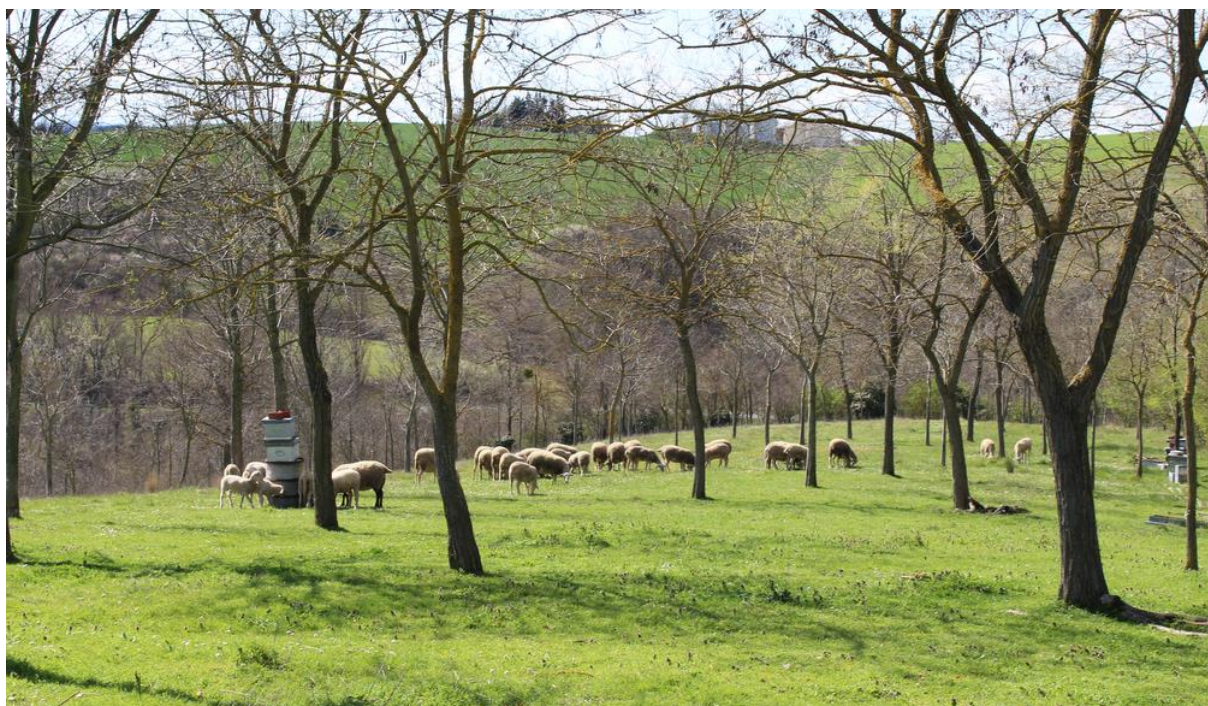




Les prairies en agroforesterie intra-parcellaire : quelles opportunités pour la production fourragère ?

Etude temporelle des rendements fourragers, de la composition floristique et des conditions microclimatiques

Rapport de stage en entreprise
Présenté par Arthur Rocher



Master : Sciences et Techniques
Mention : Sciences Appliquées à la Montagne
Spécialité : Equipement Protection et Gestion des Milieux de Montagne – M2
Septembre 2017



Les prairies en agroforesterie intra-parcellaire : quelles opportunités pour la production
fourragère ?
*Etude temporelle des rendements fourragers, de la composition floristique et des conditions
microclimatiques*
Stage Master 2 – Equipement Protection et Gestion des Milieux de Montagne

Présenté par : Rocher Arthur
Responsable Poulenard Jérôme (Université Savoie Mont Blanc)
universitaire :
Structure d'accueil : AGROOF
Tuteur de stage : Béral Camille
Année : 2017
Thématiques : Agroforesterie, botanique, production fourragère, microclimat, agro-écologie

Résumé

L'agroforesterie est un vaste ensemble de pratiques ayant évolué avec l'ensemble des pratiques agricoles : des forêts cultivées à l'agroforesterie intra-parcellaire. Aujourd'hui à l'ère de l'agroécologie et du changement climatique, l'agroforesterie interroge les agriculteurs mais aussi les acteurs publics. L'objectif de ce rapport était de contribuer à l'étude d'un cas particulier d'agroforesterie, les prairies agroforestières intra-parcellaires, dans le cadre du programme PARASOL. Cette étude s'est focalisée sur l'opportunité de ses systèmes pour la production fourragère, en se centrant sur les premières périodes de l'année (500°C-jour et 1100-1200°C-jour). Quatre sites furent étudiés : deux dans l'Aude et deux dans le massif Central. Le protocole expérimental est basé sur le suivi de mise en exclot regroupant différentes modalités d'éloignement au tronc de l'arbre.

Les résultats sur la caractérisation des conditions microclimatiques suivent ceux de la bibliographie : sous les arbres l'air est plus humide et les extrêmes de températures tendent à être tamponnés. Malgré cela une baisse plus ou moins généralisée des rendements tends à être) est observée. Cette baisse semble être due en partie à une compétition pour la lumière mais aussi à la compétition racinaire. En absence d'une caractérisation plus fine des paramètres environnementaux (facteurs biotiques et abiotiques) il paraît difficile de détailler plus finement les facteurs responsables des baisses de rendement ou au contraire des absences de différences de production avec les zones témoins. Aucune différence forte en teneur de matière sèche n'a été mise en avant. Les fourrages semblent donc aussi verts en agroforesterie que dans les zones témoins. Les résultats sur la composition floristique semblent être expliqués en grande partie par des conditions locales. Des pistes d'explication ont pu être avancées sur chaque site mais aucune grande logique générale n'a pu être (mise avant) dégagée.

Finalement seule l'étude des caractères mesurés répétés dans le temps et l'espace, comme déjà appliqué dans le programme PARASOL, pourra permettre d'identifier des grandes logiques ou à défaut d'avoir une vision plus fine des différents cas de figure. De plus les autres champs d'étude couverts par le programme PARASOL permettront de déterminer quels sont les arbitrages ou les modalités de gestion adéquates pour optimiser la productivité du système herbagé (productivité fourragère, performance zootechnique, intégration au système fourrager) et sylvicole.

Remerciements

Mes premiers remerciements vont à l'équipe d'Agroof. A Daniele Ori pour toutes les connaissances qu'il a pu me transmettre entre deux coups de fil et deux formations, à Nicolas Girardin pour avoir accepté de refaire le monde autour d'un café, à Helene Le Gallic pour son sourire quotidien et nos discussions le temps de la pause de midi, à Fabien Liagre pour avoir pris le temps de s'intéresser régulièrement à mon travail, à Ambroise Martin-Chave pour m'avoir remis dans le droit chemin lors de mes pérégrinations statisticiennes et à Sébastien Dulieu pour gérer efficacement l'aspect financier de mes déplacements et pour sa bonne humeur de tous les jours.

Je remercie évidemment Jérémy Dufau pour nos échanges sur nos stages respectifs. Sa patience face aux tableurs Excel récalcitrants a été pour moi une source d'admiration. Je salue aussi Hugo Lasselin pour son sens de l'humour et son pragmatisme à toutes épreuves. Notre duo de choc a su s'adapter aux aléas rencontrés lors des quelques phases de terrain que nous avons partagées.

Je tenais aussi à remercier Jérôme Poulenard d'avoir répondu à mes questions en statistiques et en pédologie.

Je souhaite aussi adresser un grand merci aux agriculteurs (Julie et Timoléo Resnaud, Wilfried Baudeuf) et responsables d'exploitations (Babette, Jérémy Pastourel, Denis et Dominique Roux) pour m'avoir accueilli et pour avoir accepté de travailler dans ce projet. Mention spéciale à toute la famille De Ridder (Katerine, Oliver, Gert, Live, Arthur et Hugo) pour m'avoir reçu à de nombreuses reprises, pour tous les repas partagés et pour leur sens de l'accueil légendaire exemplaire.

Je remercie aussi Veronique Deiss de l'INRA de Clermont Ferrand pour m'avoir formé au protocole PARASOL sur le suivi du comportement animal.

Bien que cela ne soit pas habituel je remercie aussi Guillaume Sabourin et Mathias Thierry, les anciens stagiaires, pour le sérieux de leur travail qui m'a permis de me lancer dans la bibliographie guidé par de solides repères.

Je remercie aussi les programmeurs et animateurs de France Inter et France Culture ainsi que Gari Greu, Bob Marley, Vanupié, les groupes Mountain Men, Faut Qu'ça Guinche et Dub Inc pour m'avoir tenu compagnie lors des 7 025,4 km parcourus lors de ce stage. Sans votre travail de création et vos bonnes vibrations les trajets auraient été (très / trop) longs.

Comme on garde toujours le meilleur pour la fin, un grand merci à Camille Béral pour : sa patience à toutes épreuves, avoir pris le temps de relire mon rapport et les différents documents que j'ai pu produire, m'avoir aidé dans la mise en place des exclsots, pour avoir répondu à mes nombreuses questions et pour la bonne ambiance de travail.

*Auprès de mon arbre,
Je vivais heureux
J'aurais jamais dû m'éloigner d'mon arbre
Auprès de mon arbre,
Je vivais heureux
J'aurais jamais dû le quitter des yeux*

George Brassens

Sommaire

Remerciements	
Introduction : les prairies permanentes agroforestières, une solution potentielle au changement climatique ?	1
Partie A : Agroforesterie : définition, état des lieux et perspectives de recherche.....	3
I) L'agroforesterie : une définition pour une diversité de système.....	3
II) Historique et perspectives de développement	4
III) AGROOF, une SCOP spécialisée en agroforesterie	5
2.1) Objectifs d'AGROOF	5
2.2) Le programme PARASOL et ARBELE	6
Partie B : De la diversité des prairies permanentes au fonctionnement des prairies agroforestières : synthèse bibliographique	8
I) Définition du sujet.....	8
II) Les prairies permanentes : une diversité d'écosystèmes anthropiques aux fonctionnalités multiples	8
2.1) L'utilité et la place des prairies permanentes	8
2.2) Evaluation du potentiel agronomique des prairies.....	9
2.2.1) Pour une étude des prairies centrée sur la végétation : l'approche directe	10
2.2.2) Ce que les bergers ont à nous apprendre sur la notion de ressource pastorale ...	11
2.3) Particularité du pâturage	12
Conclusion et transition : de la prairie à l'agroforesterie.....	13
III) L'arbre agroforestier et les herbacées : une somme d'interactions complexes.....	14
3.1) Modification des conditions climatiques	14
3.2) Relations interspécifiques.....	15
3.3) Réponse générale du couvert herbacée au cumul des différents effets énoncés.....	16
IV) Retours sur la problématique et émissions des hypothèses d'études	17
Partie C : Méthodes et résultats de l'étude	19
I) Matériel et Méthodes	19
1.1) Présentation des sites étudiés.....	19
1.2) Mesures réalisées sur la parcelle.....	20
1.2.1) Effet de l'arbre sur la composition floristique et les rendements en matières	20
1.2.2) Caractérisation de l'effet de l'arbre sur les conditions microclimatiques.....	23
1.3) Analyses des données	23
1.3.1) Effet de l'arbre sur les rendements	23
1.3.2) Effet de l'arbre sur la composition floristique	24
1.3.3) Caractérisation du microclimat	26
II) Résultats.....	27

2.1) Effet de l'arbre sur les rendements fourragers.....	27
2.1.1) Résultats des mesures de terrain	27
2.1.2) Extrapolation à l'échelle de la parcelle	30
2.2) Effet de l'arbre sur la botanique des prairies	31
2.2.1) Effet sur la composition botanique	31
2.2.2) Traduction de ces effets sur la composition fonctionnelle.....	37
2.3) Caractérisation des conditions microclimatiques	39
2.3.1) Interception de lumière par la canopée	39
2.3.2) Caractérisation des températures et de l'humidité en fonction de la distance à l'arbre	40
III) Discussions des résultats	46
3.1) En quelles mesures l'agroforesterie entraîne une baisse de rendements herbagers et quelles en sont les origines possibles ?	46
3.2) Discussion de la méthode	50
Conclusion – retour sur les résultats et ouverture sur la complexité des systèmes agroforestiers	53
Bibliographie	55
Annexes	61
Annexe 1 : Présentation des modalités étudiées	61
Annexe 2 : Résultats des analyses statistiques sur les rendements.....	62
Annexe 3 : Graphiques des variables des Analyses en Composante Principale sur les recouvrements des espèces	63
Annexe 4 : Résultats des analyses des indices de Dufrene – Legendre.....	65

Introduction : les prairies permanentes agroforestières, une solution potentielle au changement climatique ?

Aujourd'hui, le changement climatique est amorcé. Le GIEC [GIEC, 2007 in Moreau et al., 2008] a d'ores et déjà constaté une augmentation des températures moyennes terrestres de 0,74°C depuis le XIXème siècle ainsi qu'une augmentation du taux CO₂ dans l'atmosphère de 280 à 360 ppm depuis la fin de l'ère préindustrielle. A l'échelle du territoire français, 20,9% des émissions des gaz à effet de serre sont d'origine agricole. Malgré tout, ce chiffre est en baisse de 7,6 % sur la période 1990 – 2011, signe de la réduction de la fertilisation azotée, des effectifs du cheptel bovin et de la consommation des énergies fossiles [DGEC, 2013].

Dans les zones tempérées et méditerranéennes, le changement climatique a pour conséquence principale d'augmenter la fréquence d'apparition des sécheresses et des inondations [Circle 2, 2013]. Malgré tout, les modèles prévoient que les évolutions climatiques ne suivront très probablement pas des logiques linéaires, ce qui rend plus difficile la mise en place de stratégies d'adaptation [Moreau et al., 2008].

La population mondiale est consciente des enjeux qui se dessinent pour demain. Elle dresse en effet le changement climatique en haut de ses principales préoccupations [Le Monde & AFP, 2010]. Une des preuves de cette prise de conscience collective est la signature de l'accord de Paris qui s'axe en partie sur la lutte contre la faim [FCCC, 2015]. Ce phénomène concerne encore de 26,8 % à 50% de la population sub-saharienne [FAO et al., 2012] et risque de s'aggraver à la vue des baisses de productions des denrées alimentaires liées au réchauffement climatique, même si cette baisse annoncée est à moduler selon les espèces et les régions (un gain de productivité pourrait advenir dans les hautes latitudes) [Porter & Xie, 2014].

Au vu de ces changements, et des crises de l'élevage français (épidémies, effet de la concurrence), il semble important de s'interroger sur son adaptabilité et sur les places actuelles et futures des prairies permanentes dans ces systèmes. Ces espaces sont définis officiellement, c'est-à-dire au regard de la Politique Agricole Commune (PAC), comme étant des prairies dont la flore s'est installée spontanément (pas de retournement ou d'ensemencement) depuis au moins cinq années [Min. Agri, 2015]. Les prairies permanentes recouvraient un tiers de la Surface Agricole Utile (SAU) nationale en 2007 [IDELE, 2007 in Pottier et al., 2012]. Ce chiffre est en baisse dû aux effets conjoints des changements de structures des exploitations et d'un manque de références sur les itinéraires techniques à adopter sur ce type de parcelle [Pottier et al., 2012]. Cette réduction est considérée comme regrettable dans la mesure où les prairies permanentes permettent d'assurer un certain nombre de services agro-écosystémiques tels que le maintien de la biodiversité, l'excellence paysagère, le stockage du carbone, la lutte contre l'érosion des sols, la préservation de la qualité des eaux mais aussi la production d'un fourrage pouvant être de qualité et/ou de quantité [Peyraud et al., 2012 ; Duru et al., 1998].

Le changement climatique risque d'impacter fortement l'exploitation des prairies permanente déjà en baisse de vitesse. D'après des études menées sur les Alpes françaises (territoire laboratoire du fait de son extrême sensibilité au changement climatique) il apparaît que le changement climatique tend à causer une baisse des rendements fourragers des prairies (naturelles, temporaires, pâturées), à favoriser les ravageurs des cultures et le développement de nouvelles maladies [Sérès, 2010]. Une autre étude conduite par Moreau et al. en 2008 à l'échelle de la France, s'appuyant sur des modèles météorologiques, prédit pour un futur proche une augmentation générale du nombre de fauches possibles. Ce modèle prévoit également, en fin de siècle, un effondrement des rendements printaniers et automnaux conduisant à de profonds changements de systèmes fourragers qui s'appuieront davantage sur une production herbagère hivernale et un affouragement en bâtiment ou en champs pour la période estivale.

Cette évolution non linéaire des rendements (augmentation puis diminution) risque d'être un frein réel pour l'adaptation des systèmes fourragers aux changements sur le long terme (horizon 2070).

Pour répondre à ces enjeux, les éleveurs, les scientifiques et les pouvoirs publics tendent à réfléchir conjointement à de nouvelles solutions pour maintenir une production alimentaire suffisante en quantité et en qualité. Deux pistes complémentaires sont aujourd'hui étudiées. La première est de sécuriser les systèmes au point de vue économique via une meilleure valorisation des produits (AOP, IGP, Label Rouge, etc.). La seconde s'intéresse aux changements des systèmes de production. Dans ce cadre, les acteurs soulignent de plus en plus l'intérêt du pâturage dans les systèmes d'élevage [Couturier et al., 2016] et d'un travail de recherche pour une meilleure performance générale des systèmes fourragers (productivité, qualité, autonomie). Ce gain de performance peut se faire dans le cadre d'un mouvement d'intensification écologique qui permet de combiner les intérêts écologiques (performances écosystémiques) et les intérêts agronomiques [Loucougaray et al., 2013].

Aujourd'hui, de plus en plus d'agriculteurs et de scientifiques s'interrogent sur l'agroforesterie. Face à la stagnation des rendements certains optent pour le développement de systèmes mixtes, s'appuyant sur les interactions interspécifiques retrouvées dans les écosystèmes non anthropisés [Circle 2, 2013] qui sont bien souvent la clef des propriétés émergentes. L'agroforesterie, en permettant de diversifier les revenus à l'échelle de l'exploitation et de modifier les conditions micro-pédoclimatiques de la parcelle, peut-être une piste d'étude intéressante pour le développement des prairies permanentes.

Les problématiques structurant ce rapport sont donc les suivantes :

- *Comment se caractérise l'effet de l'arbre sur le microclimat de la parcelle (température et humidité) ?*
- *Comment se traduisent conjointement les effets biotiques et abiotiques de l'arbre au cours du temps sur la production fourragère (composition floristique et production fourragère) ?*

La structure du rapport est la suivante. Une première partie introductive pose une définition de l'agroforesterie en contextualisant l'émergence de cette notion / pratique dans l'évolution générale des systèmes agricoles européens pour *in fine* en faire émerger les enjeux de recherche dans lesquels la structure d'accueil, AGROOF, s'insère. La seconde partie correspond à un état des connaissances sur les thématiques centrales de ce rapport : 1) les prairies en tant qu'objet d'étude complexe pour les agronomes dont les approches divergent, 2) les dynamiques écologiques régissant le fonctionnement des prairies agroforestières. Cette partie a le double intérêt de comprendre les partis pris méthodologiques de cette étude et d'apporter des éléments quant à l'interprétation des résultats. Enfin, la troisième porte sur l'étude à proprement dite, c'est-à-dire l'exposition des méthodes, des résultats ainsi que leur discussion.

Partie A : Agroforesterie : définition, état des lieux et perspectives de recherche

I) L'agroforesterie : une définition pour une diversité de système

L'agroforesterie est un ensemble de pratiques associant des arbres à des cultures intercalaires. Ces cultures peuvent être aussi bien des grandes cultures (blés, maïs par exemple) que du maraîchage ou des prairies [Coulon *et al.*, 2000]. Cette association doit être délibérée et non subite [Torquebiau, 2007]. Semble donc exclus de cette définition les systèmes de pâturage dans les espaces mixtes (comme les pelouses sèches) dans les cas où la présence d'arbres et d'arbustes est subie par les éleveurs et non pas considérée comme une ressource pastorale. L'arbre agroforestier est support de production, qu'elle soit sylvicole (ex : association blé – peuplier sur le site de Vézénobres [Dupraz, 2003]), fruitière (ex : prés vergers [Laflotte, 2015]), ou de service comme la lutte contre l'érosion (ex : projet de promotion de l'agroforesterie en Haïti pour limiter l'érosion des sols [Buteau, 2005]). L'arbre agroforestier est donc productif, sa valeur n'étant donc pas uniquement patrimoniale ou paysagère. A partir de cette définition, il est possible d'observer un large panel de pratiques agroforestières dans le monde entier allant de modèles très proches des écosystèmes naturels comme les agro-forêts à des systèmes très anthropiques comme l'agroforesterie intra-parcellaire [Torquebiau, 2007]. En Europe se retrouvent surtout les systèmes d'agroforesterie en disposition linéaire, les cultures sous couvert arboré et l'agroforesterie animale [Coulon *et al.*, 2000] (fig.1).

