : le sol récupéré lors du lavage est ajouté à la partie terre fine
- 7. Séchage et pesée des deux fractions lavées** : la partie racinaire et la partie cailloux du refus sont séchés (48h à 30°C) et pesés.
- 8. Tri racinaire supplémentaire sur la terre fine** : l'échantillon de terre fine peut subir si nécessaire et le temps le permet, un tri racinaire supplémentaire permettant une correction de la DA.

Traitement des échantillons **Composites**

1. **Séchage à l'air** : les 176 échantillons composites (86 par profondeur) sont émiettés grossièrement en barquette puis laissé sécher environ 15/21 jours à l'air libre
2. **Homogénéisation et Quartage** : l'échantillon est placé dans un bac pour cette étape. Le sol est émietté à la main (jusqu'à ne plus voir de grosses particules) et à l'aide d'un marteau. Par la suite, l'échantillon est ensuite étalé dans tout le bac, il est divisé en quatre. Les quarts opposés sont regroupées. Cette tâche est réalisée plusieurs fois [sol étalé, quarté, regroupé, étalé, ...] *5.
3. **Création de 3 sous échantillons pour** :
 - Les **analyses physico-chimiques de base (ρ - χ)**,
 - Les **analyses de POM et SOM** (OM, organic matter*)
 - Les **analyses Humads** (EOM, extracellular organic matter*)

Le sol est divisé en trois sous échantillons, environ 200 g sont pesés pour l'échantillon (ρ - χ), \approx 600 g pour l'échantillon (OM) et \approx 200 g pour l'échantillon (HumadsEOM).

| | |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Echantillons ρ-χ</p> | <p>Tamissage à 2 mm : l'échantillons subit un tamissage à 2 mm, on obtient 2 fractions. Une fraction de terre fine avec des débris racinaires et le refus tamis.</p> <p>Tri racinaire : Le sous échantillon ρ-χ est débarrassé des racines fines (<2mm) afin que le matériel végétal n'intervienne pas dans les dosages en carbone et azote.</p> <p>Pour cela, les sous-échantillons sont étalés sur un support blanc, de sorte à mettre en évidence les débris racinaires qui ont pu être écartés à l'aide de pinces de précisions. Une méthode complémentaire est utilisée afin d'accélérer le processus : des films plastiques chargés d'électricité statique (pochettes transparentes frottées contre un lainage) sont passés délicatement au-dessus des échantillons : les racines, plus légères que le sol, se soulèvent et viennent s'y coller alors que les agrégats restent à terre.</p> |
| <p>Echantillons OM</p> | <p>Stockage avant analyse : les échantillons secs et pesés sont stockés au sec avant analyses</p> |
| <p>Echantillons EOM</p> | |

Annexe 4 : Présentation de la base de données

Source : CARRÈRE Pascal, INRAE (rapport d'activité 2020)

Tout d'abord, **AEOLE** est un projet de recherche-développement territorial collaboratif construit entre la recherche, le conseil agricole, les représentations des filières et l'enseignement. Il propose des solutions aux filières pour **valoriser la diversité des prairies du Massif central** et en faire un atout économique pour les exploitations herbagères. Une typologie multifonctionnelle des prairies a été réalisée notamment grâce à l'expertise « prairies » des équipes INRAE.

Le jeu de données initial est vaste et complexe. Il résulte du projet AEOLE où il a été conçu la typologie multifonctionnelle des prairies du Massif central. Elle décrit les différents types de couvertures prairiales rencontrées dans le secteur. On recense 68 types de prairies différentes dans ce territoire, dont une quarantaine ont été décrites et référencées finement sur le plan botanique et agronomique. Ces différences entre prairies ne sont pas sans conséquences pour les éleveurs, car elles ont des capacités de production et de réaction face aux aléas variables. Les connaître est important pour mieux les gérer et mener son exploitation. Un outil de diagnostic de l'exploitation a été élaboré (DIAM), se basant sur la description du parcellaire et les besoins du troupeau. Un bilan du système fourrager est ainsi réalisé à l'échelle de l'exploitation, ce qui permet d'évaluer les ressources fourragères disponibles et le niveau d'autonomie. Un bilan similaire est fait sous l'angle des services écologiques, environnementaux, ainsi que pour la qualité des produits. Ceci permet ainsi d'analyser l'équilibre entre fonctionnement du système fourrager et services rendus par les prairies, et d'amorcer un dialogue entre conseiller et éleveur sur la cohérence de son système en regard de ses objectifs.