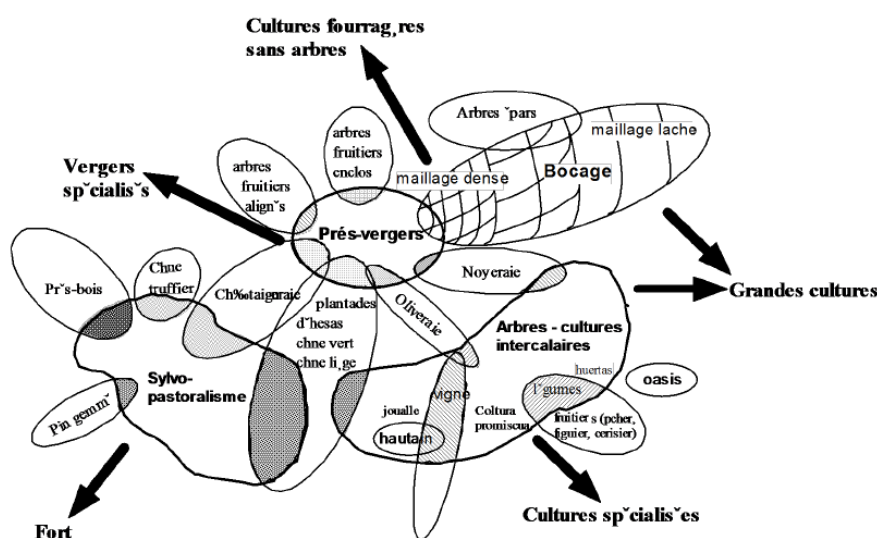


Figure 1 : Diversité des systèmes agroforestiers européens [Coulon *et al.*, 2000]

Bien que ce type de pratique soit assez ancien, la terminologie d'agroforesterie date elle de 1970 [Torquebiau, 2007]. L'objectif principal de l'agroforesterie est de bénéficier des avantages économiques mais aussi écologiques de l'association de différents compartiments biologiques pour obtenir sur le long terme un gain de productivité plus élevé que les deux systèmes séparés [Coulon *et al.*, 2000]. Les avantages recherchés par ce mode de gestion sont donc une meilleure qualité des bois (sans nœud, pousse plus régulière), un stockage additionnel de carbone, une production de biomasse (culture et arbre) à l'hectare supérieure qu'en systèmes séparés, un bon recyclage des éléments minéraux, une modification des conditions climatiques pouvant être avantageuse (protection contre le vent, lutte contre la sécheresse au sud) ou l'augmentation de la fertilité des sols [Coulon *et al.*, 2000 ; Circle-2, 2013 ; Chambre agri., 2010]. Sur le site expérimental de Restinclières les gains de biomasse s'élèvent environ de 30%

même si les rendements pris individuellement ne sont qu'à 75% des niveaux moyens en systèmes traditionnels. La rentabilité économique d'un système bien géré et adapté aux conditions locales peut rester comparable à celle des parcelles agricoles [Dupraz & Capillon, 2006].

Néanmoins, certains inconvénients existent aussi dans ces systèmes comme l'apparition d'une compétition pour la lumière ou une gêne pour le fonctionnement des machines [Coulon *et al.*, 2000]. La réussite d'une parcelle agroforestière passe donc par la recherche d'un équilibre arbre – culture intégré dans son contexte local.

II) Historique et perspectives de développement

L'agroforesterie semble être présente depuis le Néolithique en Europe. Basés initialement sur le sylvopastoralisme certains systèmes se sont maintenus presque tels quels jusqu'à aujourd'hui comme ceux de la *dehesas* espagnole [Mosquera-Losada *et al.*, 2012 ; Eichhorn *et al.*, 2006]. Ces pratiques étaient basées sur les transferts de fertilité entre les écosystèmes forestiers et les agrosystèmes. Il est rapporté qu'au Moyen Age dans certaines vallées allemandes 75% des besoins en azote et 90% des besoins en phosphore étaient assurés par la forêt [Eckert, 1995 in Eichhorn *et al.*, 2006]. Mais la première moitié du XXème siècle contribuera à la marginalisation des systèmes agroforestiers avec le développement de l'agriculture chimique, la mécanisation, le remembrement (entraînant en Europe la disparition de plusieurs milliers de linéaires de haies) et la déprise agricole [Eichhorn *et al.*, 2006 ; Mosquera-Losada *et al.*, 2012 ; Dupraz & Capillon, 2006]. Cette réduction des pratiques agroforestières est à l'origine de perte de savoir-faire, de traditions et de paysages [Dupraz & Capillon, 2006].

La Politique Agricole Commune et le Ministère de l'Agriculture furent aussi deux freins au redéploiement voir au maintien de l'agroforesterie [Dupraz, 2010]. Aujourd'hui, les positions ont changé. Le Ministère de l'Agriculture [MAAP, 2010] dans le cadre du projet *Objectif Terres 2020* reconnaît que l'agroforesterie conforte le choix de s'engager dans une agriculture durable. Depuis est considérée officiellement comme agroforestière toute parcelle associant une production forestière et une production agricole. Pour bénéficier des subventions, la densité d'arbre à l'hectare doit être comprise entre 30 et 200 et leur positionnement doit être compatible avec la mécanisation de la parcelle. L'installation de parcelle agroforestière peut être subventionnée de 70 à 80 % dans le cadre de la mesure européenne 222 [Chambre agri., 2010]. Mais cette mesure régionale n'est pas encore débloquée sur tous les territoires.

Les parcelles agroforestières peuvent aussi rentrer dans la procédure de conditionnalité des aides PAC vis-à-vis de l'objectif de 5% de surface à élément topographique (SET) de la SAU. Dans ce cadre-là 1m de linéaire agroforestier équivaut à 10m² SET et 1ha de pré-verger à 5ha SET [Chambre agri., 2010]. Les parcelles agroforestières sont aussi éligibles à la DPU (Droit aux Paiements Uniques, aides découplées) [MAAP, 2010].

Néanmoins, des blocages persistent encore. Par exemple, la définition ministérielle de l'agroforesterie, comme vue précédemment, se restreint uniquement aux systèmes intégrant des arbres pour la production sylvicole. Les prés vergers sont donc tenus à l'écart. Les haies, les bocages, les ripisylves et les systèmes sylvopastoraux sont exclus aussi. De manière plus large cette définition restreint la diversité des systèmes en imposant la disposition des arbres et la densité de plantation [AFAF], signe que les productions associées ont encore aujourd'hui du mal à trouver leur place dans les schémas institutionnels [Coulon *et al.*, 2000].

D'autres freins persistent également à l'échelle des exploitations. L'installation d'une parcelle agroforestière est un choix impactant le long terme qui demande d'avoir une vision sur l'évolution du système de production et des marchés. Ce type de choix affecte structurellement l'exploitation en touchant son cœur : le foncier dont la stabilité doit être garantie [Dupraz & Capillon, 2006]. Pour finir, les parcelles agroforestières sont généralement techniquement plus compliquées à appréhender que les cultures pures [Coulon *et al.*, 2000].

Néanmoins, les professionnels du domaine font état d'un engouement des agriculteurs. Un sondage effectué dans le cadre du projet européen SAFE [Dupraz & Capillon, 2006] auprès de 300 céréaliers répartis entre sept pays européens a montré que 48% d'entre eux étaient motivés pour essayer l'agroforesterie au moins sur une parcelle. En Union Européenne, en 2005, déjà un million d'hectares d'agroforesterie moderne étaient plantés sans compter les 15 000 ha d'agroforesterie traditionnelle (à base de noyers, oliviers, chênes) et les 170 000 ha de prés vergers [Dupraz & Capillon, 2006]. En 2008, à l'occasion d'un projet de recherche et développement soutenu financièrement par le ministère de l'agriculture (CASDAR Agroforesterie), 80 parcelles de démonstration réparties dans une vingtaine de départements ont été installées [Chambre agri., 2010]. Une fédération européenne (EURAF) a aussi été créée pour coordonner les initiatives pour le développement de l'agroforesterie [Mosquera-Losada *et al.*, 2012].

Une synthèse sur la multifonctionnalité de l'arbre à l'échelle de plusieurs territoires a été menée dans le cadre du programme ARBELE (voir 3.2) [Fages & Mignot, 2015, A, B, C, D, E, F]. Bien que s'appuyant majoritairement sur des exemples d'agroforesterie sur forme de haie/bocage cette étude présente des conclusions intéressantes. Elle relève que pour les agriculteurs les atouts principaux des arbres sont leur contribution au bien-être animal, à la biodiversité et au paysage. Les freins majeurs sont liés à la surcharge de travail et aux coûts d'entretien engendrés mais aussi à des problèmes inhérents au statut foncier des parcelles. Cette étude soulève une perte de la *culture de l'arbre* chez les agriculteurs. Pour retrouver ces savoir-faire il est important que les tissus d'acteurs se structurent afin d'offrir des références techniques, des outils (CUMA) et des débouchés aux agriculteurs. Le bois énergie reste un des modes de valorisation préférentiel. Mais des freins juridiques, notamment le code des marchés publics, tendent à limiter le rôle des collectivités territoriales dans la structuration des filières. D'autres modes de valorisation comme la litière en copeaux de bois émergent aujourd'hui dans différents territoires.

Les motivations des agriculteurs ne sont donc pas toujours d'ordre économique même si le choix de l'agroforesterie s'intègre dans une stratégie de diversification des revenus et de placement sur du long terme. Ce choix peut aussi répondre à des préoccupations d'ordre environnemental ou culturel [Coulon *et al.*, 2000].

III) AGROOF, une SCOP spécialisée en agroforesterie

2.1) Objectifs d'AGROOF

AGROOF est une SCOP¹ spécialisée en agroforesterie centrant son activité sur la formation et la recherche et développement. Elle compte huit salariés regroupés en plusieurs pôles

¹ Entreprise coopérative basée sur la participation des salariés au capital, la mutualisation des décisions et une répartition égalitaire des bénéfices [Direction de l'information légale et administrative, 2017 ; Les Scop]. En 2015, 2 274 SCOP étaient actives en France pour 51 500 salariés [Les Scop, 2015].

(recherche, développement, formation professionnelle et étudiante, audio-visuel, gestion administrative et financière) travaillant en synergie et en horizontalité. Son objectif est de produire du savoir via une recherche participative pour ensuite mieux le transmettre auprès de différents acteurs comme les agriculteurs, les étudiants, les collectivités ou les propriétaires. Pour accompagner ces formations AGROOF développe des outils pédagogiques de plus en plus orientés vers les multimédias (chaîne Youtube, plateforme d'apprentissage en ligne) tout en reconnaissant toujours l'importance du présentiel. La SCOP travaille aussi à l'accompagnement d'agriculteurs dans la conception et la mise en place de projets agroforestiers sur l'ensemble du territoire français.

2.2) Le programme PARASOL et ARBELE

Pour contribuer à l'élaboration d'éléments de réponses aux enjeux de l'élevage face aux changements climatiques, AGROOF a décidé de mobiliser son expertise dans le cadre de deux projets multi-partenariaux : ARBELE et PARASOL.

ARBELE a pour vocation de s'interroger sur la place de l'arbre dans les exploitations d'élevage herbivore. Il a donc pour objectif de construire un argumentaire sur les atouts et les limites des systèmes d'élevage agroforestiers, de produire des références à ce sujet et d'appréhender la diversité de ces systèmes. L'hypothèse principale d'étude est que les systèmes agroforestiers permettent l'allongement des périodes de pâturage et d'ainsi réduire la vulnérabilité au changement climatique et aux coûts des intrants. ARBELE est organisé en quatre actions :

- action 1 : L'arbre dans les élevages : état des lieux des pratiques, des besoins et des attentes des éleveurs, des décideurs et des structures d'accompagnement technique, leviers et freins techniques et réglementaires
- action 2 : Etude des interactions arbre/animal/culture
- action 3 : Etude des itinéraires technico-économiques
- action 4 : Transfert des argumentaires des connaissances et des outils, co-conception des méthodes de conseil et d'accompagnement de projets

Ce projet coordonné par l'IDELE rassemble diverses Chambres d'Agriculture, diverses antennes du CRPF, la SCOP AGROOF, Mission Haie Auvergne, Association Régionale d'Expérimentation Fruitière de l'Est, des fermes expérimentales et des lycées agricoles [IDELE, 2014]. Il est financièrement soutenu par le ministère dans le cadre de l'appel à projet CASDAR pour une durée de 42 mois (2015 à 2018).

PARASOL étudie le potentiel de l'agroforesterie dans le cadre de l'adaptation des systèmes d'élevage ovin au changement climatique. Pour ce faire, le projet s'appuie sur un réseau de parcelles développé en Auvergne dans les années 80 par l'IRSTEA (ex CEMAGREF) puis repris en Languedoc Roussillon par l'INRA en 1989 et dans le Nord Pas de Calais en 1992. L'objectif est de mesurer la production qualitative et quantitative de ces systèmes (arbres et herbacées) mais aussi d'étudier le comportement et les performances des ovins sous couvert d'arbres. La finalité ultime de ce projet est de proposer une analyse des performances de ces systèmes et d'imaginer des scénarios innovants et plus performants. Ce projet est divisé en 6 tâches :

- tâche 1 : Analyse des systèmes d'élevage – Caractérisation des performances existantes
- tâche 2 : Evaluation de la disponibilité fourragère herbacée et évaluation des modes de gestion de l'alimentation au pré (stage intégré dans cette tâche).

- tâche 3 : Composition et digestibilité des ressources fourragères arborées et intérêt pour l'alimentation des troupeaux

- tâche 4 : Impact des arbres sur le comportement et les performances zootechniques des ovins

- tâche 5 : Etude des performances globales des systèmes agroforestiers

- tâche 6 : Communication, formation et perspectives

Ce projet est financièrement soutenu par l'ADEME. Il est coordonné par AGROOF et réalisé en partenariat avec l'IDELE, l'UniLasalle et l'INRA de Clermont et de Lusignan [AGROOF, 2013].

Partie B : De la diversité des prairies permanentes au fonctionnement des prairies agroforestières : synthèse bibliographique

I) Définition du sujet

Au vu des enjeux liés aux changements climatiques que va affronter l'élevage, il est possible de se questionner sur l'agroforesterie comme voie possible d'adaptation (sécurisation et diversification). A ce titre de nombreuses pistes d'étude peuvent être émises comme le fonctionnement pédologique des prairies agroforestières ou comme l'effet des arbres sur le comportement animal. Même si toutes ces données permettraient d'élaborer une approche systémique très intéressante le temps imparti pour cette étude est limité. Ne sera donc étudié que **l'effet de l'arbre sur le microclimat et la production qualitative et quantitative de fourrage au cours du temps**.

La synthèse bibliographique se situe à l'interphase de deux thématiques de recherche : la première sur la notion de production fourragère (qu'est-ce qu'une prairie, qu'est-ce qu'une bonne prairie, comment évaluer l'intérêt d'une prairie) et la seconde sur le fonctionnement des prairies agroforestières intra-parcellaire (même si des exemples seront cherchés sur d'autres systèmes).

II) Les prairies permanentes : une diversité d'écosystèmes anthropiques aux fonctionnalités multiples

2.1) L'utilité et la place des prairies permanentes

Une prairie permanente, selon la définition de la Politique Agricole Commune, est une prairie dont la flore est présente naturellement (pas de retournement ou d'ensemencement) depuis au moins cinq années [Min. Agri, 2015]. Ces espaces peuvent être pâturés ou fauchés. Les Surfaces Toujours en Herbes productives (prairies permanentes et prairies semées de plus de 6 ans) représentent à elles seules 50% de Surface Fourragère Principale de la France. Mais leur répartition n'est pas homogène. Les prairies permanentes sont réparties selon un gradient système de production et un gradient régions fourragères (fig. 2). Ces surfaces se retrouvent majoritairement en zone de montagne et de Piémonts et dans le Nord-Ouest [Farrié *et al.*, 2012].

Gradient "régions fourragères"	Gradient "systèmes"			
	Caprins	Lait Bovins/Ovins	Viande Ovins	Viande Bovins
Cultures fourragères	20 - 30 %	20%	30%	
Parcours + cultures		30 - 40 %	40 - 60 %	50 - 60 %
Cultures		60 - 70 %	50 - 90 %	70 - 80 %
Zone herbagère				
Centre et Est				
Zone herbagère du Nord-Ouest	50 - 60 %		65 - 70 %	70 - 80 %
Montagnes Humides et Haute Montagne				

Figure 2 : Répartition des prairies permanentes (% SFP) entre les systèmes d'élevage et les régions fourragères [Farrié *et al.*, 2012].

Ces parcelles ne sont pas homogènes en termes de composition spécifique. La diversité des prairies permanentes est essentiellement expliquée par deux facteurs : le niveau d'utilisation (chargement, date et nombre de fauches) et la disponibilité en nutriments [Duru *et al.*, 1998 ; Dumont *et al.*, 2007]. Selon la théorie du stress intermédiaire, l'optimum de biodiversité est

attendu vers un niveau médian de stress [Grime *et al.*, 1988]. Les espèces peu compétitrices étant moins productives, il est impossible de concilier une forte biodiversité et une forte productivité sur la même parcelle [Farrugia *et al.*, 2008].

Pour les agriculteurs les prairies permanentes peuvent être soit considérées comme des surfaces productives lorsque que les rendements avoisinent ceux des prairies temporaires (la diversité du cortège floristique est alors réduite du fait d'une intensification des pratiques), soit considérées comme des surfaces peu productives. Dans ce cas-là l'agriculteur développe généralement une mauvaise image de ces espaces car il ne s'intéresse qu'à la notion de production. Mais s'il s'intéresse à d'autres fonctionnalités (bien-être animal et services écosystémiques) l'agriculteur peut avoir une approche plus positive [Plantureux *et al.*, 2012]. C'est dans ces formes de systèmes que la notion de services écosystémiques prend tout son sens en internalisant les aménités positives [Josien, 2012]. Or le mouvement d'intensification général tend à critiquer les prairies permanentes sur la faiblesse et le caractère aléatoire des rendements [Plantureux *et al.*, 2012]. Depuis 1960 c'est 4 millions d'hectares de prairies permanentes qui ont disparu. Ce mouvement a été encouragé par la Politique Agricole Commune de 1992 à 2003 qui a rendu la céréaliculture beaucoup plus avantageuse que les prairies. A titre de comparaison les primes attribuées aux céréales au cours de cette période étaient de 300€/ha contre les 30€/ha pour les MAE affiliés aux prairies. Finalement, aujourd'hui, le second pilier de la PAC et le découplément des aides semblent limiter la diminution de ces surfaces [Peyraud *et al.*, 2012].

La biodiversité floristique potentiellement présente dans les prairies permanentes peut apporter de nombreux avantages à l'agriculteur comme une meilleure souplesse d'exploitation via l'introduction d'une diversité phénologique [Duru *et al.*, 2008], l'amélioration de la motivation alimentaire [Dumont *et al.*, 2001] ou de la valeur alimentaire du fourrage [Farrugia *et al.*, 2008], ainsi que l'augmentation de la qualité organoleptique des produits [Coulon, 1997 ; Jeangros *et al.*, 1997].

Les prairies contribuent aussi à la création de paysages. En créant du paysage de haute qualité l'agriculteur rend service à la collectivité et promeut son produit [Ambroise, 1999]. Certains acteurs parlent même de systèmes agricoles à haute qualité territoriale [Michaud, 2003]. D'autres services sont aussi rendus comme la préservation d'une ressource en eau de qualité, le stockage du carbone ou la lutte contre l'érosion des sols [Peyraud *et al.*, 2012].

2.2) Evaluation du potentiel agronomique des prairies

Evaluer le potentiel agronomique d'une prairie est un enjeu majeur car de cette évaluation sera déduit un ou des usages.

Il existe dans la littérature deux grandes écoles de pensée quant à la qualification de la ressource d'une prairie. La première est l'approche directe qui déduit des résultats (agronomiques, services écosystémiques) à partir de la végétation. La seconde, dite approche indirecte, se propose que qualifier la ressource à partir de l'animal et de ses performances (fig. 3) [Blanchon, 2015].

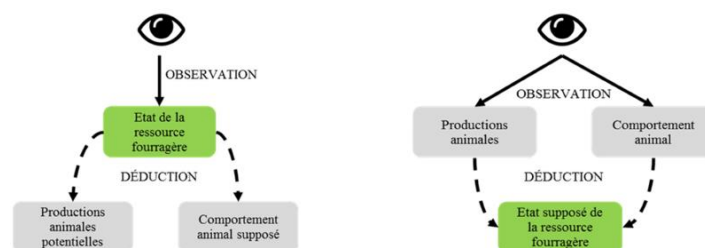


Figure 3 : Approche directe (à gauche) et indirecte (à droite) de la ressource pastorale [Blanchon, 2015]

Comme ces approches sont complémentaires, les deux seront présentées dans cette synthèse bibliographique.

2.2.1) Pour une étude des prairies centrée sur la végétation : l'approche directe

L'approche directe passe par l'étude de la végétation dont l'agronome ou l'agriculteur tire des conclusions sur la capacité de la prairie à répondre à un besoin alimentaire. La méthode la plus connue est celle du calcul de la valeur pastorale qui permet, à partir d'un faciès de végétation, de donner un chargement théorique [Echo Alpes ; Daget & Poissonet, 1972]. Mais cette méthode reste imparfaite car les comportements des différentes plantes sont négligés dans cette analyse [Duru *et al.*, 2007].

C'est pour cela qu'aujourd'hui, suite au développement de la théorie du fond prairial indiquant que la caractérisation fonctionnelle des prairies peut se faire à partir des espèces dominantes, les agronomes s'orientent plus vers une description fonctionnelle des espèces et donc des prairies [Theau *et al.*, 2010].

Un groupe fonctionnel rassemble des espèces ayant des caractéristiques écologiques similaires sans pour autant être rassemblées dans le même groupe taxonomique. Chez les plantes il est possible de discriminer deux stratégies : la stratégie d'**acquisition** et de **conservation**.

La stratégie d'acquisition s'appuie sur un prélèvement rapide des ressources. Ce comportement est typique des milieux riches. La stratégie de conservation est quant à elle plus adaptée aux milieux pauvres [Duru *et al.*, 2007]. Les plantes optant pour une stratégie de capture des ressources ont une surface spécifique foliaire élevée et une teneur en matière sèche faible. Les plantes conservatrices suivent la logique inverse [Cruz *et al.*, 2002].

Deux autres comportements peuvent être aussi identifiés en parallèle. Il est possible d'identifier les espèces supportant une **défoliation intense** et celle ne **supportant pas**. Les espèces inféodées aux milieux faiblement défoliés ont un recyclage des feuilles plus long et ont à même niveau de fertilité une taille plus grande et un taux plus important de lignine et de fibres. Elles ont donc une surface foliaire spécifique plus forte et une teneur en matière sèche plus faible [Cruz *et al.*, 2002]. Si la teneur en matière sèche (TMS) et la surface spécifique foliaire (SSF) sont les deux caractères utilisés c'est qu'ils sont fortement corrélés aux caractéristiques agronomiques des plantes (phénologie, digestibilité, accumulation de biomasse avant épiaison, teneur en protéine brute, fig. 4) [Ansquer *et al.*, 2004].

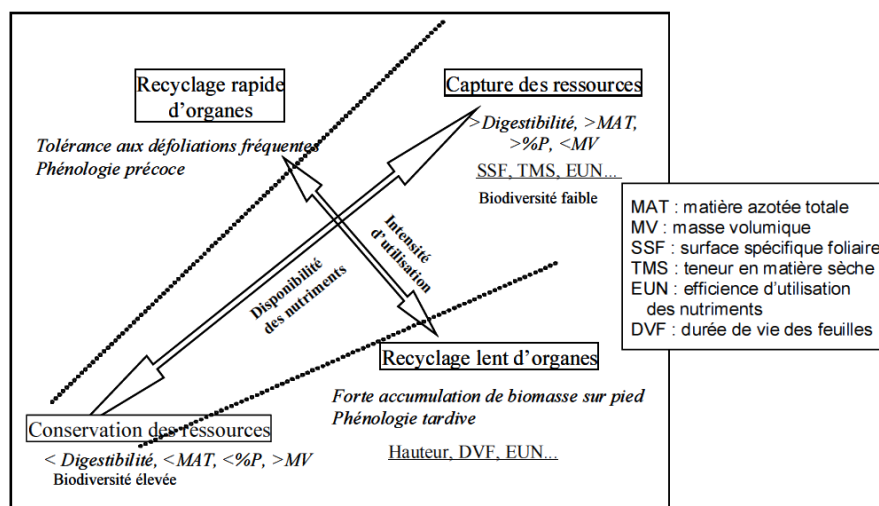


Figure 4 : Croisement entre les logiques liées à la disponibilité de nutriments et l'intensité d'utilisation [Cruz]

A partir de ces études plusieurs typologies de graminées ont pu être successivement créées permettant ainsi d'obtenir des informations sur les traits de fonctionnement des prairies. Theau *et al.*, en 2010 proposent que le type fonctionnel d'une prairie soit déterminé par le type fonctionnel de graminée dominante. Celui-ci peut donner des informations sur la productivité ou sur la précocité de la prairie. Il est important de remarquer que la diversité fonctionnelle de la végétation au sein d'une même prairie tend à favoriser sa souplesse d'utilisation [Duru *et al.*, 2007] même si ce postulat est moins évident dans le cas où la ressource en élément minéral est en excès ou au contraire en déficit [Duru *et al.*, 2010].

Mais l'étude fonctionnelle des prairies ne saurait se restreindre aux Poaceae. Les dicotylédones, de par leur décalage phénologique contribuent à augmenter la souplesse d'utilisation [Duru *et al.*, 2010]. C'est pour cela qu'une approche fonctionnelle de ces espèces est aussi en cours d'élaboration par l'INRA et le CERAQ [Theau & Pauthenet]. Cette dernière est basée sur la physiologie des feuilles, le port et la précocité.

Pour conclure cette partie sur l'approche fonctionnelle il est intéressant de revenir à l'échelle du système rapidement évoqué dans la partie précédente. Comme il a été déjà vu, une prairie remplit des services écosystémiques et parmi eux des services de production. Ces services peuvent être de trois sortes : la nature de la production (stockage ou pâture), la qualité du fourrage et le niveau de contribution dans la matière sèche ingérée annuelle. Croisé avec les saisons pratiques (début et fin de printemps, été, automne, hiver), ces services ont abouti à la création d'une typologie fonctionnelle des prairies permanentes [Farrié *et al.*, 2012]. Pour l'agriculteur il est avantageux de bénéficier d'une diversité de prairies pour permettre une meilleure organisation du travail (fenaïson, itinéraire de pâture, etc) sur la saison [Duru *et al.*, 2010].

2.2.2) Ce que les bergers ont à nous apprendre sur la notion de ressource pastorale

Mais l'étude d'une prairie ne se limite pas à sa botanique, l'animal doit être, lui aussi, intégré dans les schémas de conception. La première évidence est qu'une ressource sera prélevée et valorisée différemment selon qu'il s'agit d'un troupeau ovin ou bovin. Cette donnée dépend de la capacité des animaux à digérer un fourrage mais aussi de leurs capacités morphologiques à le prélever [Dumont, 1995].

Meuret en 2014, propose d'écouter les bergers et d'ainsi ne plus considérer la valeur alimentaire d'une espèce comme une donnée fixe mais plutôt comme donnée relative. Relative à la phénologie de l'espèce [Meuret, 2010 A, 2014], mais aussi au troupeau. Une discussion rapide avec un berger ou un éleveur ancré dans la tradition pastorale permet de se rendre compte qu'un troupeau est un ensemble construit, avec son histoire et ses habitudes. Apparaît ainsi une « culture alimentaire » propre au troupeau [Howell, 2005] qui tend à se transmettre à chaque génération d'animaux via des mécanismes d'apprentissage [Howell, 2005 ; Ginane *et al.*, 2008, Meuret, 2014].

Les bergers savent aussi qu'une ressource alimentaire se situe dans une séquence alimentaire (journalière ou saisonnière) [Meuret, 2010 B ; Dumont, 1995]. Une même ressource à une qualité ou un rôle différent selon sa place dans ces séquences.

Ces considérations entraînent ainsi en conséquence de ne plus considérer un espace pastoral comme un stock de nourriture mais aussi comme un lieu de vie (zone de repos, de repas, d'abreuvement). Des conditions de vie favorables peuvent conduire à une augmentation de la motivation alimentaire [Meuret, 2014 ; Agreil & Greff, 2008].

L'étude d'une ressource pastorale doit aussi s'intégrer de manière plus large au système alimentaire. La ration que reçoit l'animal en complément peut avoir un effet sur sa capacité à consommer la végétation d'une parcelle. Les concentrés peuvent avoir tendance à se substituer à la ressource pastorale. Ce phénomène est d'autant plus marqué quand la ressource pâturée est cellulosique ou lignifiée [Meuret, 1997]. La même logique peut être relevée par l'apport de foin servant bien souvent de sécurité mais pouvant, dans le cas d'une ration trop forte, exacerber les capacités qu'a un animal à trier et, *in fine*, le démotiver à pâturer et ainsi dévaluer la valeur de la parcelle aux yeux de l'agriculteur [Meuret, 1997].

Cette même équipe de recherche a aussi démontré l'intérêt de la broussaille dans la ration alimentaire [Meuret & Agreil ; Roudaut *et al.*, 2007] tant du point de vue de l'animal, de la digestibilité et de l'intégration dans les systèmes de pâturage. Les arbres pouvant offrir une ressource pastorale aujourd'hui bien souvent négligée.

Ainsi, à défaut de conduire à la production de résultats absolus cette approche permet de mieux comprendre l'intérêt des parcelles agroforestières. Ces parcelles ne sont pas qu'un stock de nourriture, elles offrent aussi des espaces de vie au troupeau (ombre pour repos).

2.3) Particularité du pâturage

La différence principale entre la fauche et le pâturage réside dans le fait que les animaux effectuent une consommation différentielle de la végétation alors que la fauche coupe indifféremment l'ensemble des espèces. Ainsi, ces deux pratiques peuvent conduire à des milieux différents [CIVAM *et al.*] du fait de leurs impacts différents sur la biodiversité [RPAPN].

Le pâturage se caractérise aussi par son mode de restitution. Chez les bovins il a été démontré que la matière organique restituée lors des périodes de pâturage correspond à 15% de la matière sèche ingérée [Bloor *et al.*, 2012]. Ainsi, une parcelle d'un hectare semble pouvoir être fertilisée à 50% pour 1,7 bovin [Lançon, 1978, A]. Toutefois, l'existence de pôle d'attraction induit une restitution non homogène [Bloor *et al.*, 2012]. Pour améliorer la répartition de la matière organique il est conseillé de passer une herse sur la parcelle (ébousage), de contrôler les pôles d'attractivité ou d'augmenter la pression de pâturage instantanée [Lançon, 1978, A ; Bloor *et al.*, 2012].

La présence de bouse ou de crottin a un effet sur le comportement alimentaire des animaux. Les bovins et les équins ne pâturent plus ces zones pour éviter l'ingestion de parasites gastriques. Les fèces influent aussi la composition botanique. Même si localement l'effet de la bouse est négatif (bloque accès à la lumière), elle permet un accroissement de production herbagère sur un rayon de 30 cm [Lançon, 1978, B]. Les fèces tendent aussi à favoriser les Poacées au détriment des Fabacées et à disperser les graines, voire même, à faire germer certaines espèces déjà présentes dans le sol [Bloor *et al.*, 2012].

Il serait intéressant de se questionner sur la répartition des fèces au sein d'une parcelle agroforestière, de voir comment ces dernières sont remobilisées en matière minérale assimilable par les plantes et si la végétation profite réellement de ce gain de fertilité dans un contexte de compétition pour la lumière.

Le pâturage, parce qu'il s'appuie sur la présence d'animaux induit des contraintes supplémentaires à l'exploitation d'une parcelle comparée à la fauche. Les besoins alimentaires évoluant au cours de l'année. La valeur d'une végétation ne sera pas là même en fonction du stade physiologique de l'animal. Chez les brebis allaitantes les périodes à enjeux sont : la lutte, la fin de gestation et le début de l'allaitement [Dudouet, 2012].

Mais la date d'entrée sur parcelle peut aussi être influencée par les cycles parasites. En effet, la charge parasitaire d'une exploitation ovine se situe à 80% dans les pâturages [Menzies, 2006]. Pour limiter les infections certaines techniques de gestion intégrée du parasitisme ont été élaborées, parmi lesquelles le pâturage tournant avec une période de présence sur la parcelle d'au maximum une semaine et un vide sanitaire de trois semaines à un mois [Dudouet, 2012 ; Menzies, 2006]. La composition floristique, de par l'action antiparasitaire de certaines espèces, peut être prise en compte dans une politique de gestion sanitaire intégrée [Wallace, 2013]. Ce type de résultat contribue à inciter à une approche plus fonctionnelle de la végétation dans le cadre d'une meilleure compréhension des services écosystémiques.

Le pâturage entraîne aussi des modifications des propriétés mécaniques des sols via le tassement. Le temps d'infiltration croît sous l'effet conjoint de l'augmentation de la densité apparente et de la baisse de la porosité totale sans toutefois franchir le seuil d'anoxie et sans changer la capacité au champs. Ce phénomène, en dehors de cas extrêmes, semble rapidement réversible et peu impactant sur la productivité primaire de l'écosystème [Sharrow, 2007].

Conclusion et transition : de la prairie à l'agroforesterie

Au terme de cette partie il est possible d'affirmer qu'une prairie naturelle est un espace complexe puisqu'elle est le point de rencontre entre des dynamiques écologiques spontanées et des logiques de système d'exploitation. Ainsi, une même prairie pourrait être utilisée de manière radicalement différente (et donc avoir une flore différente) en fonction de l'agriculteur qui l'exploite. Caractériser le potentiel d'une prairie est une tâche complexe à l'interface de plusieurs méthodes, de plusieurs approches. Mais comment appréhender une prairie agroforestière ? Quelles sont les dynamiques écologiques qui influent sur sa composition floristique au-delà des pratiques de l'éleveur ? C'est à cette question que va tenter de répondre la partie suivante

Même si la part du troupeau est importante dans l'évaluation d'une prairie, l'influence de l'arbre sur le troupeau (bien-être, polarisation des activités, structures spatiales du troupeau, performances zootechniques) ne sera pas traitée directement dans ce rapport. Il est quand même primordial de garder cette question en filagramme car elle reste structurante quant à l'intérêt des parcelles agroforestières.

III) L'arbre agroforestier et les herbacées : une somme d'interactions complexes

L'agroforesterie, en tant que pratique agro-écologique, est basée sur le fonctionnement des écosystèmes non anthropisés. Cet ensemble de techniques s'appuie donc sur la théorie du ratio des ressources qui tend à expliquer les relations dynamiques de facilitation et d'exclusion compétitrice [Jose *et al.*, 2004]. L'objectif de l'agroforesterie est de profiter au maximum des relations de facilitation afin d'obtenir un gain général de productivité à l'échelle du cycle agroforestier.

L'objectif de cette partie de synthèse bibliographique est de comprendre comment l'arbre en modifiant les conditions microclimatiques et rentrant dans le jeu des relations intra-spécifiques, influe les communautés végétales des prairies (productivité et composition).

3.1) Modification des conditions climatiques

L'arbre intercepte une partie du rayonnement lumineux arrivant au sol. A âge égal, le niveau général d'interception peut grandement varier selon la densité. Montero & Moreno rapportent une variation de 20 à 100% % sur des peuplements anciens de chênes verts (*Quercus ilex*) sur une gamme de densité très large (25 à 400 arbres hectares). Cette donnée varie aussi selon la période de l'année sous l'effet de l'évolution de l'angle zénithal du soleil [Peri *et al.*, 2007] et de la chute des feuilles chez les caducifoliés [Hawke & Knwoles 1997 – Guevara Escobar *et al.*, 1997 in Devkota *et al.* 2009 ; Douglas *et al.*, 2001 in Benavides *et al.*, 2009]. Les feuilles sont en effet responsables à elles seules de 69% de la surface ombrée [Benavides *et al.*, 2009].

En plus de diminuer la quantité de photons reçue par le couvert herbacé, l'ombre de l'arbre change aussi la qualité du rayonnement reçu en modifiant le rapport R/FR (rouge/infrarouge). Ce rapport peut varier de 1,32 en milieu ouvert à 0,90 pour les bords de l'ombre de *Pinus radiata* lors d'une journée ensoleillée [Peri *et al.*, 2007]. La qualité de la lumière, évaluée par ce rapport, influe sur les traits morphologiques des plantes. Les herbacées répondent à une lumière de *mauvaise* qualité (rapport R/IR faible) en favorisant l'élongation cellulaire (l'étiollement) au détriment du tallage [Peri *et al.*, 2007]. Granier et Roy ont observé une baisse de 36% de la population de tallage de dactyle (*Dactylis glomerata*) sous une chênaie transmettant 33% du rayonnement lumineux [Granier & Roy, 1998 in Peri *et al.*, 2007]. Une réponse similaire a été observée chez deux espèces de raygrass (*Lolium*) [Deregibus *et al.*, 1983] et chez le trèfle blanc (*Trifolium repens*) avec une élongation des pétioles [Marcuvitz & Turkington, 2000]

Ces deux effets semblent conjointement impacter la qualité des fourrages en baissant le taux de glucides mais en augmentant le taux en protéines brutes. Ce phénomène semble être dû, entre autres, à une baisse d'activité des photosynthétases qui a pour conséquence d'augmenter le taux en azote [Sander *et al.*, 1997 - Wall *et al.*, 1997 in Benavides *et al.*, 2009 ; Peri *et al.*, 2007].

Il existe une opposition dans la communauté scientifique sur la nature de la corrélation entre l'intensité du rayonnement et la baisse de rendement. Certains proposent une baisse linéaire [Gosse *et al.*, 1986] tandis que d'autres soutiennent que les modifications morphologiques et biochimiques, comme l'augmentation du taux chlorophylle par feuille, le développement de feuilles plus fines mais plus larges et l'élongation générale de la plante, tendent à tamponner cette tendance [Solangaarachchi & Harper, 1987 - Wall *et al.*, 1997 in Benavides *et al.*, 2009].

En interceptant une part des radiations émises par le soleil, l'arbre modifie les températures au niveau du sol. Sous couvert arboré les sols semblent se réchauffer plus vite en début de saison [Monteith *et al.* en 1991] pour aboutir sur un climat plus frais lors des saisons chaudes

[Guevrara-Escobar *et al.*, 1997]. Des baisses de 5 à 10°C ont même été enregistrées dans des systèmes agroforestiers mexicains [Barradas & Fanjul, 1986 in Monteith *et al.*, 1991].

La canopée joue aussi un rôle dans la disponibilité de la ressource en eau pour le couvert herbacé. Cette dernière peut intercepter de 34 à 6% des précipitations en fonction de la densité du peuplement [Benavides *et al.*, 2009]. Généralement en agroforesterie l'évapotranspiration du système est plus élevée que dans les pâturages ouverts. Cette évapotranspiration semble fortement portée par les arbres. Cela permet, conjointement avec la réduction du vent, en condition sèche de réduire l'évapotranspiration du couvert herbacé en augmentant l'humidité de l'air [Guevara Escobar *et al.*, 1998 ; Dupraz & Liagre, 2008 ; Peri *et al.*, 2016]. Il existe en effet une relation linéaire entre la vitesse du vent et l'évapotranspiration [Stigter *et al.*, 2002; Kainkwa & Stigter, 2000].

Pour revenir sur l'effet brise vent la présence d'arbre peut permettre de réduire la vitesse du vent [Monteith *et al.*, 1991]. Dans les systèmes sylvopastoraux à faux hêtre (*Nothofagus*) en Patagonie la vitesse du vent peut être réduite de 80% par rapport aux systèmes ouverts [Peri *et al.*, 2016]. L'étude de cet effet s'est essentiellement concentrée sur les haies où la présence de linéaires d'arbres semble conduire à un gain de productivité [Franck & Willis, 1978 – Baldwin et Johnston, 1984 in Vézina, 2001]. Mais systématiser ce gain semble être une erreur car des irrégularités [Oteng'i *et al.*, 2000] dans le couvert ou certaines formes d'élagage [Dupraz & Liagre, 2008] peuvent conduire à une accélération du vent (effet Venturi) conduisant à des dégâts sur les cultures.

3.2) Relations interspécifiques

En plus des relations de compétition pour la lumière, les arbres et les strates herbacées interagissent fortement dans le sol que cela soit autour de la ressource en eau ou de la disponibilité des nutriments.

Il semblerait que la compétition pour la ressource en eau se déroule majoritairement sur les horizons moyennement profonds. Guevrara-Escobar *et al.* en 1997 ont montré que l'humidité des sols agroforestiers (plantation de peupliers noirs (*Populus nigra*) en Nouvelle Zélande) est plus faible que celle des systèmes ouverts sur la tranche 0-300 mm et sur l'ensemble de l'année. Mais cette même étude démontre, dans le même système, une absence de différence au moins sur les horizons 0-100 mm. L'élagage des arbres semble pouvoir dans certains cas limiter ce phénomène mais la réponse est variable selon les espèces [Jones *et al.*, 1998]. Cette compétition semble avoir conduit à un partitionnement de la captation de la ressource en eau, les arbres prélevant l'eau dans les horizons profonds, les herbacées dans les horizons superficiels [Fernandez *et al.*, 2008 in DeBruyne *et al.*, 2011].

Partant de ce postulat et des lois de la physique des fluides, une hypothèse est formulée : celle de l'ascenseur hydrique. L'arbre, la nuit, réhumecterait la rhizosphère proche réalisant ainsi un transfert d'humidité entre les horizons profonds et les horizons superficiels. Ce transfert pourrait être profitable aux herbacées [Dupraz, 2009] mais il reste mal quantifié [DeBruyne *et al.*, 2011], avec une grande variabilité entre les espèces d'arbres [Dupraz, 2009] et les espèces d'herbacées due à la diversité des couverts racinaires, lui-même en partie lié aux conditions climatiques [Joffre *et al.*, 1987].