La fiche suivante présente comment s'articule la base de données avec les grands domaines expérimentés. Nous utilisons les données de la base sur les **analyses de sol**, les **relevés phytosociologiques**, les **enquêtes parcelles**, et les informations générales comme la **température**, la **pluviométrie**. *BDD= Base de Données*

NB : Durant ce stage, il est ré-analysé et ré-exploité les données existantes à des fins différentes.

Organisation des bases de données Prairies AOP, ATOUS & AEOLE

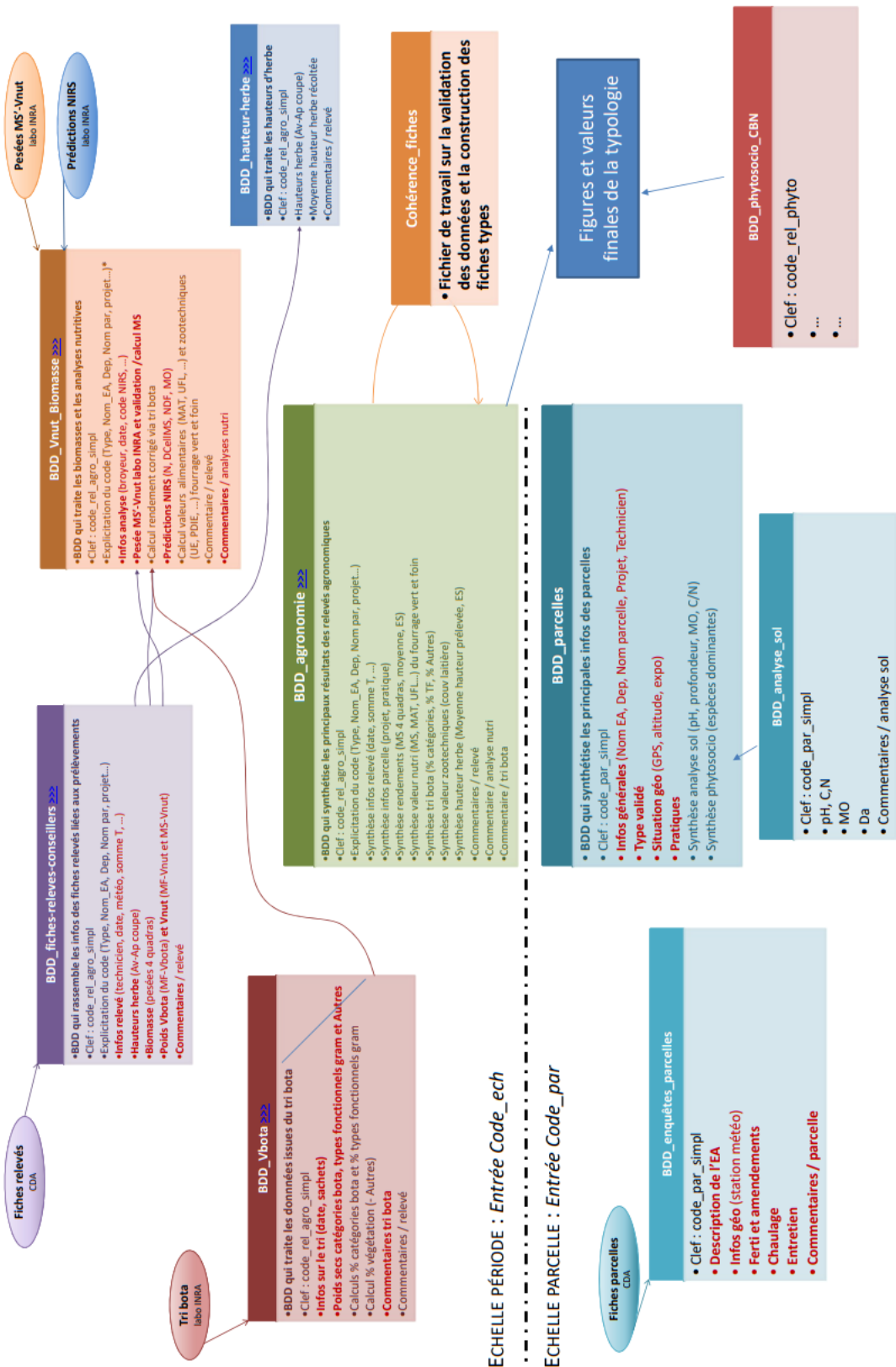


Figure A4.1. : Fiche de l'organisation des bases de données Prairies AOP, ATOUS & AEOLE

Source Pascal CARRÈRE

Annexe 5 : Présentation des variables enregistrées pour l'étude des individus

Source personnelle

Pour l'étude statistique, nous avons dû réaliser un choix de variables à importer sur R. Ainsi, il est trié 44 variables pour étudier les 143 individus (=parcelles).

Le choix s'explique par les variables nécessaires (ex : nom, années, localisation) et pertinentes (sol, climatique, diversité, etc.) à l'étude de ce stage.

| | | | |
|----|-----------------------------------|----|-------------------------------|
| 1 | Nom parcelles | 23 | Graminée groupe E |
| 2 | Année | 24 | Graminée groupe D |
| 3 | Altitude parcelle | 25 | pH |
| 4 | Pente | 26 | Carbone |
| 5 | Orientation | 27 | Azote |
| 6 | Température annuelle moyenne | 28 | Carbone*Azote |
| 7 | Précipitations annuelles moyennes | 29 | Densité Apparente |