Une compétition racinaire semble aussi exister pour les éléments minéraux présents dans le sol. Les arbres semblent être majoritairement avantagés en profitant d'une meilleure absorption liée à l'effet de rétention (évitant une lixiviation trop rapide) des éléments dans le mat racinaire des graminées au détriment de ces dernières. Néanmoins, il existe une variabilité de réponses en fonction de la structure du tissu racinaire des arbres [Georges *et al.*, 1996]. Concernant les

apports exogènes (déjection, fertilisation) les herbacées semblent être plus avantagées, les arbres puisant d'abord leurs nutriments dans leurs réserves, avant d'aller les chercher dans le milieu. Les herbacées de plus ont un système racinaire plus dense et commencent leur croissance plus tôt dans la saison. Ces espèces sont donc des meilleures compétitrices pour ces ressources [Gargoglione *et al.*, 2014]. Les arbres peuvent aussi limiter les pertes de ces apports exogènes. Leur présence limite les pertes d'azote ammoniacal en azote gazeux soit par l'assimilation des molécules en excès, soit par la présence d'enzymes inhibant certaines réactions du cycle de l'azote. Les gains en productivité pour l'arbre, dans le cas d'une fertilisation par le troupeau, restent difficilement quantifiables [Esperschuetz *et al.*, 2017].

Les arbres induisent aussi une modification de la fertilité du sol. Les sols agroforestiers présentent une litière de meilleure qualité grâce à la modification des conditions microclimatiques. La matière organique, la teneur en azote total, les nitrates, le phosphore disponible et la CEC s'en voient augmentés quel que soit le niveau de fertilité du sol d'origine ou le niveau de fertilisation [Tripathi *et al.*, 2013 ; Moreno *et al.* 2007]. Cet enrichissement en azote matière organique, dû aux feuilles des arbres plus riches en azote que celles des herbacées, conduit généralement le métabolisme microbien à s'orienter vers une minéralisation de la matière organique profitable aux plantes. A l'inverse, en cas de carence en azote les nutriments tendent à être immobilisés. Cela est dû à un mécanisme de compétition pour l'azote entre les plantes les microorganismes du sol [Kaye & Hart, 1997 in Gargoglione *et al.*, 2014]. Ainsi, si les herbacées des systèmes agroforestiers sont plus aptes à absorber de l'azote exogène (fertilisation) que celles des systèmes ouverts (azote insuffisant présent pour éviter compétition microbienne) [Gargoglione *et al.*, 2014].

Mais finalement, du fait d'effets cumulés, le gain de fertilité lié à l'arbre n'apporte qu'un faible gain de rendement et cela uniquement sur les sols pauvres (cas de la dehesa) [Obrador & Moreno].

Pour finir l'allélopathie peut être une piste d'étude quant à l'explication d'une modification des rendements (pertes ou gains en agroforesterie). La production de juglone par les noyers (*Juglans sp.*), notamment le noyer noir (*Juglans nigra*) agit comme un inhibiteur de croissance [Willis, 2000] et pouvant entraîner une baisse du taux de croissance racinaire, de l'activité photosynthétique ou de la respiration foliaire [Jose & Gillespie, 1998]. Toutefois, la végétation spontanée (notamment les *Poaceae*) tend à être insensible à la juglone même s'il existe une variabilité interspécifique [Willis, 2000]. Les plantes tendent d'ailleurs à mettre en place des réponses de protection (antioxydant) à cette molécule [Wang *et al.*, 2014]. De manière générale, l'impact de l'allélopathie sur les rendements des prairies agroforestières semble peu étudié.

3.3) Réponse générale du couvert herbacée au cumul des différents effets énoncés

Des données généralisables sont quasiment absentes de la bibliographie. Les données issues des études sont souvent liées aux conditions locales (sols, climat, pool d'espèce, âge et densité du peuplement, arbres cultivés). Des méta-analyses décrivant toutes les composantes des écosystèmes agroforestiers ne semblent pas encore avoir été réalisées à l'échelle de notre région bioclimatique. C'est pour cela que cette synthèse prend des exemples issus de systèmes variés (agroforesterie intra parcellaire et sylvo-pastoralisme) à l'échelle du globe.

Tout d'abord, même si Guevara Escobar *et al.*, en 1998 ne semblent pas avoir démontré de différences sur l'année au niveau de la composition spécifique, il semblerait néanmoins que certaines espèces soient favorisées par rapport à d'autres. Les plantes en C3 montrent évidemment une plus grande adaptabilité aux systèmes agroforestiers que les C4 [Lin *et al.*, 1999]. Plus

précisément, il semblerait que le dactyle et de la houlque laineuse (*Holcus lanatus*) soit plus adaptées à l'agroforesterie que le Raygrass [Devkota *et al.* 2009].

En plus de la baisse de qualité vue précédemment pouvant entraîner d'une tonne de matière digestible à l'hectare (sous *Pinus radiata* en Nouvelle Zélande [Peri *et al.*, 2007]), une baisse de la production massique peut être aussi enregistrée, cette dernière allant de 22 à 44% selon les systèmes étudiés [Guevara Escobar *et al.*, 1998 ; Peri *et al.*, 2007 ; Silva-Pando *et al.*, 2002]. La diminution de production végétale est en partie expliquée par les phénomènes de compétition, mais aussi par la baisse directe de la surface disponible pour les herbacées [Kallenbach *et al.*, 2006]. La balance compétition-facilitation semble liée aux précipitations (plus les précipitations augmentent plus les relations dérivent vers la compétition) et à la densité des peuplements [Moustakas *et al.*, 2013]. Il est à noter que le régime de taille des arbres permet aussi d'équilibrer cette balance en contrôlant la compétition pour la lumière [Devkota *et al.* 2009]. Une perte de rendement chez les arbres peut être aussi observée dans les premières années de plantation. Le diamètre et la hauteur des troncs de jeunes plants (6 ans) de noyer noir peuvent être divisés par deux du fait de la compétition avec la grande fétuque (*Festuca arrundinaceae*) [Roth & Mitchell, 1982].

Mais l'étude des systèmes prairiaux agroforestiers prennent tout leur sens hors des situations normales. Benavides *et al.*, en 2009 rapportent les résultats d'une étude de Hawley and Dymond 1988 qui montre que les pertes liées aux cyclones ont été réduites de 13,8% dans les systèmes agroforestiers comparés aux systèmes ouverts. Une étude sur les systèmes agroforestiers anglais a aussi montré que lors des épisodes de sécheresse la production herbagère en système agroforestier pouvait être augmenté de 16% par rapport aux pâtures ouvertes [Sibbald, 2006]. En zone méditerranéenne, les systèmes agroforestiers semblent retarder le jaunissement de trois semaines [Dupraz & Liagre, 2008]. Globalement, les systèmes agroforestiers tendent à tamponner les effets des variations climatiques [Silva-Pando *et al.*, 2002]. Un gain de productivité peut aussi être rapporté dans le cas des sols oligotrophes [Obrador & Moreno]. De plus, il semblerait que les effets positifs de l'agroforesterie soient aussi plus marqués sur les sols fins où la présence des arbres permet de limiter l'évaporation de l'eau des sols [Palma *et al.*, 2016].

Les premières études sur les rendements fourragers en agroforesterie semblent plutôt négatives. Mais ces résultats s'appuient sur des études de cas particuliers et non sur des études très généralistes. De ce fait la question qui s'impose face à ce constat est celle des modalités de gestion optimales des systèmes. C'est-à-dire quand et comment intervenir sur la plantation ou sur le couvert pour essayer d'atteindre des rendements optimaux. Cette question soulève celle de l'arbitrage entre la production agricole et sylvicole.

IV) Retours sur la problématique et émissions des hypothèses d'études

Au vue de la synthèse bibliographique il est désormais possible de poser des hypothèses face aux problématiques de cette étude.

- Comment se caractérise l'effet de l'arbre sur le microclimat de la parcelle (température et humidité) ?

Hypothèse initiale : l'arbre **tamponne les extremums** de température. Etant inféodé au rayonnement lumineux intercepté par la canopée, cet effet devrait être plus marqué au pied de l'arbre par rapport à l'inter-rang. En pouvant réduire l'effet du vent et en évapotranspirant, l'arbre devrait **augmenter le taux d'humidité** de l'air par rapport au témoin après le débourrement des feuilles.

- Comment se traduisent conjointement les effets biotiques et abiotiques de l'arbre au cours du temps sur la production fourragère (composition floristique, production fourragère) ?

Hypothèse initiale : l'arbre en induisant une compétition racinaire devrait induire une **baisse de rendement** herbager. Cette dernière devrait devenir **plus sévère avec le débourrement** des feuilles (compétition pour la lumière). A l'inverse en cas de **sécheresse** la compétition pourrait devenir une **facilitation** et permettre d'assurer une production herbagère supérieure à la zone témoin. Les sols agroforestiers semblant plus riches, les graminées se développant sous le houppier devraient être de type **acquisition**. Néanmoins, le filtre de la compétition pour la lumière devrait exclure les espèces les plus sensibles pour favoriser les **espèces de lisière** (ourlet).

Partie C : Méthodes et résultats de l'étude

I) Matériel et Méthodes

1.1) Présentation des sites étudiés

Dans le cadre de cette étude quatre exploitations / sites seront étudiés. Deux se situent dans le Piémont pyrénéen (la ferme de la Lalosse et le GAEC de la famille Baudeuf) et deux dans le Massif Central (le site expérimental de l'INRA de Theix et le lycée agricole de Bonnefont) (fig. 5).



Figure 5 : Localisation des parcelles d'étude (fond de carte OSM)

Le tableau (tab. 1) suivant regroupe les données géologiques, météorologiques et les principaux descriptifs de ces sites.

Trois des quatre parcelles étudiées comprennent une ou plusieurs zones en agroforesterie et une zone témoin. La zone témoin se situe dans un manquant à Lalosse et au-dessus de modalités agroforestières (différents espacements) à Pomy. A Theix, la portion sans arbres se situe à côté des arbres têtards tandis que les arbres en haut jet se situent en contre bas à côté d'un bosquet. A Bonnefont, la zone témoin se situe dans une autre parcelle attenante à la parcelle agroforestière.

Tableau 1 : Présentation des sites d'études

	Bonnefont	Theix	Pomy	Lalosse
Géologie	Formations alluviales anciennes à sable et galets basaltiques	Orthogneiss issue de l'orogénèse du Varisque	Molasse de Carcassonne (Eocène supérieur)	Colluvions et éboulis des molasses de l'oligocène
Altitudes	479 m	867 m	472 m	279 m
Climat	Continental	Montagnard	Méditerranéen - Océanique	Méditerranéen - Océanique
Petite région agricole	Limagne	Périphérie des dômes	Razès	Razès
Système	Ovins viandes (Bizet)	Vaches laitières (Prim'Holstein)	Ovins viandes (Rouge du Roussillon)	Ovins laits (Lacaune)
Objectif	Sylvicole	Sylvicole	Sylvicole	Sylvicole
Essence	Noyer	Frêne (têtards + haut jet)	Merisier	Noyer
Date de la plantation	1990	1991	1992	1997
Espacement (interang x intrarang)	16x6	14x7	10x10 et 6x6	11x12
Densité (arbres/ha)	83	200	Entre 100 et 277	76

1.2) Mesures réalisées sur la parcelle

Il est important de noter que ce rapport correspond à la deuxième année d'application de ce protocole.

1.2.1) Effet de l'arbre sur la composition floristique et les rendements en matières

- Design du protocole

Afin de déterminer l'effet de l'arbre sur les rendements herbagers et sur la composition floristique trois arbres ont été sélectionnés par parcelle. Une mise en défend a été installée autour de chacun dans un alignement Nord-Sud (ursus + fil électrique). Au sein de cette mise en défend six quadrats de 0,54 m² (90x60cm) ont été installés : un à 1 m au Nord (Sud) de l'arbre (noté A), un à ¼ de la distance avec l'arbre suivant au Nord (Sud) de l'arbre étudié (noté B), et un à la moitié de la distance avec l'arbre suivant au Nord (Sud) de l'arbre étudié (noté C). Une mise en défend a également été installée en zone témoin (prairie sans arbre) au sein de laquelle cinq quadrats ont été suivis (fig. 6). Les deux premières lettres du quadrat indique le traitement étudié (AF : agroforesterie ; ZT : zone témoin), la troisième l'arbre étudié ou la répétition dans la zone témoin, la quatrième l'exposition (Nord/Sud) et la dernière la distance au tronc. Le schéma est répété dans une modalité sous arbres étêtés (têtards) sur le site de Theix.

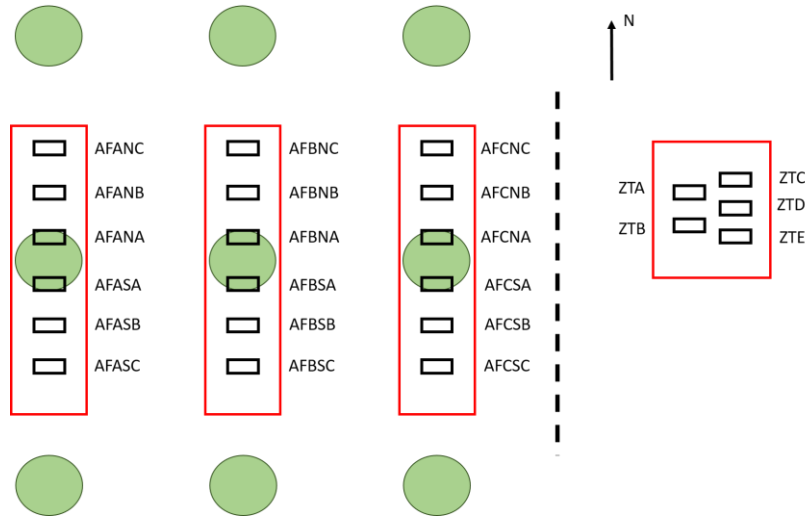


Figure 6 : Plan expérimental

Des mesures ont été effectuées à différentes périodes de l'année. Ces périodes ont été déterminées à partir de hauteurs d'herbe – degré jours (fig. 7).

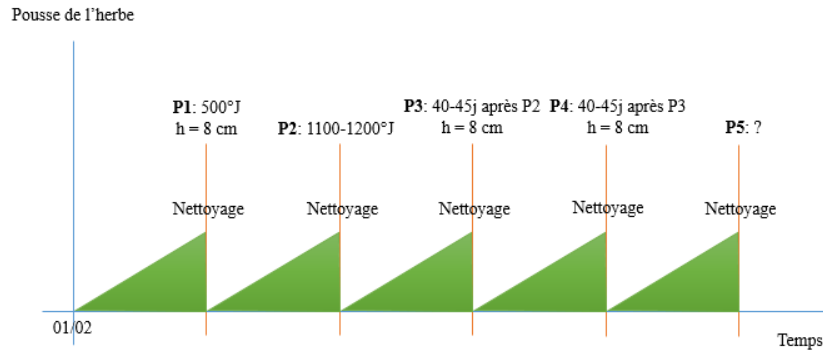


Figure 7 : Période d'études

Le calcul des degrés jours s'effectue à partir de février et est calculé de la manière suivante :

$$\text{Somme de degrés jours à la date } j = \sum_{i=1}^j \frac{T_{max_i} + T_{min_i}}{2}$$

Si $\frac{T_{max_i} + T_{min_i}}{2} \geq 18^{\circ}\text{C}$ alors les résultats étaient ramenés à 18°C et si $\frac{T_{max_i} + T_{min_i}}{2} \leq 0^{\circ}\text{C}$ alors les résultats étaient ramenés à 0°C .

Le choix des dates de 500°J et $1100-1200^{\circ}\text{J}$ est lié à une contrainte matérielle. En effet, lors des différents relevés, des mesures à l'herbomètre à plateau ont dû être réalisées (résultats non présentés dans ce rapport). Cet appareil dysfonctionne dans le cas où des épis seraient présents. Pour cela, il a fallu, à partir de références techniques [Baumont *et al.*, 2011], rechercher une date de pousse et de repousse suffisamment précoce pour éviter les épis [Moreau, 2017].

Le tableau ci-dessous (tab. 2) présente les conditions des relevés. Un jour de contrainte hivernale correspond à un jour où le calcul journalier est inférieur ou égal à 5°C [Baumont *et al.*, 2011] et un jour de contrainte estivale correspond à un jour où le calcul journalier est supérieur ou égal à 18°C .

Tableau 2 : Conditions climatiques avant les différents relevés

	Bonnefont	Lalosse	Pomy	Theix
Degré jour à la P1	523	519	599	514-517
Date de la P1	03-avr	28-mars	05-avr	19 et 20 avril
Nombre de jour avec de contrainte estivale avant P1	0	0	0	0
Nombre de jour avec de contrainte hivernale avant P1	12	4	6	36
Degré jour à la P2	1210	1193-1210	1190-1204	1198-1212
Date de la P2	29-mai	16 et 17 mai	22 et 23 mai	15 et 16 juin
Nombre de jour avec de contrainte estivale avant P2	16	3	3	41
Nombre de jour avec de contrainte hivernale avant P2	7	4	8	8

- Mesure des rendements fourragers

A chaque période d'étude, sur chaque quadrat, la hauteur d'herbe a été mesurée avant et après prélèvement à l'herbomètre à plateau. Après prélèvement la hauteur d'herbe est sensée avoisiner les 5 cm.

La biomasse prélevée a ensuite été directement pesée sur site. Un sous échantillon d'environ 500g a été constitué, conditionné et congelé pour être ramené au laboratoire où il a été pesé avant et après mise à l'étuve (72h-60°C) de manière à déterminer le taux de matières sèches des différents échantillons récoltés. Ces taux individuels ont été appliqués à la pesée sur site afin d'en extrapoler un rendement en tonnes de matières sèches par hectare (tMS/ha).

- Composition floristique du fourrage

La composition botanique a uniquement été étudiée à la deuxième date de prélèvement, c'est-à-dire au printemps. Un relevé botanique total a été effectué sur chaque quadrat. A chaque espèce a été renseigné un coefficient de Braun Blanquet (tab. 3).

Tableau 3 : Coefficients de Braun Blanquet et ses traductions [Braun-Blanquet et al., 1952 ; Baudière & Serve, 1975]

Note d'abondance dominance	Description	Classe de recouvrement	Recouvrement moyen
+	individus rares (ou très rares) et recouvrement très faible	<1	0,5
1	individus assez abondants, mais recouvrement faible	1-5	2,5
2	individus très abondants, recouvrement au moins 1/20	5-25	15
3	nombre d'individus quelconques, recouvrement 1/4 à 1/2	25-50	37,5
4	nombre d'individus quelconques, recouvrement 1/2 à 3/4	50-75	62,5
5	nombre d'individus quelconques, recouvrement plus de 3/4	75-100	87,5

Les espèces ont été identifiées avec le Guide Delachaux des fleurs de France [Streeter *et al.*, 2001], la flore forestière française tome 3 : région méditerranéenne [Rameau *et al.*, 2008], la flore complète portative de la France, de la Suisse et de la Belgique [Bonnier & De Layens, 1986] et grâce à trois clefs de détermination des graminées au stade végétatif [Limbourg ; Leconte ; INRA & ITCF, 1975].

1.2.2) Caractérisation de l'effet de l'arbre sur les conditions microclimatiques

Afin de caractériser l'ambiance microclimatique trois paramètres ont été mesurés : l'ouverture de la canopée, l'humidité et la température. Pour ces deux derniers paramètres des sondes ont été installées à un mètre du sol dans trois conditions différentes : une au niveau du quadrat à un mètre au Nord de l'arbre, une dans l'inter-rang, et une dans la zone témoin.

Le degré d'ouverture de la canopée a été calculé à partir de photos hémisphériques. L'appareil photo a été disposé à la verticale à 1m de haut et au centre de chaque quadrat de telle manière que le Nord corresponde à la bordure haute de la photo. L'appareil photo utilisé est un Canon 400D Digital EOS et l'objectif hémisphérique est un Lensbaby, 5.8mm, f/3.5, 185°. Les ISO sont réglés 800. La vitesse d'obstruction doit être réglée de manière à ce que l'exposition soit à de 0. La focale est soit à 5-6 soit à 8. Les photos ont été analysées grâce au logiciel de l'INRA « Can-Eye ».

1.3) Analyses des données

1.3.1) Effet de l'arbre sur les rendements

Les données étant issues, d'une période sur l'autre, des mêmes individus, il a été possible d'effectuer des modèles mixtes de type « lmer » sur les rendements. Ces derniers ont eu pour objectif de déterminer les effets croisés du traitement (agroforesterie/témoin) et de la période étudiée.

Etant exigeant en termes de qualité des données (quantité, absence de NA, conditions paramétriques respectées), ces modèles ont été complétés par des comparaisons de moyennes classiques.

Dans le cas où les conditions paramétriques étaient remplies, les comparaisons de moyennes ont été réalisées avec des test T de Student (deux modalités) ou par des ANOVA suivis par le test de Tukey avec la méthode HSD (plus de deux modalités). Dans le cas où les conditions paramétriques n'étaient pas remplies, les comparaisons de moyennes ont été réalisées avec le test de Wilcoxon (deux modalités) ou avec le test Kruskal-Wallis complétées par le test post-hoc de Pairwise basé sur le test de Wilcoxon (plus de deux modalités).

Les moyennes des rendements totaux (P1+P2) et des rendements à la P1 et à la P2 ont été ainsi comparés tout comme la variation de production entre la P1 et la P2.

$$\text{Variation de la production} = \frac{\text{Rendements P2} - \text{Rendements P1}}{\text{Rendements P1}}$$

Les facteurs étudiés ont été le traitement et la situation du quadrat. Si les tests post-hoc semblaient indiquer un effet de l'exposition ou de la distance à l'arbre, ces variables étaient alors traitées.

Afin de compléter ces analyses les taux en matières sèches ont aussi été étudiés (TMS moyens, TMS à la P1, TMS à la P2) avec les mêmes tests et d'après les mêmes variables.

Les conditions paramétriques ont été testées avec les tests de F (deux modalités) ou de Bartlett (plus de deux modalités) pour l'homogénéité des variances et avec les tests de Shapiro-Wilk (moins de 30 données par modalité) ou de Lilliefors pour la normalité. Si les données n'étaient réparties selon la loi normale (hypothèse initiale des tests rejetée), la répartition des résidus était testée de visu.

Des projections des rendements à l'échelle de la parcelle ont aussi été réalisées. Elles s'appuient sur un mécanisme d'attribution de rendements à une surface donnée, en l'occurrence un hectare, et à un espacement donné (celui de la plantation réel). Pour le site de Pomy, l'espacement étudié fut le 6m par 6m. Elles réalisent ainsi une extrapolation du quadrat à un secteur censé être représenté par ce dernier (fig. 8). Trois scénarios ont été envisagés : un moyen, un pessimiste (basé sur les minimums) et un optimiste (basé sur les maximums). Il est important donc de noter que ces résultats ne sont issus d'aucune statistique. Ce sont donc uniquement des tendances.

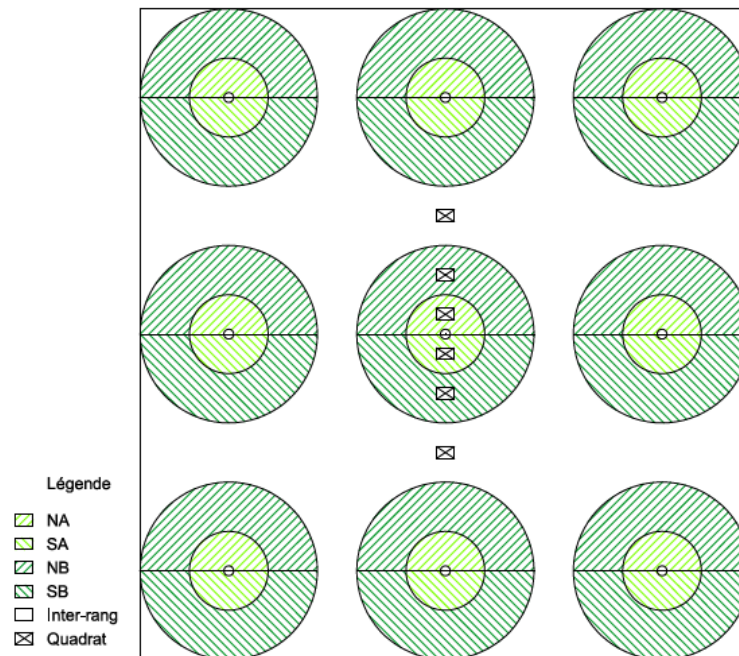


Figure 8 : Fonctionnement des projections des rendements

1.3.2) Effet de l'arbre sur la composition floristique

Afin de travailler sur des données qualitatives les coefficients de Braun Blanquet ont été transformés en recouvrement sans être ramenés au recouvrement total. C'est-à-dire que la somme des recouvrements des espèces d'un quadrat peut être différent de 100%. L'objectif de ce choix est de conserver des données proches des coefficients non transformés.

Les études n'ont été faites qu'à l'échelle du site. Trop de variables non maîtrisées par rapport au nombre de répétitions interviennent pour réaliser une étude à une échelle plus large.

Sur chaque quadrat a été calculée la richesse spécifique (nombre d'espèce présentes), l'indice de Shannon et l'indice de Pielou. L'indice de Shannon mesure l'entropie du système, il est régulièrement utilisé pour estimer la diversité d'une communauté bien qu'il soit sensible aux espèces rares. Il varie entre 0 (entropie nul, communauté très peu diversifiée) et le logarithme de la richesse spécifique (diversité maximale) [Francour ; Madani & Sayeh, 2002]. Son expression est la suivante :

$$H' = - \sum \left(\frac{n_i}{N} \right) \log \left(\frac{n_i}{N} \right)$$

Tel que n_i le recouvrement de l'espèce et N les recouvrements totaux.

Afin d'avoir une version corrigée de Shannon permettant une meilleure comparaison entre quadrats, l'équitabilité de Pielou a aussi été étudiée. Cette dernière ramène l'indice de Shannon à sa valeur maximale.

$$J' = \frac{H'}{\log S}$$

Ces deux indices sont fortement liés à la taille de l'échantillon et au milieu [Grall & Coïc, 2006]. Les échantillons étant de taille similaire et les milieux présumés comme proches, il semblerait que les biais des indices n'influent que faiblement sur les résultats.

Afin d'étudier l'effet des différentes modalités sur les paramètres étudiés (richesse, diversité, équitabilité) des comparaisons des moyennes ont été réalisées. Les variables étudiées étaient : le traitement, l'exposition et la distance à l'arbre et la situation générale du quadrat (annexe 1 tab. 6). Les tests utilisés ont été les mêmes que ceux employés pour l'étude des rendements.

Des Analyses en Composantes Principales ont été ensuite réalisées sur le recouvrement des différentes espèces. Des tests pour déterminer les espèces indicatrices ont aussi été effectués. Ces tests s'appuient sur l'indice de Dufrene-Legendre.

Les données ont été aussi regroupées par type fonctionnel. La typologie utilisée n'ayant pas été encore publiée il est impossible de la présenter complètement dans ce rapport. Les tableaux ci-dessous (tab. 4 et tab. 5) en présentent les principaux aspects.

Tableau 4 : Typologie des principales Poaceae [Theau et Pauthenet]

	Type A	Type B	Type b	Type C	Type D
Productivité	Prairies productives	Prairies productives	Prairies productives	Prairies peu productives	Prairies peu productives
Milieu	Fertile	Fertile à assez fertile	Assez fertile	Pacages maigres	Peu fertile
Type d'espèce	Espèces de taille intermédiaire	Espèces d'assez grandes tailles		Espèces de petites tailles	Espèces de taille moyenne
Floraison	900°Cj Précoce	1200°Cj Moyennement précoce	1600°Cj Tardive	1300°Cj Moyennement précoce	1800°Cj Très tardive
Durée de vie des feuilles	800°Cj	1000°Cj	800°Cj	1100°Cj	1200°Cj
Pratiques	Pâturage précoce et fréquent	Fauche précoce ou tardive	Espèce pour prés de fauche ou pâturage estival	Peu adapté aux pratiques de fauche, car peu de rendement et souvent dans les parcelles de pente	Estives et parcours à faible valeur fourragère
Espèces caractéristiques	Lolium perenne Anthoxanthum-odoratum Holcus lanatus	Dactylis glomerata Arrhenantherum-eliatum Festuca pratensis Bromus erectus	Poa trivialis Agrostis capillaris Pheum pratense	Briza media Cynosurus-cristatus	Brachypodium-sylvaticum Nardus stricta

Tableau 5 : Typologie des principales Dicotylédones hors Fabaceae [Theau et Pauthenet]

		Espèces basses (rosettes, couchées, dressées basses <40cm)		Espèces dressées (40 - 90 cm)		Espèce dressées (>90 cm)	
		Feuilles très couvrantes	Plantes dressées basses	Rapport feuille/tige élevé ou tige grêle	Rapport feuille tige fort ou tige à fort diamètre	Rapport feuille/tige élevé ou tige grêle	Rapport feuille tige fort ou tige à fort diamètre
Floraison de l'espèce	Précoce (<800°.j)	D1BF <i>Taraxacum officinalis</i>	D1BT <i>Veronica chamaedrys</i>	D1MF <i>Galium verum</i>	D1MT	D1HF <i>Rumex acetosa</i>	D1HT <i>Anthriscus sylvestris</i>
	Moyenne (800 - 1200°.j)	D2BF <i>Polygonum persicaria</i>	D2BT <i>Rhinanthus alectorolophus</i>	D2Mf <i>Ranunculus acris</i>	D2MT <i>Tragopogon pratensis</i>		D2HT <i>Crepis biennis</i>
	Tardive (>1200°.j)		D3BT	D3MF <i>Achillea millefolium</i>	D3MT <i>Knautia arvensis</i>		D3HT <i>Heracleum sphondylium</i>

Les données par type fonctionnel ont été traitées exactement comme les données par espèce (analyses sur la diversité et analyses multivariées).

1.3.3) Caractérisation du microclimat

Des comparaisons de moyennes ont été réalisées avec les degrés d'ouverture de la canopée. Les modalités d'analyses statistiques et les modalités étudiées sont les mêmes que pour les paramètres botaniques (richesses, diversités, cf part. 1.3.2).

N'ayant pas de répétition (une seule sonde par modalité étudiée) aucune analyse statistique n'a pu être réalisée sur les données de température et d'humidité. Les deux jeux de données ont été traités à l'aide de graphiques mensuels représentant l'évolution au cours de la journée des températures et des taux d'humidité par heure.

Les courbes ont été réalisées via le package *ggplot2* du logiciel R studio [R Core Team, 2017] qui permet de produire des courbes de tendances avec la méthode des moyennes quadratiques basées sur la création de régressions locales.

II) Résultats

2.1) Effet de l'arbre sur les rendements fourragers

2.1.1) Résultats des mesures de terrain

- Résultat sur la productivité

Les modèles mixtes n'ont pu être réalisés sur le site de Pomy et de Theix à cause de présence de NA dans les jeux de données et sur le site de Bonnefont faute de données à la P1. Le modèle mixte sur le site de Lalosse n'a pas donné de résultats significatifs.

L'étude des rendements en tonnes de matière sèche par hectare de la première période de prélèvement (P1) montre, sur le site de Lalosse, des rendements plus faibles en agroforesterie par rapport à la zone témoin (0,6 contre 1,2 t/ha, fig. 9)). Un écart de rendement significatif a aussi été enregistré sur le site de Theix entre la zone en agroforesterie de haut jet (0,5 t/ha), la zone taillée en têtard (1,2 t/ha) et la zone témoin (1,6 t/ha, fig. 9). Aucune différence n'a été trouvée sur le site de Pomy.

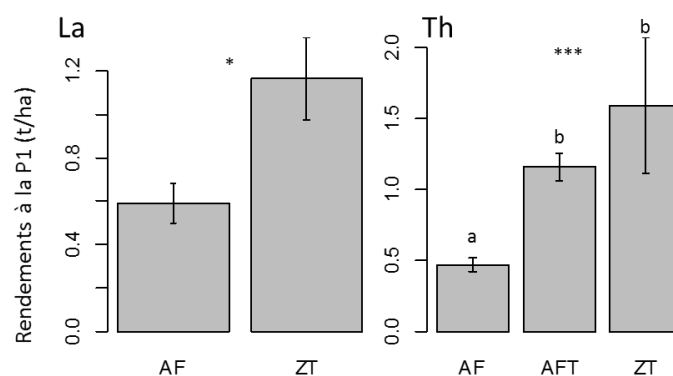


Figure 9 : Effet des différentes modalités (AF : agroforesterie en haut jet, AFT : agroforesterie en têtard, ZT : zone témoin) sur les rendements en tonnes de matière sèche par hectare de la première période de prélèvement (P1) sur les sites de **Lalosse** (La) et de **Theix** (Th). (T-test, p -value = 0,0335 ; Kruskal-Wallis, p -value = 8.10-7)

Lors de la deuxième période de prélèvement (P2) des rendements significativement plus faibles en agroforesterie ont été relevés sur le site de Bonnefont, de Pomy et de Theix (fig. 10). Ces différences s'élèvent, pour les deux premiers sites, à respectivement, environ 1t/ha et 0,6t/ha. Pour le site de Theix l'écart de rendement entre la zone de haut jet et la zone témoin est de 2,59t/ha. Aucune différence significative n'a été trouvée sur le site de Lalosse.

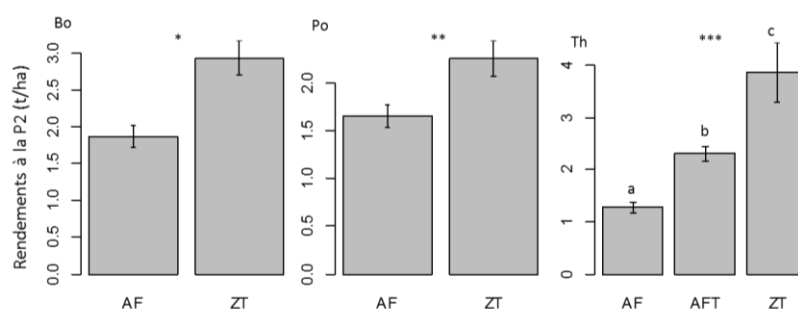


Figure 10 : Effet de l'agroforesterie (AF) par rapport à la zone témoin (ZT) sur les rendements en tonnes de matière sèche par hectare de la deuxième période de prélèvement (P2) sur les sites de **Bonnefont** (Bo) et de **Pomy** (Po). (T-test, p -value = 0,0053 ; T-test, p -value = 0,0278 ; Kuskal-Wallis, p -value = 2.10-6)

Au domaine de Lalosse aucune différence significative entre les rendements totaux en agroforesterie et en prairie classique. Sur le site de Pomy, une baisse significative de 1t/ha a été mise en évidence (fig. 11) alors que l'écart de productivité à Theix entre le couvert sous les arbres de haut jet et la prairie sans arbre est de 3,7t/ha.

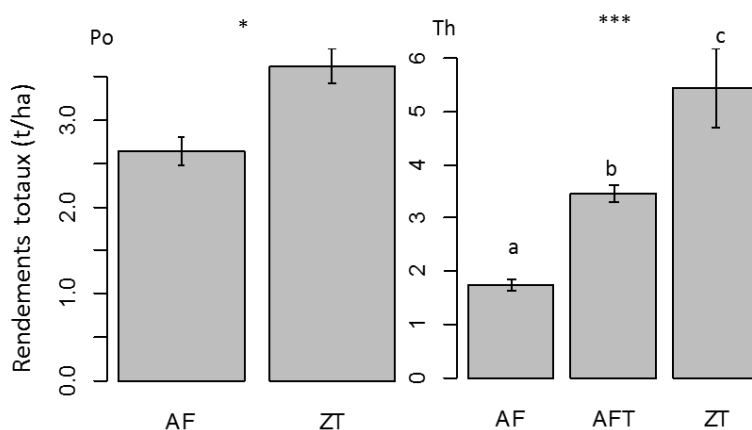


Figure 11 : Effet de l'agroforesterie (AF) par rapport à la zone témoin (ZT) sur les rendements totaux en tonse de matière sèche par hectare sur le site de **Pomy**. (T-test, p -value = 0,0108 ; Kruskal-Wallis, p -value = 2.10-7)

D'après les résultats sur la variation de rendements entre la P1 et la P2, il semblerait que, sur le site de Lalosse, l'agroforesterie bénéficie d'une repousse nettement supérieure à celle de la zone témoin (+377% +/-285 contre +63% +/-91, fig. 12).

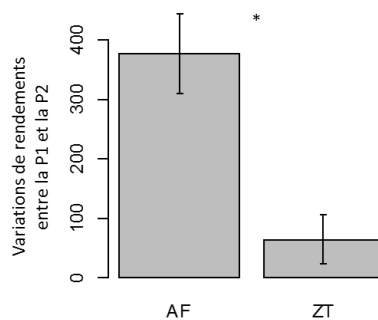


Figure 12 : Variations de rendements entre les deux périodes d'étude sur le site de **Lalosse** (Wilcoxon, $p\text{-value} = 0,0151$)

Les comparaisons sur les autres sites n'ont relevé aucune différence significative. Dans tous les cas étudiés, les récoltes à la P2 ont été en moyenne supérieures à celles de la P1. Néanmoins, il existe une grande disparité des données. Par exemple sur le site de Theix, les variations vont de +726% à -100%.

Les comparaisons entre les positions n'ont soit, pas donné de résultats significatifs, soit engendré des problèmes de calcul avec les tests post-hoc utilisés.

- Résultats sur la teneur en matière sèche

L'agroforesterie semble ne pas induire de modification sur les teneurs en matière sèche (TMS) des fourrages dans la majorité des cas. Seul le site de Lalosse à la P2 et le site de Theix semblent être concernés par ce phénomène. A Lalosse, à la P2, la différence se situe entre la zone témoin et de l'inter-rang (27% contre 23%, fig. 13). Sur le site de Theix des différences ont été trouvées aux deux périodes d'étude. A la P1 les différences se situent entre le couvert sous les arbres en haut jet (23%) et sous les arbres têtards (27%, fig. 14). Cette différence semble être portée par la position SA au sein de l'agroforesterie en haut jet (16%, fig. 14). A la P2, la différence se situe entre la zone témoin (23%) et les modalités agroforestières (haut jet (17%) et têtard (17%), fig. 15). Ces résultats conduisent à une différence significative sur les taux de matière sèche moyens entre la zone témoin (25%) et l'agroforesterie en haut jet (20%, fig. 15).

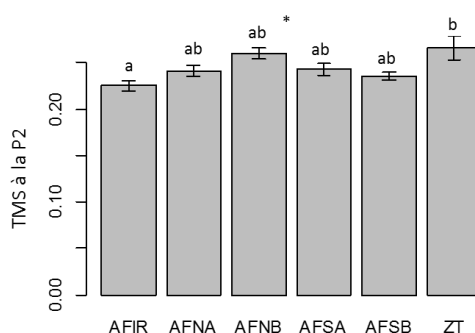


Figure 13 : Différence de teneur en matière sèche des fourrages à la deuxième période de prélèvement (P2) entre les différentes positions au sein de la modalité agroforestière et la zone témoin sur le site de **Lalosse** (ANOVA, $p\text{-value} = 0,0176$)

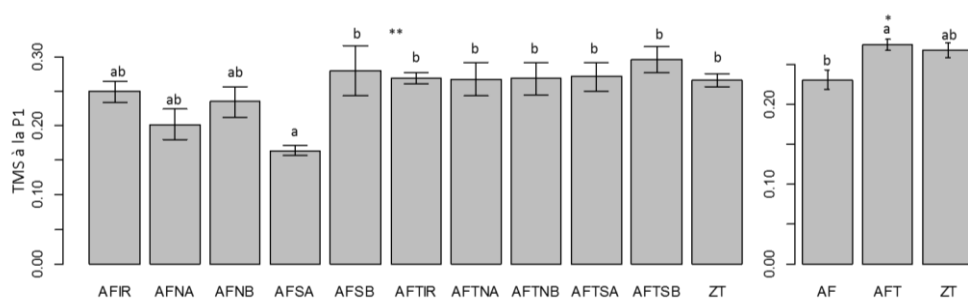


Figure 14 : Différence de teneur en matière sèche des fourrages à la première période de prélèvement (P1) entre les différentes positions au sein de la modalité agroforestière et la zone témoin sur le site de **Theix** (ANOVA, p -value = 0,0037 ; Kruskal-Wallis, p -value = 0,0140)

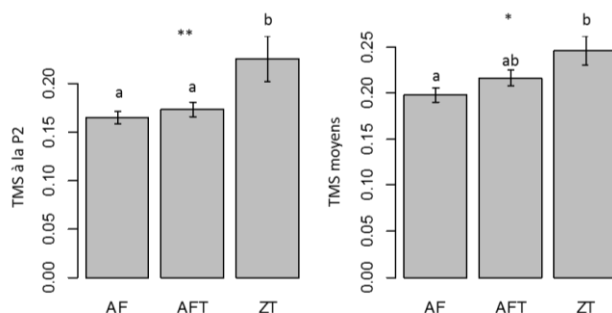


Figure 15 : Différence de teneur en matière sèche des fourrages à la deuxième période de prélèvement (P2) et moyenne entre les différentes modalités agroforestières et la zone témoin sur le site de **Theix** (ANOVA, p -value = 0,0036 ; ANOVA, p -value = 0,0253)

L'ensemble des résultats des analyses statistiques sont présentés en annexe 2.

2.1.2) Extrapolation à l'échelle de la parcelle

L'ensemble des résultats présentés sont des projections issues d'extrapolation du jeu de données analysées dans la partie précédente. Il est important de rappeler que ces résultats ne sont pas validés statistiquement.

D'après les projections (fig. 16), il semblerait que les zones témoins soit systématiquement plus productives que les zones agroforestières. Les différences sont particulièrement prononcées sur le site de Theix de deux tonnes pour le scénario moyen et de cinq tonnes pour le scénario optimiste. Seule les projections sur le site de Lalosse tendent à conduire dans les trois scénarios à des résultats équivalents entre l'agroforesterie et la zone témoin et ceci sûrement dû aux rendements de deuxième période (P2). Les scénarios pessimistes de Theix et de Pomy conduisent aussi à des résultats similaires mais ces projections sont à prendre avec précaution car elles s'appuient uniquement sur des données extrêmes.

Ces résultats tendent à aller dans le sens des comparaisons de moyennes réalisées précédemment.