| 8 | Latitude | 30 | Matière Organique |
| 9 | Longitude | 31 | Stock Carbone |
| 10 | Diversité fonctionnelle | 32 | Stock Matière organique |
| 11 | Azote organique | 33 | Phosphore (taux) |
| 12 | Azote minérale | 34 | Potassium (taux) |
| 13 | Type d'utilisation | 35 | Magnésium (taux) |
| 14 | Biomasse maximale | 36 | Calcium (taux) |
| 15 | Production | 37 | Capacité d'échange Cationique |
| 16 | Qualité fourragère | 38 | Sodium |
| 17 | Rareté | 39 | Teneur en sable du sol |
| 18 | Richesse | 40 | Teneur en limons du sol |
| 19 | Graminée groupe A | 41 | Teneur en argile du sol |
| 20 | Graminée groupe B | 42 | COS orientation |
| 21 | Graminée groupe bb | 43 | SIN orientation |
| 22 | Graminée groupe C | 44 | Azote total |

```
[1] "Parc"           "An"             "Altitude"      "Pente"          "Orientation"
[6] "Temp_MoyAn"    "Precip_MoyAn"  "LAT"           "LONG"          "DiversiteFonct"
[11] "N_organique"   "N_min"         "Use.type"      "BM_max"        "Prod"
[16] "Qualite_fourrage" "Rarity"        "Richness"     "Gram_A_P2_moy" "Gram_B_P2_moy"
[21] "Gram_bb_P2_moy" "Gram_C_P2_moy" "Gram_D_P2_moy" "Gram_E_P2_moy" "pH"
[26] "C"             "N"             "C.N"          "DA"            "MO"
[31] "Stock_C"       "Stock_MO"      "P205"         "K20"           "MgO"
[36] "CaO"           "CEC"           "Na2O"         "Sables_tot"   "Limons_tot"
[41] "A"             "COS_Orientation" "SIN_Orientation" "NTot"
```