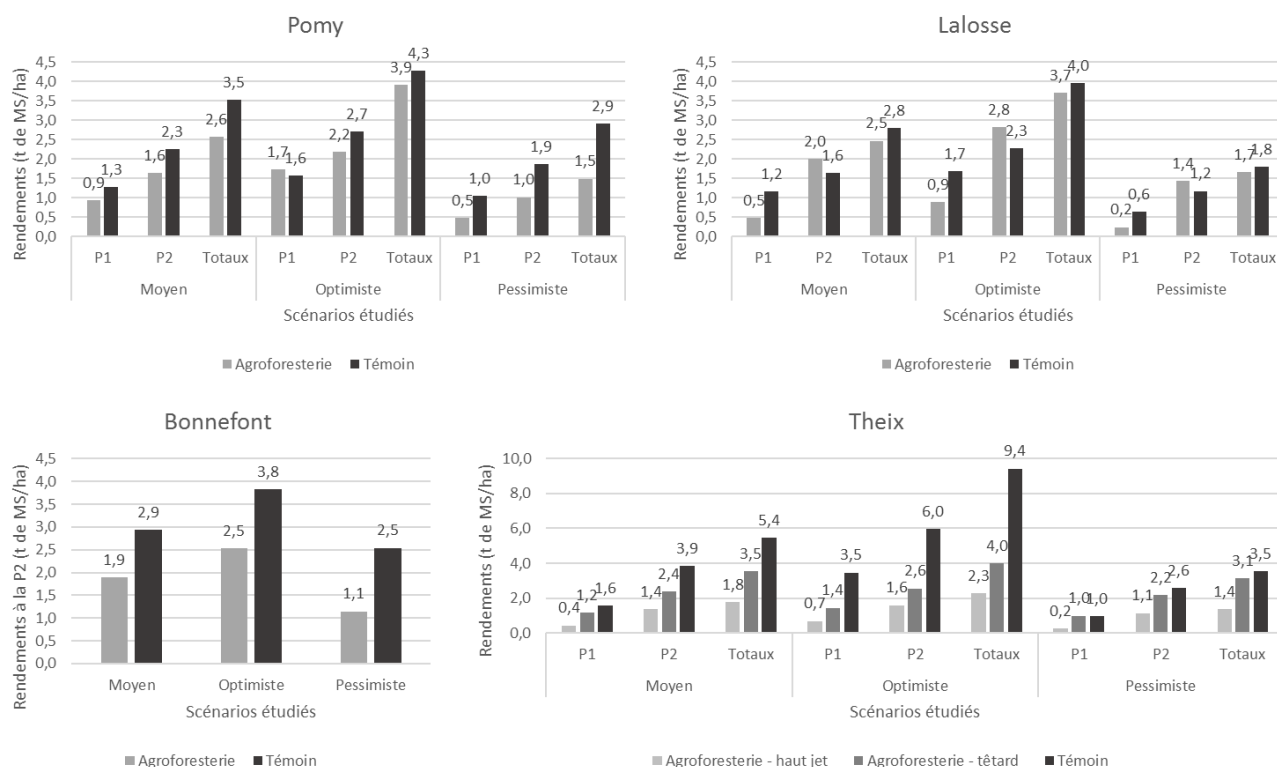


Figure 16 : Résultats des projections des rendements à l'échelle de la parcelle.

2.2) Effet de l'arbre sur la botanique des prairies

2.2.1) Effet sur la composition botanique

- Effet sur la richesse spécifique et la diversité

L'arbre semble avoir un effet variable sur la richesse spécifique (fig. 17). Dans les deux sites du sud, il induit une augmentation de la richesse spécifique alors que sur le site de Bonnefont aucune différence significative avec la zone témoin n'a été relevée. Sur le site de Theix, la zone sous les arbres étêtés présente une richesse similaire à la zone témoin. La zone sous les arbres de haut jet est significativement moins riche que les deux autres.

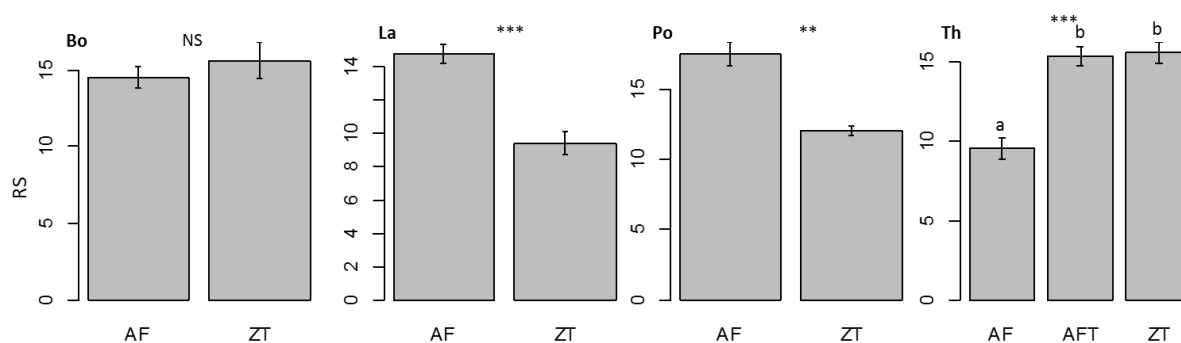


Figure 17 : Différence de richesse spécifique (RS) entre les différentes modalités étudiées (AF : agroforesterie en haut jet, AFT : agroforesterie en têtard, ZT : zone témoin) au sein des différents sites d'études (Bonnefont, Lalosse, Pomy, Theix) (T-Test, p -value = 0,4559 ; T-Test, p -value = 8,9.10⁻⁵ ; Wilcoxon, 3,5.10⁻⁶ ; ANOVA, 1,3.10⁻⁷)

Les zones d'inter-rang semblent, dans la majorité des cas, tirer la richesse spécifique des zones agroforestières vers le haut (fig. 18)

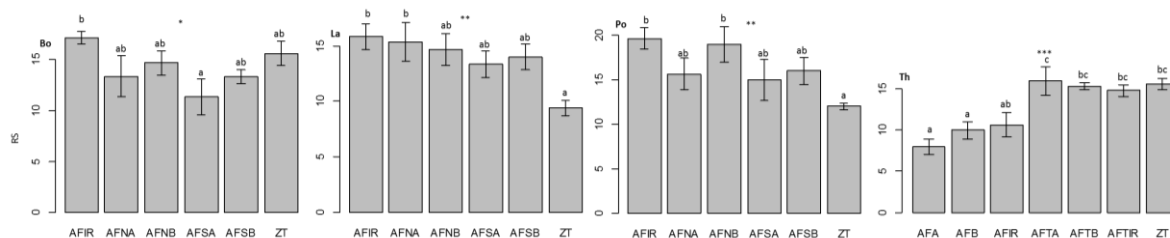


Figure 18 : Richesse spécifique (RS) des communautés des différents sites d'études (**Bonnefont**, **Lalosse**, **Pomy**, **Theix**) en fonction de leur emplacement (ANOVA, p -value = 0,037 ; ANOVA, p -value = 0,0081 ; ANOVA, p -value = 0,0069 ; ANOVA, p -value = 7,6.10⁻⁶)

Les résultats sur la diversité suivent ceux de la richesse (fig. 19). Les portions agroforestières de Lalosse et de Pomy sont plus diversifiées que leurs témoins, les communautés sous les arbres de haut jet de Theix sont moins diversifiées que celles du témoin et de la zone sous les têtards. Seul le site de Bonnefont change de logique : la végétation en agroforesterie est moins diversifiée que dans la zone témoin. L'équitabilité de Piérou moins sensible (ramené sur un total observé), les comparaisons ont donné des résultats significatifs que sur le site de Bonnefont.

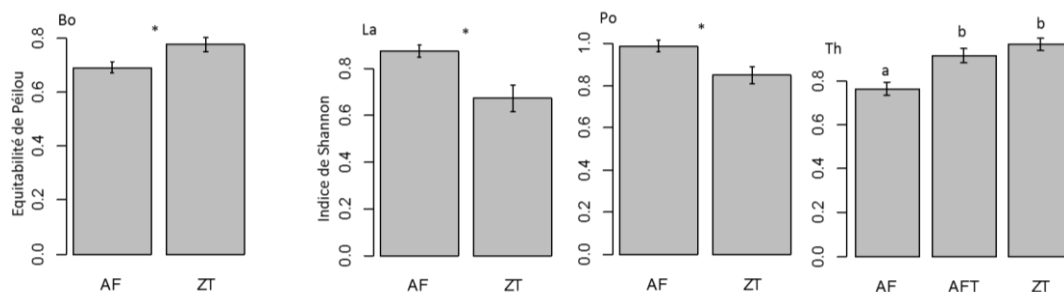


Figure 19 : Différence de diversité (indice de Shannon) ou d'équitabilité (équitabilité de Piérou) entre les différentes modalités étudiées (AF : agroforesterie en haut jet, AFT : agroforesterie en têtard, ZT : zone témoin) au sein des différents sites d'études (**Bonnefont**, **Lalosse**, **Pomy**, **Theix**). (T-test, p -value = 0,0273 ; T-test, p -value = 0,0195 ; T-test, p -value = 0,0214 ; ANOVA, p -value = 0,0008)

Les comparaisons entre les différentes positions de quadrats (fig. 20) tendent à préciser les résultats précédents. Sur le site de Bonnefont les quadrats au sud des arbres sont significativement moins diversifiés que la zone témoin et sur le site de Pomy l'inter-rang semble porter les différences avec le témoin. Sur le site de Lalosse la position B est un intermédiaire entre l'agroforesterie et le témoin et à Theix se sont les quadrats proches du tronc en zone de haut jet qui sont les moins diversifiés.

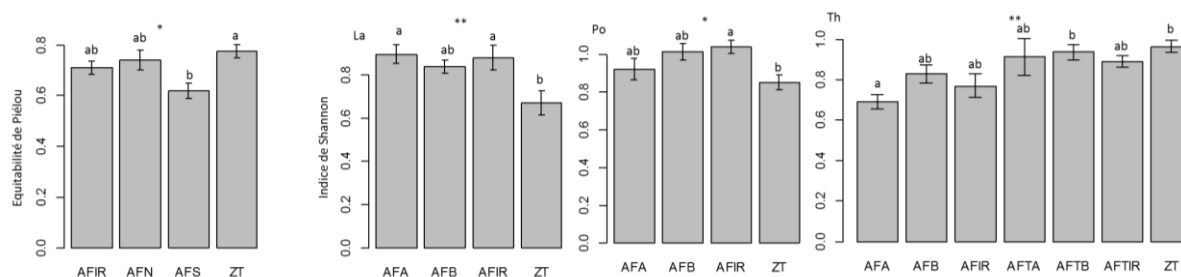


Figure 20 : Mesure de la diversité (indice de Shannon ou équitabilité de Pielou) des communautés des différents sites d'études (**B**onnefont, **L**alosse, **P**omy, **T**heix) en fonction de leur emplacement. (ANOVA, p -value = 0,013 ; ANOVA, p -value = 0,0182 ; ANOVA, p -value = 0,036 ; ANOVA, p -value = 0,0074)

- Effet sur la composition floristique

Les ellipses des zones agroforestières sur les plans factoriels formées à partir des deux premières Analyses en Composantes Principales semblent indiquer une relative similarité des communautés avec les zones témoins (fig. 21). L'analyse graphique tant à confirmer la grande diversité des communautés au sein des modalités agroforestières. Seules les prairies du site du Bonnefont semblent tendre vers une dissimilarité avec la zone témoin. L'ACP sur le site de Theix confirme la similarité entre la zone témoin et la zone avec les arbres têtards ainsi que le caractère particulier de la zone avec les arbres en haut jet. Les distances à l'arbre ainsi que l'exposition n'apportent que très rarement des informations nettes sur la répartition des espèces au sein des modalités agroforestières.

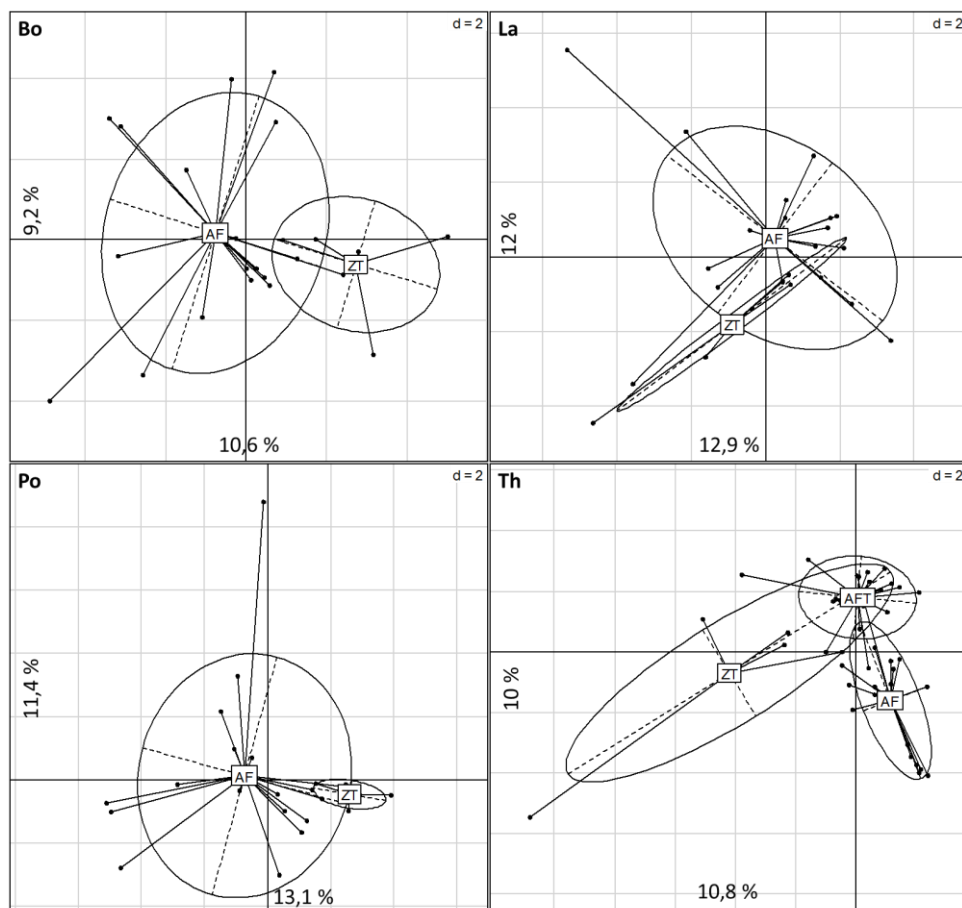


Figure 21 : Plans factoriels formés par les deux premières dimensions des Analyses en Composantes Principales sur le recouvrement (traduction des coefficients de Braun-Blanquet) des espèces des différents sites étudiées (**B**onnefont, **L**alosse, **P**omy, **T**heix). Regroupement des données selon les modalités étudiées (AF : agroforesterie en haut jet, AFT : agroforesterie en têtard, ZT : zone témoin).

Les regroupements par position révèlent une certaine logique (fig. 22, les quadrats à la même position sont proches sur le plan factoriel) mis à part quelques contre exemples (AFSB à Bonnefont et AFTSA à Theix). Les inter-rang semblent être la position qui regroupe la plus grande variabilité.

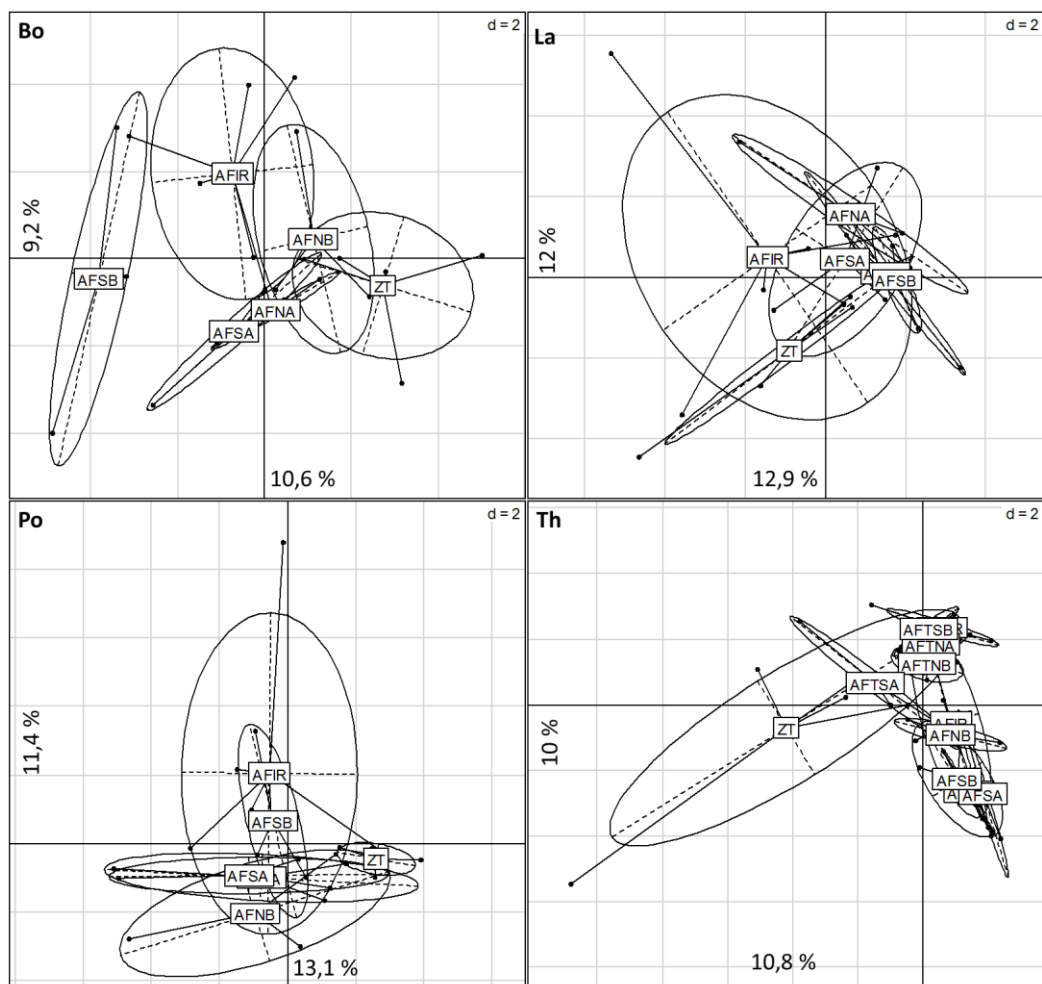


Figure 22 : Plans factoriels formés par les deux premières dimensions des Analyses en Composantes Principales sur le recouvrement (traduction des coefficients de Braun-Blanquet) des espèces des différents sites étudiées (**B**onnefont, **L**alosse, **P**omy, **T**heix). Regroupement des données selon les positions au sein de l'exclot.

Des effets exclots ont été par contre mis en évidence (fig. 23) sur le site de Pomy (exclots AF1) et de Theix (gradient entre les exclots en agroforesterie de haut jet). Il se pourrait aussi qu'il existe des différences entre exclots à Bonnefont et à Lalosse mais les résultats sont moins certains.

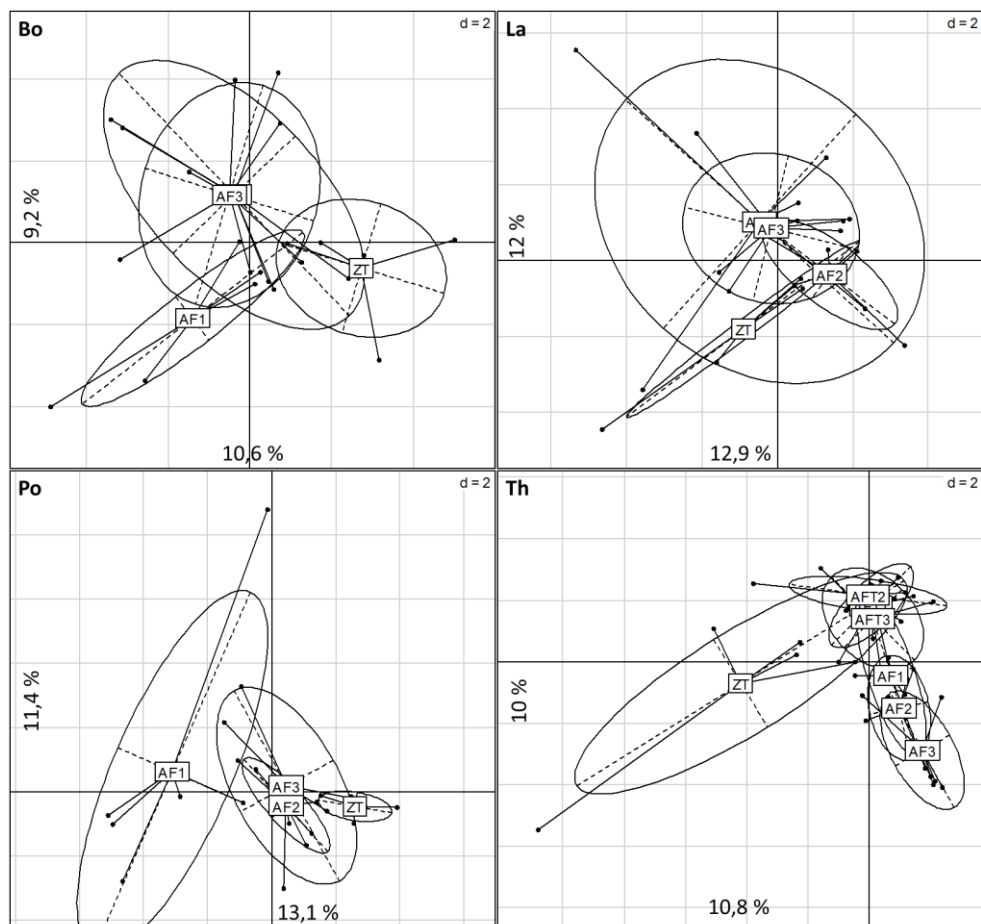


Figure 23 : Mise en évidence d'effets locaux à partir des plans factoriels formés par les deux premières dimensions des Analyses en Composantes Principales sur le recouvrement (traduction des coefficients de Braun-Blanquet) des espèces sur trois des sites étudiées (**B**onnefont, **P**omy, **T**heix).

Les graphiques des variables ne permettent que dans deux cas de discriminer nettement des assemblages végétaux. Sur le site de Lalosse deux groupements de prairies semblent pouvoir être identifiés, l'un correspond à la zone témoin et l'autre est transversale à la zone en agroforesterie (fig. 24). Les résultats sur le site de Theix sont plus nets (fig. 25). Un groupement de prairie caractérise la zone avec les arbres têtards et une partie de la zone témoin, un autre groupement de prairie décrit la zone témoin et enfin un groupement d'espèces plus rudérales caractérise la zone avec les arbres en haut jet. L'ensemble des graphiques des variables sont présentés en plus haute qualité en annexe 3.

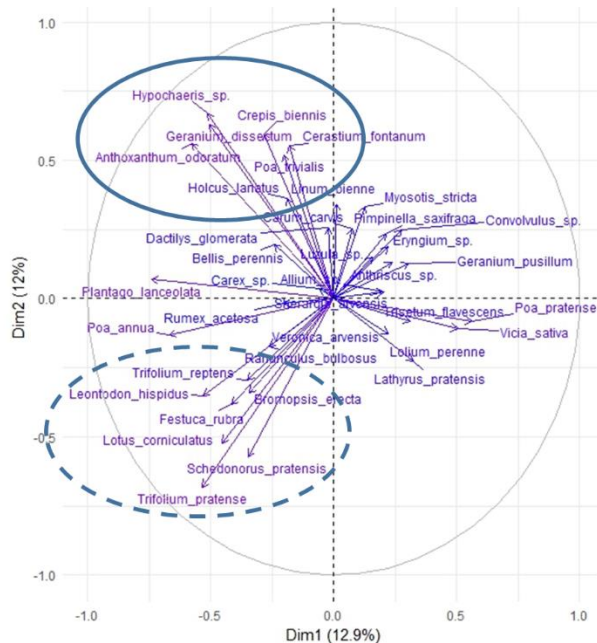


Figure 24 : Graphique des variables sur le premier plan factoriel de l'Analyse en Composante Principale sur les abondances des espèces de la prairie du site de Lalosse. En trait plain : groupement lié à l'agroforesterie, en pointillé : groupement lié à la zone témoin

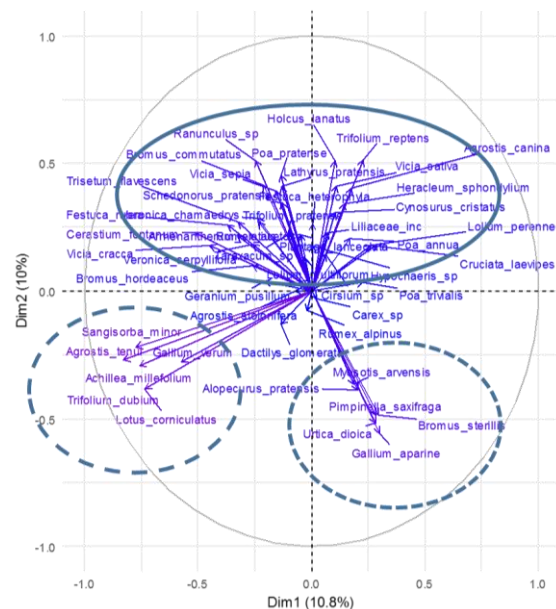


Figure 25 : Graphique des variables sur le premier plan factoriel de l'Analyse en Composante Principale sur les abondances des espèces de la prairie du site de Theix. En trait plain : groupement lié à l'agroforesterie en têtard et la zone témoin, en pointillés larges : groupement lié à la zone témoin, en pointillés sérés : groupement lié à l'agroforesterie en haut jet.

Les pourcentages d'informations portés par les plans factoriels restent compris entre 20 et 25%, ce qui limite le commentaire des résultats.

Les analyses sur les indices de Dufrene-Legendre (annexe 4, tab. 8, 9, 10) n'apportent généralement pas d'informations permettant de confirmer les hypothèses d'études. Elles s'appuient régulièrement sur des espèces peu abondantes et faiblement indicatrices quant à la qualité de l'herbage ou du milieu. Elles ont néanmoins permis de confirmer la particularité du secteur au sud des arbres du site de Bonnefont et de confirmer la rudéralisation de la zone avec les arbres de haut jet sur le site de Theix. Elles ont aussi permis de mettre en évidence sur deux sites (Bonnefont et Lalosse) que *Poa trivialis* semble mieux se développer en agroforesterie, que *Trifolium reptens* se développe mieux en zone têtard sur Theix et que deux graminées (*Gaudinia fragilis* et *Schedonorus pratensis*) semblent inféodées à la zone témoin de Bonnefont. Mais ces deux derniers résultats ne sont pas extrapolables car ils ne se retrouvent pas sur les autres sites.

2.2.2) Traduction de ces effets sur la composition fonctionnelle

Sur les sites du sud aucune différence significative n'a été trouvée sur la richesse ou la diversité typologique. Sur le site de Bonnefont les zones proches de l'arbre (NA, NB, SA, SB) semblent moins diversifiées que l'inter-rang et la zone témoin (fig. 26). Sur le site de Theix la zone têtardisée et la zone témoin sont plus riches que la zone avec les arbres de haut jet (fig.26).

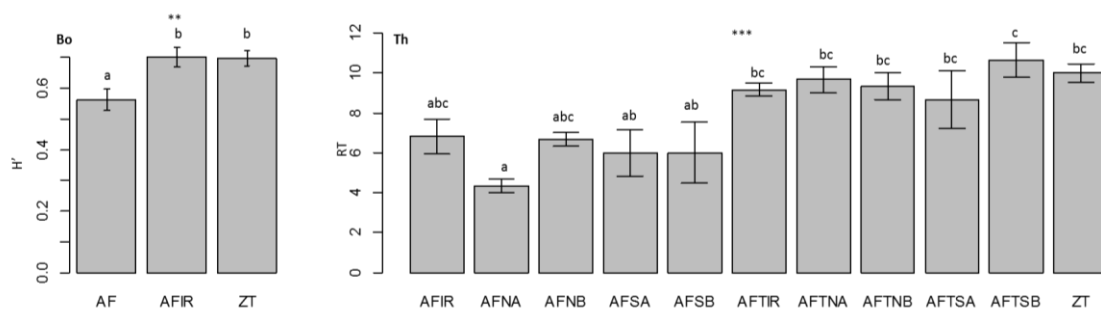


Figure 26 : Résultats sur l'effet de l'agroforesterie sur la diversité fonctionnelle de Shannon (H') sur le site de **Bonnefont** et sur la richesse fonctionnelle (RT) sur le site de **Theix**. (ANOVA, p -value = 0,0138 ; ANOVA, p -value = 7,1.10-6).

Le passage à l'échelle du type fonctionnel semble, sur les premiers plans factoriels des ACP étudiées, accentuer les similarités entre les zones témoins et les zones agroforestières (fig. 27).

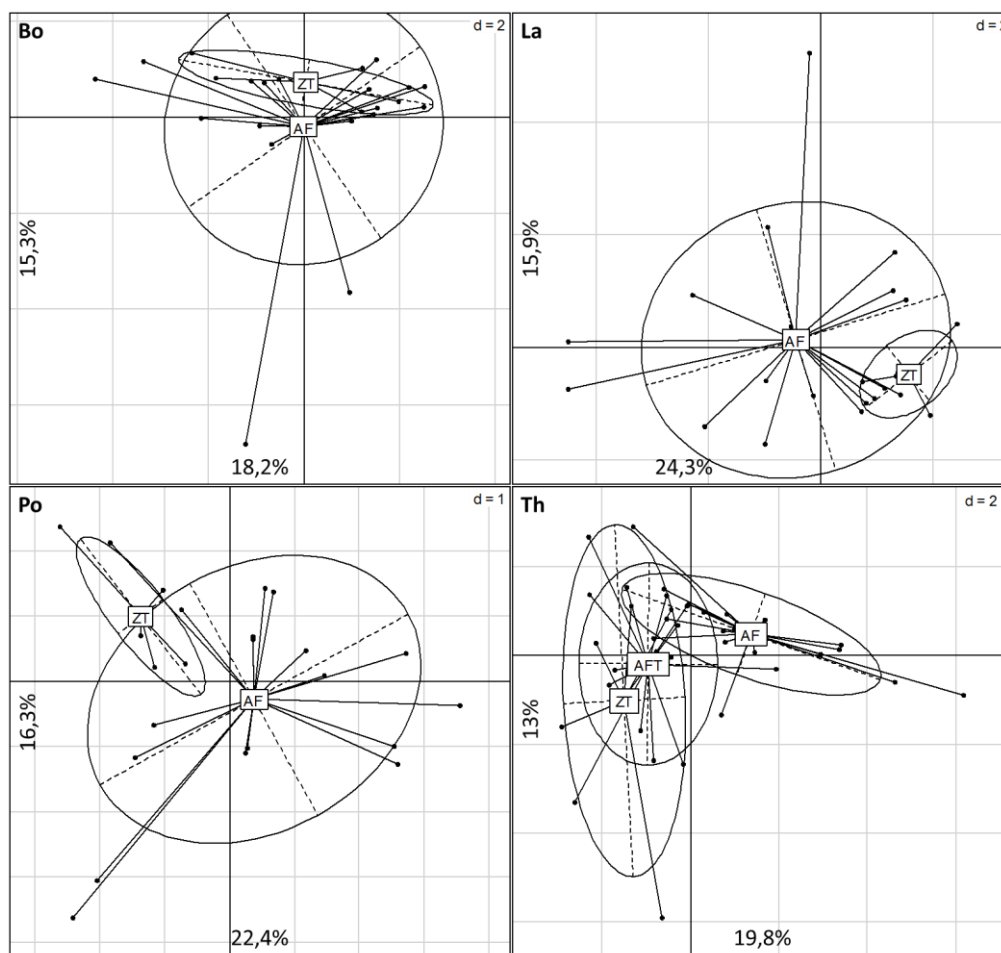


Figure 27 : Plans factoriels formés par les deux premières dimensions des Analyses en Composantes Principales sur le recouvrement (traduction des coefficients de Braun-Blanquet) des types fonctionnels des différents sites étudiées (**Bonnefont**, **Lalosse**, **Pomy**, **Theix**). Regroupement des données selon les modalités étudiées (AF : agroforesterie en haut jet, AFT : agroforesterie en têtard, ZT : zone témoin).

Les analyses sur les indices de Dufrene-Legendre (tab 5, annexe 4, tab. 11 et 12) portent généralement sur des types minoritaires. Les types fonctionnels principaux, donnant le type fonctionnel de la prairie, ne semblent pas affectés sur à Lalosse et à Theix. Le recouvrement en Fabaceae n'est considéré comme indicateur qu'à Theix où il caractérise les prairies sous les

arbres têtards. Sur le site de Pomy, la comparaison des recouvrements moyens en légumineuses donne un résultat significatif en faveur de l'agroforesterie (fig. 28).

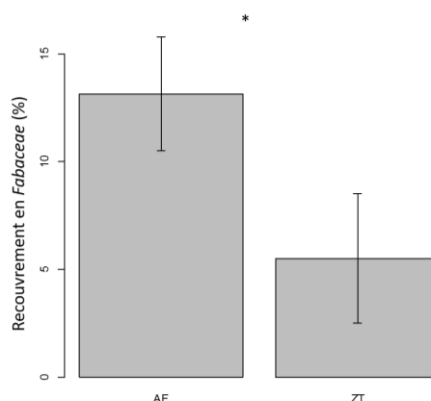


Figure 28 : Différence en recouvrement de Fabaceae entre la zone témoin et l'agroforesterie sur le site de **Pomy** (attention : recouvrement issue de la transformation du coefficient de Braun Blanquet)

Tableau 6 : Synthèse des recouvrements des types fonctionnels. En italique : les trois types principaux, en gras : les types indicateurs

Type fonctionnel		Bonnefont		Lalosse		Pomy		Theix		
		AF	ZT	AF	ZT	AF	ZT	AF	AFT	ZT
Dicotylédones et autres	D1B	3	2	3	3	2	2	3	3	3
	D1H	2	3	2	0	0	0	3	2	3
	D1M	3	3	0	0	0	0	5	4	15
	D2B	1	5	1	0	2	2	0	3	3
	D2H	9	0	3	0	1	0	0	0	0
	D2M	8	1	4	2	2	3	11	3	3
	D3H	0	0	0	0	0	0	0	3	0
	D3M	4	1	3	1	3	1	0	3	6
	Non typée	2	3	6	5	3	2	26	10	0
Graminées	A	7	6	7	3	12	11	16	17	8
	B	6	9	17	24	4	13	6	4	8
	b	16	13	10	7	15	10	6	10	12
	C	18	20	3	3	8	7	15	8	18
	Ec	3	0	0	0	0	0	3	14	0
	Es	11	3	8	11	4	10	3	10	18
	Non typée	15	26	0	0	17	0	13	5	6
	Graminoïdes	0	3	4	3	1	0	0	33	0
	Légumineuses	3	3	3	7	4	5	14	10	4

2.3) Caractérisation des conditions microclimatiques

2.3.1) Interception de lumière par la canopée

Les données ne remplissant dans aucun cas les conditions paramétriques, seulement des tests sur les rangs ont été utilisés. Ces tests étant sensibles aux ex-aequo et semblant être plus conservateurs, les post-hoc sur les situations n'ont donné aucun résultat significatif bien que le test principal (ici le test de Kruskal-Wallis) en ait repéré. Comme attendu les zones agroforestières ont un degré d'ouverture de la canopée nettement inférieur que les zones témoins (fig. 29).

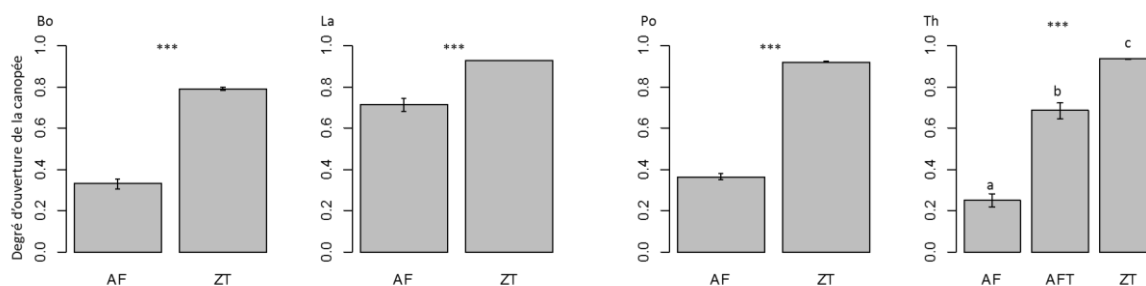


Figure 29 : Effet de l'agroforesterie sur le degré d'ouverture de la canopée sur les différents sites d'études (**Bonnefont, Lalosse, Pomy, Theix**). (Wilcoxon, p -value = 0,0008 ; Wilcoxon, p -value = 5,9.10-5 ; Wilcoxon, p -value = 0,0008 ; Kruskal-Wallis, p -value = 6,4.10-6)

Les tests sur les différentes distances à l'arbre et sur les expositions (nord/sud) n'ont permis que dans un cas (Lalosse) de discriminer l'inter-rang des autres traitements agroforestiers (fig. 30). Les autres comparaisons n'ont servi qu'à confirmer les différences entre agroforesterie et zone témoin.

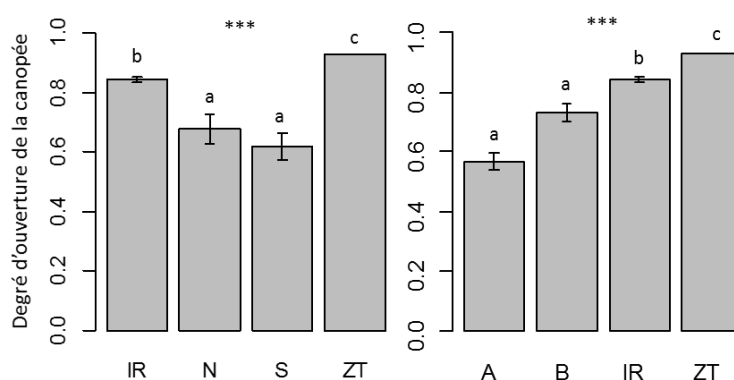


Figure 30 : Différence de degré d'ouverture de la canopée (%) en fonction de l'exposition et de la distance à l'arbre sur le site de **Lalosse** (Kruskal-Wallis, p -value = 0,0003 ; Kruskal-Wallis, p -value = 0,0001)

2.3.2) Caractérisation des températures et de l'humidité en fonction de la distance à l'arbre

La sonde à un mètre de l'arbre sur le site de Pomy a eu des dysfonctionnements majeurs et répétés. Les données de ce site ne seront donc pas présentées.

Le dispositif expérimental sur le site de Bonnefont a dû être démonté durant l'hiver. Les données ont donc démarré sur site qu'en avril.

Les données sur le site de Lalosse et de Theix semblent indiquer un comportement différent des températures entre la période froide (hiver – début printemps) et la période chaude (fin de printemps – été). En période froide, la zone à un mètre de l'arbre semble plus chaude le jour et la nuit que la zone d'inter-rang (fig. 31 et 32). Le comportement de la zone témoin semble variable entre les deux sites. A Theix elle est plus chaude que la zone à un mètre de l'arbre le jour comme la nuit (fig. 31) alors qu'à la Lalosse elle est aussi chaude que la zone à un mètre de l'arbre le jour et plus froide la nuit (fig. 32).

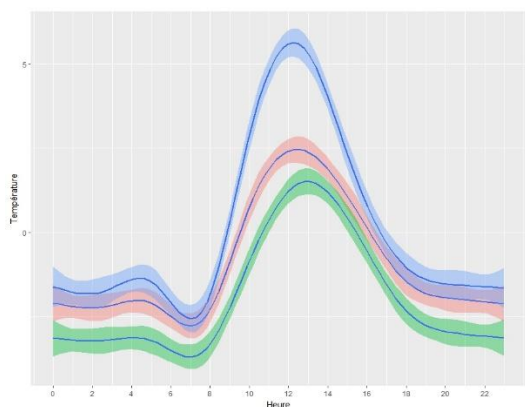


Figure 31 : Evolution des températures (°C) au cours de la journée au sein des différentes modalités étudiées (bleu : zone témoin, rouge : sonde à un mètre de l'arbre, vert : sonde dans l'inter-rang). Tendances sur les données du mois de janvier sur le site de **Theix**

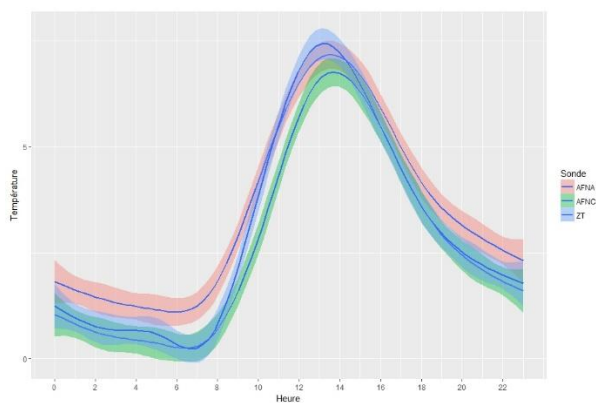


Figure 32 : Evolution des températures (°C) au cours de la journée au sein des différentes modalités étudiées (bleu : zone témoin, rouge : sonde à un mètre de l'arbre, vert : sonde dans l'inter-rang). Tendances sur les données du mois de janvier sur le site de **Lalosse**

Lors de la période estivale, plus la sonde est éloignée de l'arbre, plus cette dernière semble subir de gros écarts entre le jour et la nuit (fig. 33, 34, 35). En effet, la sonde à un mètre de l'arbre semble enregistrer des températures plus fraîches la journée que les deux autres. La sonde dans l'inter-rang semble enregistrer des données intermédiaires entre la zone témoin et la sonde proche de l'arbre. Ce phénomène est plus ou moins marqué selon les sites. Sur le site de Lalosse il semblerait que les températures nocturnes à proximité de l'arbre soient plus chaudes que les autres. Néanmoins, ce phénomène n'a été observé que sur ce site.