Figure 5A.1.: Capture d'écran des variables disponibles dans R (dans le cadre du rapport)

Source personnelle

Annexe 6 : l'Analyse en Composantes principales (ACP)

Source personnelle

En statistique, l'Analyse en Composantes principales (**ACP**) appartient au groupe des méthodes descriptives multidimensionnelles (ou méthodes factorielles). Ces dernières sont **descriptives** (pas probabiliste). Néanmoins, elles dépendent d'un **modèle géométrique**. L'ACP propose, à partir d'un tableau rectangulaire de données comportant les valeurs de p variables quantitatives pour n unités (nommées aussi individus), des représentations géométriques de ces unités et de ces variables. Ces données peuvent être issues d'une procédure d'échantillonnage ou de l'observation d'une population complète. Dans un espace réduit, l'analyse représente au mieux des observations issues d'un espace plus important en nombres de dimensions. Les représentations permettent d'analyser, d'étudier les structures de liaisons linéaires et de proposer ou non une structure sur cet ensemble d'unités. Également, l'ACP simplifie, réduit, et concentre les informations en les visualisant et les décrivant. Par exemple, il est possible de chercher des groupes dans l'ensemble des n unités (celles qui se ressemblent, celles qui se distinguent des autres, etc.). Pour les p variables, il peut être cherché les corrélations, celles qui, au contraire ne sont pas corrélées aux autres, etc.

Effectivement, des **relations linéaires** sont suspectées entre les variables. Par conséquent, cela conduit à une répartition des individus (le nuage de points) qui forme une **structure à interpréter**. En ajout, la représentation sous forme d'un nuage de points s'appelle une **carte**. La réduction des dimensions se fait avec une perte minimale d'information au sens de la variance des données[30],[25].

NB : Dans ce rapport, l'ACP sert à mieux connaître les données édaphiques, à détecter des valeurs suspectes et enfin de sélectionner les variables travaillées. Les graphiques des ACP permettront d'appuyer nos propos.

Annexe 7 : Script R : ACP

Source personnelle

Ce script fourni permet d'aboutir à l'Analyses Composantes Principales, et les différents graphiques (ACP et graphiques des différentes dimensions (D1 et D2, D1 et D3, D2 et D3)).

Utilisation de R Studio (R version 4.1.3)

```
##ACP SOL
#Choix des variables quantitatives d'intérêts
datacpsol<-data[,c(1,25,26,27,29,33,34,35,36,37,38,39,40,41)]

datacpsol<-na.omit(datacpsol) #suppression des ind avec valeurs manquantes

colnames(datacpsol)
[1] "Parc"      "pH"        "C"         "N"         "DA"        "P205"      "K20"       "MgO"
[9] "CaO"      "CEC"       "Na2O"      "Sables_tot" "Limons_tot" "A"

dim(datacpsol) #dimension ind x variables

ACPsol<-PCA(datacpsol[,c(2:14)], graph=TRUE)

summary(ACPsol)#résumé par variable / par dimension
ACPsol$eig # somme pourcentage variance par dimension
fviz_eig(ACPsol, addlabels = TRUE, ylim = c(0, 50)) #graphique somme variance
ACPsol$ind$coord # Scores de chaque observation sur les dimensions retenues

paran(datacpsol[,c(2:14)], iterations=5000, centile=95)

fit <- principal(datacpsol[,c(2:14)],nfactors=3, rotate="varimax")#3 dimensions par paran
fit$Vaccounted

datacpsol$pc1<-fit$scores[,1]
datacpsol$pc2<-fit$scores[,2]
datacpsol$pc3<-fit$scores[,3]

PCAloadings<-data.frame(fit$loadings[,1:3])

###Représentation graphique ACPsol 3 première dimension####
###Possibilité de regarder sur les 3 premières dimensions (75% de la variance)

##dim 1 et 2

p1<-ggplot(datacpsol,aes(x=pc1,y=pc2))+
  theme_classic()+
  stat_density_2d(aes(fill=..level..), geom = "polygon")+
  geom_point(size = 1, alpha = 1, color = "grey85")+
  geom_segment(data = PCAloadings, aes(x = 0, y = 0, xend = (RC1*3),
                                     yend = (RC2*3)), arrow = arrow(length = unit(1/2, "picas")),color = "black")+
  annotate("text", x = (PCAloadings$RC1*3), y = (PCAloadings$RC2*3),label = rownames(PCAloadings),size=7) +
  scale_fill_gradient2(low = "#3B9AB2", high = "#F21A00", mid = "#FAEFD1", midpoint = 0.01)

p1 <- p1+xlab("PC 1 (40.7%)") + ylab("PC 2 (21.9%)") + theme(panel.grid = element_blank(),panel.border = element_blank())

p1<-p1+ theme(legend.position="none")+theme(axis.text=element_text(size=14),
                                           axis.title.x = element_text(size=14),
                                           axis.title.y = element_text(size=14))

p1

##dim 1 et 3

p2<-ggplot(datacpsol,aes(x=pc1,y=pc3))+
  theme_classic()+
  stat_density_2d(aes(fill=..level..), geom = "polygon")+
  geom_point(size = 1, alpha = 1, color = "grey85")+
  geom_segment(data = PCAloadings, aes(x = 0, y = 0, xend = (RC1*3),
                                     yend = (RC3*3)), arrow = arrow(length = unit(1/2, "picas")),color = "black")+
  annotate("text", x = (PCAloadings$RC1*3), y = (PCAloadings$RC3*3),label = rownames(PCAloadings),size=7) +
  scale_fill_gradient2(low = "#3B9AB2", high = "#F21A00", mid = "#FAEFD1", midpoint = 0.01)

p2 <- p2+xlab("PC 1 (40.7%)") + ylab("PC 3 (13.25%)") + theme(panel.grid = element_blank(),panel.border = element_blank())

p2<-p2+ theme(legend.position="none")+theme(axis.text=element_text(size=14),
                                           axis.title.x = element_text(size=14),
                                           axis.title.y = element_text(size=14))

p2

##dim 2 et 3

p3<-ggplot(datacpsol,aes(x=pc2,y=pc3))+
  theme_classic()+
  stat_density_2d(aes(fill=..level..), geom = "polygon")+
  geom_point(size = 1, alpha = 1, color = "grey85")+
  geom_segment(data = PCAloadings, aes(x = 0, y = 0, xend = (RC2*3),
                                     yend = (RC3*3)), arrow = arrow(length = unit(1/2, "picas")),color = "black")+
  annotate("text", x = (PCAloadings$RC2*3), y = (PCAloadings$RC3*3),label = rownames(PCAloadings),size=7) +
  scale_fill_gradient2(low = "#3B9AB2", high = "#F21A00", mid = "#FAEFD1", midpoint = 0.01)

p3 <- p3+xlab("PC 2 (20.9%)") + ylab("PC 3 (13.25%)") + theme(panel.grid = element_blank(),panel.border = element_blank())

p3<-p3+ theme(legend.position="none")+theme(axis.text=element_text(size=14),
                                           axis.title.x = element_text(size=14),
                                           axis.title.y = element_text(size=14))

p3
```

Figure 7A.1.: Capture d'écran du script R pour l'ACP

Source personnelle

Annexe 8 : Script R : Modèles

Source personnelle

Ces scripts fournis permettent d'avoir des graphiques et des données et d'analyser les différents modèles formulés dans l'état de l'art. La capture d'écran présente un exemple de script pour la richesse spécifique en fonction du sol, du climat et de l'usage (script similaire pour la rareté). *Utilisation de R Studio (R version 4.1.3)*

```
## On utilise de jdd data centré réduit au préalable

colnames(data)

# [1] "Parc"           "An"           "Altitude"    "Pente"        "Orientation"  "Temp_MoyAn"   "Precip_MoyAn" "LAT"
# [9] "LONG"          "DiversiteFonct" "N_orga"       "N_min"        "Use.type"     "BM_max"       "Prod"         "Qualité.fourrage"
# [17] "Rarity"        "Richness"      "Gram_A_P2_moy" "Gram_B_P2_moy" "Gram_bb_P2_moy" "Gram_C_P2_moy" "Gram_D_P2_moy" "Gram_E_P2_moy"
# [25] "pH"           "C"            "N"           "C.N"         "DA"          "M0"          "Stock_C"      "Stock_M0"
# [33] "P205"         "K20"          "Mg0"         "Ca0"         "CEC"         "Na20"       "Sables_tot"   "Lemons_tot"
# [41] "A"           "COS_Orientation" "SIN_Orientation" "NTot"

dim(data)
# [1] 143 44

#1.Richesse spécifique
datamodel<-data[,c(2,39,25,4,42,43,6,7,31,13,44,18)]
datamodel <- na.omit(datamodel)
dim(datamodel)

#Model Pure Sol
Mod0 <- lm(Richness ~ Pente + SIN_Orientation + COS_Orientation+
           pH + I(pH^2) + Sables_tot + Stock_C
           , data = datamodel, na.action = na.fail)

hist(residuals(Mod0))##check for distribution of residuals
plot(predict(Mod0), residuals(Mod0))
plot(predict(Mod0), datamodel$SR)##test model fit
R0<-r.squaredGLM(Mod0)
R0

stepAIC(Mod0)

Mod0best<-lm(formula = Richness ~ Pente + pH + Stock_C, data = datamodel,
             na.action = na.fail)

summary(Mod0best)

#Model sol climat
Mod1 <- lm(Richness ~ Pente + SIN_Orientation + COS_Orientation+
           pH + I(pH^2) + Sables_tot +Stock_C +
           Temp_MoyAn + I(Temp_MoyAn^2) + Precip_MoyAn + I(Precip_MoyAn^2)
           , data = datamodel, na.action = na.fail)

hist(residuals(Mod1))##check for distribution of residuals
plot(predict(Mod1), residuals(Mod1))
plot(predict(Mod1), datamodel$SR)##test model fit
R1<-r.squaredGLM(Mod1)
R1

stepAIC(Mod1)

Mod1best<-lm(formula = Richness ~ Pente + SIN_Orientation + Stock_C + Temp_MoyAn + I(Temp_MoyAn^2) +
             I(Precip_MoyAn^2), data = datamodel, na.action = na.fail)

summary(Mod1best)

#Model Climat sol usage
Mod2 <- lm(Richness ~ Pente + SIN_Orientation + COS_Orientation+
           pH + I(pH^2) + Sables_tot +Stock_C +
           Temp_MoyAn + I(Temp_MoyAn^2) + Precip_MoyAn + I(Precip_MoyAn^2)+
           NTot + I(NTot^2)+ Use.type
           , data = datamodel, na.action = na.fail)

stepAIC(Mod2)

Mod2best<-lm(formula = Richness ~ Pente + SIN_Orientation + I(pH^2) + Stock_C + I(Temp_MoyAn^2) +
             Precip_MoyAn + I(Precip_MoyAn^2) + NTot + I(NTot^2) + Use.type, data = datamodel, na.action = na.fail)

summary(Mod2best)

#Comparaison de model
AIC(Mod1best)

AIC(Mod2best)

AIC(Mod0best)
```

Figure 8A.1.: Capture d'écran du script R pour étudier les modèles

Source personnelle