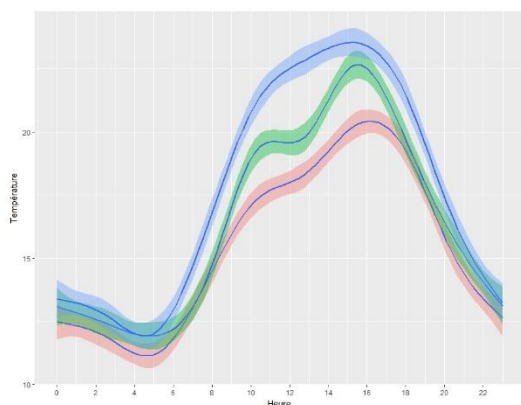


Figure 33 : Evolution des températures (°C) au cours de la journée au sein des différentes modalités étudiées (bleu : zone témoin, rouge : sonde à un mètre de l'arbre, vert : sonde dans l'inter-rang). Tendances sur les données du mois de juin sur le site de **Theix**

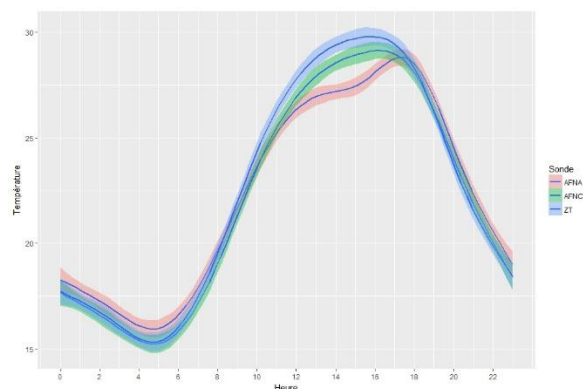


Figure 34 : Evolution des températures (°C) au cours de la journée au sein des différentes modalités étudiées (bleu : zone témoin, rouge : sonde à un mètre de l'arbre, vert : sonde dans l'inter-rang). Tendances sur les données du mois de juin sur le site de **Lalosse**

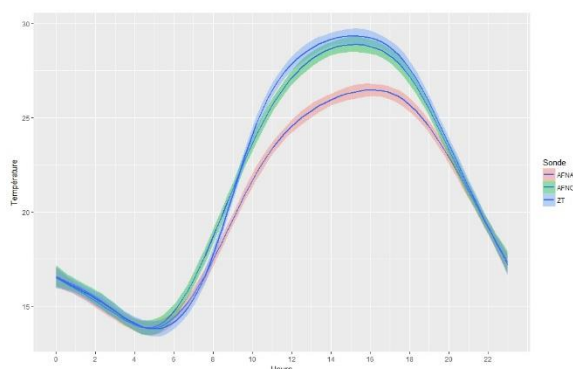


Figure 35 : Evolution des températures (°C) au cours de la journée au sein des différentes modalités étudiées (bleu : zone témoin, rouge : sonde à un mètre de l'arbre, vert : sonde dans l'inter-rang). Tendances sur les données du mois de juillet sur le site de **Bonnefont**

Il semble exister une période de basculement entre ces deux logiques où les températures dans les trois situations sont similaires. Cette période semble intervenir vers le mois d'avril à Bonnefont et à Lalosse (fig. 36 et 37). Le point de basculement ne semble opérer uniquement qu'entre la zone à un mètre de l'arbre et l'inter-rang sur le site de Theix et plus tôt dans la saison (mars) (fig. 38).

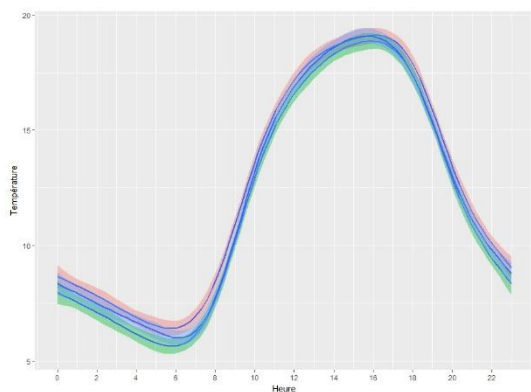


Figure 36 : Evolution des températures (°C) au cours de la journée au sein des différentes modalités étudiées (bleu : zone témoin, rouge : sonde à un mètre de l'arbre, vert : sonde dans l'inter-rang). Tendances sur les données du mois d'avril sur le site de **Lalosse**

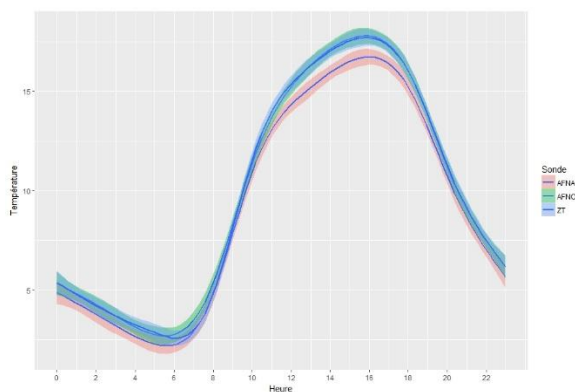


Figure 37 : Evolution des températures (°C) au cours de la journée au sein des différentes modalités étudiées (bleu : zone témoin, rouge : sonde à un mètre de l'arbre, vert : sonde dans l'inter-rang). Tendances sur les données du mois d'avril sur le site de **Bonnefont**

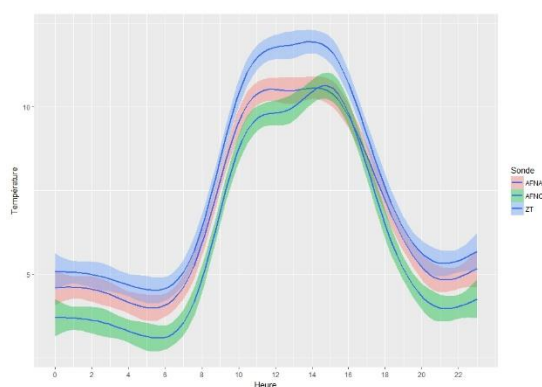


Figure 38 : Evolution des températures (°C) au cours de la journée au sein des différentes modalités étudiées (bleu : zone témoin, rouge : sonde à un mètre de l'arbre, vert : sonde dans l'inter-rang). Tendances sur les données du mois de mars sur le site de **Theix**

Au niveau de l'humidité de l'air exprimée en pourcentage, il semblerait que l'été la zone proche de l'arbre soit plus humide que les autres durant la journée (fig. 39, 40, 41). Cette tendance tend à s'inverser la nuit où la zone témoin a tendance à être le secteur le plus humide. Ce résultat est néanmoins moins net.

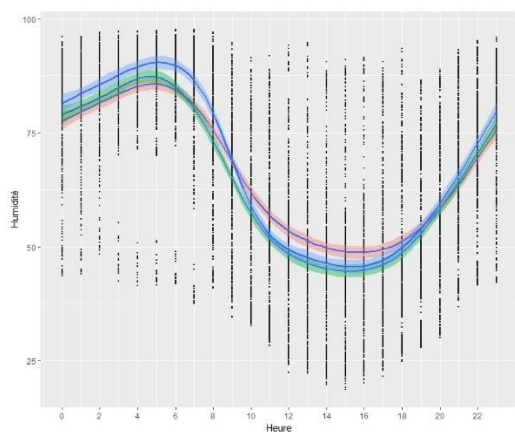


Figure 39 : Evolution du taux humidité (%) au cours de la journée au sein des différentes modalités étudiées (bleu : zone témoin, rouge : sonde à un mètre de l'arbre, vert : sonde dans l'inter-rang). Tendances sur les données du mois de juillet sur le site de **Bonnefont**

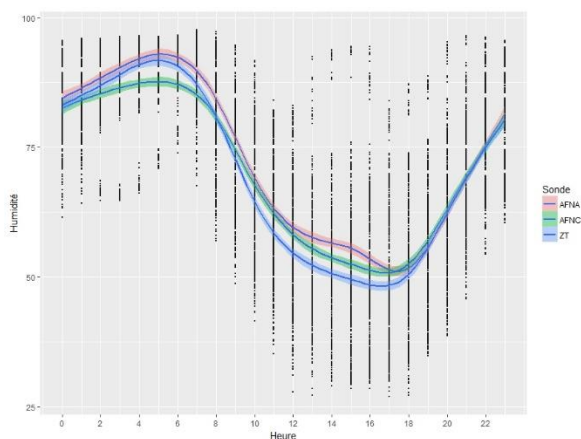


Figure 40 : Evolution du taux humidité (%) au cours de la journée au sein des différentes modalités étudiées (bleu : zone témoin, rouge : sonde à un mètre de l'arbre, vert : sonde dans l'inter-rang). Tendances sur les données du mois de juin sur le site de **Lalosse**

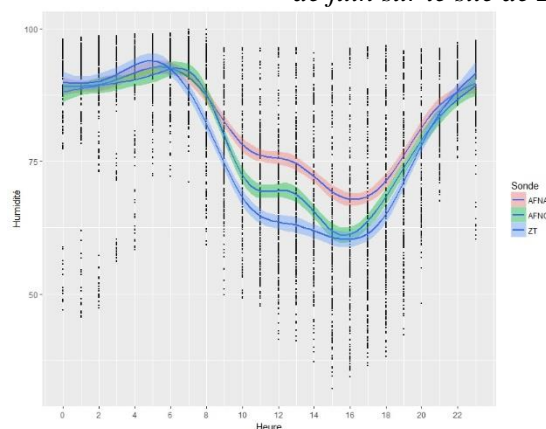


Figure 41 : Evolution du taux humidité (%) au cours de la journée au sein des différentes modalités étudiées (bleu : zone témoin, rouge : sonde à un mètre de l'arbre, vert : sonde dans l'inter-rang). Tendances sur les données du mois de juin sur le site de **Theix**

En avril sur le site de Bonnefont, les trois courbes semblent confondues (fig. 42). Cette absence de différence nette semble durer de janvier à avril sur le site de Theix (fig. 43).

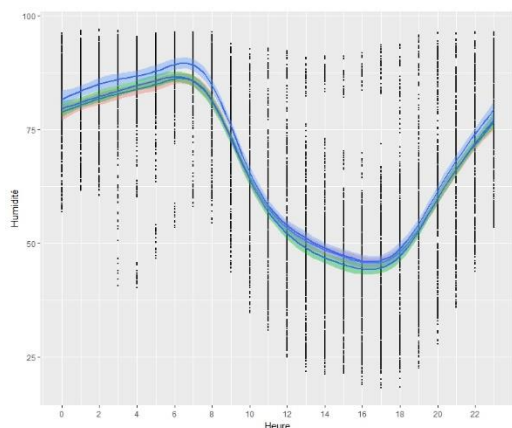


Figure 42 : Evolution du taux humidité (%) au cours de la journée au sein des différentes modalités étudiées (bleu : zone témoin, rouge : sonde à un mètre de l'arbre, vert : sonde dans l'inter-rang). Tendances sur les données du mois d'avril sur le site de **Bonnefont**

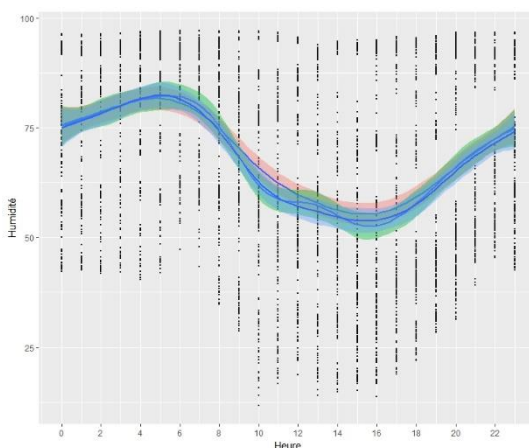


Figure 43 : Evolution du taux humidité (%) au cours de la journée au sein des différentes modalités étudiées (bleu : zone témoin, rouge : sonde à un mètre de l'arbre, vert : sonde dans l'inter-rang). Tendances sur les données du mois d'avril sur le site de **Theix**

Les mois de janvier et février sont particuliers sur le site de Lalousse (fig. 44 et 45). La courbe dans l'inter-rang semble connaître une saturation à 80% d'humidité le mois de janvier ainsi que des évolutions déconnectées des autres courbes lors du mois de février. Sur cette même période la zone proche de l'arbre paraît plus humide que la zone témoin. Néanmoins, dès le mois de mars, les trois courbes deviennent confondues et cela jusqu'au mois de juin comme vu précédemment.

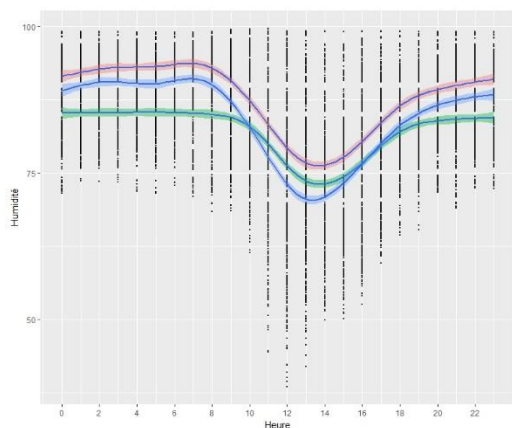


Figure 44 : Evolution du taux humidité (%) au cours de la journée au sein des différentes modalités étudiées (bleu : zone témoin, rouge : sonde à un mètre de l'arbre, vert : sonde dans l'inter-rang). Tendances sur les données du mois de janvier sur le site de **Lalousse**

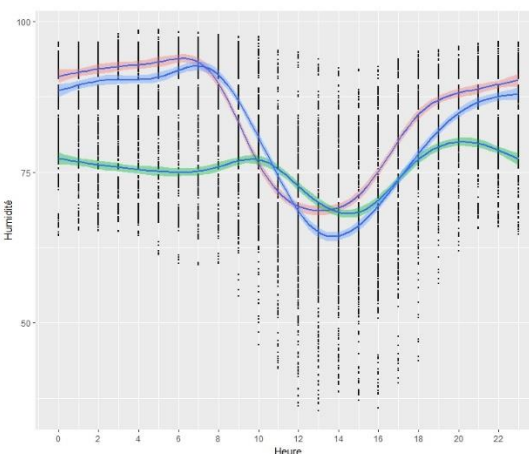


Figure 45 : Evolution du taux humidité (%) au cours de la journée au sein des différentes modalités étudiées (bleu : zone témoin, rouge : sonde à un mètre de l'arbre, vert : sonde dans l'inter-rang). Tendances sur les données du mois de février sur le site de **Lalousse**

III) Discussions des résultats

3.1) En quelles mesures l'agroforesterie entraine une baisse de rendements herbagers et quelles en sont les origines possibles ?

Les résultats sur la première et deuxième période de prélèvement en 2017 semblent indiquer que les prairies agroforestières ne peuvent généralement pas assurer des rendements similaires aux prairies sans arbre. Ces pertes de rendement peuvent être réparties sur les deux périodes d'étude comme sur le site de Theix ou restreintes à la première ou à la seconde comme sur les trois autres sites. Les pertes de rendements ponctuelles peuvent ne pas avoir d'impact sur les rendements globaux (c'est-à-dire être compensées par la période précédente ou suivante) comme à la Lalosse ou au contraire les impacter comme à Theix et à Pomy.

Les variations dans les teneurs en matière sèche des fourrages ne semblent pas être le paramètre expliquant le plus les écarts de rendement entre les différentes situations. En effet, il n'y a que très peu de différences significatives sur les teneurs en matière sèche et quand des différences ont été relevées elles sont généralement inférieures à 5% sauf pour la P2 à Theix. Globalement les fourrages ont été prélevés dans la marge supérieure du stade optimal pour la récolte de foin (autour de 20% pour les graminées, autour de 16% pour les légumineuses) [ARVALIS *et al.*, 2011].

Les résultats sur la teneur en matière sèche suscitent d'autres éléments de discussion. Les graphiques sur les températures semblent indiquer sur l'ensemble des sites étudiés et conformément aux résultats trouvés dans la bibliographie [Guevrara-Escobar *et al.*, 1997 ; Solangaarachchi & Harper, 1987 - Wall *et al.*, 1997 in Benavides *et al.*, 2009] qu'en été les températures sont plus fraîches en agroforesterie comparé aux zones sans arbre. La phénologie, liée au TMS, étant conditionnée par la somme des degrés jours [Duru *et al.*, 2010] il semblerait attendu que les fourrages restent jeunes plus longtemps à proximité des troncs comme la bibliographie semble l'indiquer [Dupraz & Liagre, 2008]. Il aurait été donc attendu des différences significatives de TMS la position des quadrats ou, au moins, à l'échelle de la modalité (agroforestier contre ouvert), notamment en cas de sécheresse. La première partie de cette hypothèse semble validée à Lalosse et à Theix. Les fourrages agroforestiers ont en effet un TMS plus bas que ceux de la zone témoin. Par contre, la seconde partie de l'hypothèse tend à être invalidée. En effet, les sites de Theix et de Lalosse ne présentent pas un stress de chaleur supérieur aux autres sites. Au contraire, leur nombre de jours de contrainte estivale à la P2 (tab. 2) est similaire voir inférieur aux autres sites. Le pic de chaleur n'étant pas encore arrivé à la P2, les résultats aux périodes suivantes permettront sûrement d'émettre une conclusion plus argumentée.

Comme il a été vu précédemment les feuilles des arbres sont responsables de 69% de la surface ombrée [Benavides *et al.*, 2009]. Il était donc attendu d'observer un effet (facilitation ou compétition) de la pousse des feuilles entre la P1 et la P2 sur les rendements fourragers. Or aucune différence significative entre les variations de rendement entre ces deux périodes n'a été trouvée entre la zone témoin et la modalité agroforestière, hormis à Lalosse. La production de biomasse a donc suivi la même cinétique quelles qu'en soient les conditions. Les différences de production semblent donc s'expliquer soit par des interactions racinaires soit par des modifications plus larges de l'écosystème. Néanmoins, l'hypothèse initialement étudiée dans ce paragraphe ne peut être complètement rejetée car aucune mesure n'a été réalisée pour suivre l'évolution du rayonnement solaire disponible par la plante au cours de la saison. La seule donnée disponible à ce sujet est le degré de l'ouverture de la canopée à la P3 qui en soit ne donne qu'une estimation ponctuelle de ce paramètre (le degré d'ouverture ne donnant qu'une idée partielle du rayonnement journalier capté par la végétation herbacée). De plus, aucune

donnée de terrain sur la phénologie des arbres (date de fin et de début du débourrement, date du début et fin de la chute des feuilles) n'a été récoltée. Il est donc impossible d'estimer l'évolution précise du rayonnement capté par le couvert herbacé au cours de l'année. Les analyses sur les degrés d'ouverture ne montrent, dans la majorité des cas, qu'une opposition entre l'agroforesterie et la zone témoin. Seul l'inter-rang a été discriminé à Lalosse. Cela limite mécaniquement les discussions sur l'effet de la position du quadrat au sein de la modalité agroforestière.

La composition floristique de prairie, comme trait de réponse aux changements des conditions de production induit par l'agroforesterie, aurait pu être une piste d'explication des différences de rendement comme semble l'indiquer une partie de la bibliographie [Lin *et al.*, 1999 & Davkota *et al.*, 2009]. Mais cette hypothèse est loin de faire consensus car des publications indiquent un effet moindre ou inexistant de l'agroforesterie sur la composition botanique [Guevara *et al.*, 1998]. La densité du peuplement semble conditionner la composition floristique. Sanchez-Jardon *et al.*, en 2010, ont démontré que seul les densités forestières (non représentées dans cette étude) sembleraient avoir un impact sur la composition floristique en occasionnant une baisse des légumineuses au profit des autres plantes (non Fabaceae, non Asteraceae, non Poacea). Sur seulement deux sites (Theix et Bonnefont) des dissimilarités entre la végétation en agroforesterie et dans la zone témoins ont été trouvées. Sur ces deux sites des différences de rendement ont aussi été enregistrées. Par contre les modifications de la composition botanique sur le site de Bonnefont ne semblent pas être due à l'agroforesterie mais au rat taupier. Contrairement à ce qu'il était attendu, les Fabaceae ne semblent pas être significativement impactées par la présence des arbres ou à défaut caractériser la zone témoin.

A la vue de ces premières pistes d'analyses, il semble apparaître que, pour l'explication des résultats sur la production de biomasse et la végétation, les effets de site jouent un rôle plus prépondérant que les modèles d'explications globales. La fin de cette partie aura donc pour but de présenter des discussions par site.

- *Bonnefont*

La récolte lors de la deuxième période de prélèvement à Bonnefont indique des rendements fourragers moindre en agroforesterie par rapport à la zone témoin.

Les analyses sur la composition floristique semblent montrer une dégradation du secteur au sud des arbres. La richesse spécifique et l'indice d'équitabilité de Piélou y sont plus faibles qu'ailleurs et le secteur SB est caractérisé par *Trifolium subterraneum* et *Vulpia ciliata* qui sont toutes des espèces inféodées aux milieux sableux [Streeter *et al.*, 2011 ; Rameau *et al.*, 2008]. Les dégâts des rats taupiers, sur ces sols issus d'alluvions sableux, ont donc créé les conditions favorables à l'installation de ces deux espèces au détriment du cortège prairial initial. Cette dégradation entraîne mécaniquement une différenciation des secteurs SA et SB au regard de leur composition fonctionnelle. Les dégâts engendrés par ce micromammifère demandent généralement une restauration du couvert par sur-semis ou par re-semis. Ces méthodes visent à réinstaller un couvert tout en limitant l'installation des espèces non désirées [Chambre Agri Lozère, 2013].

Cette dégradation pourrait être une piste d'explication pour la baisse générale des rendements. Mais cette explication ne peut être la seule car aucune différence significative entre les rendements n'a été détectée à l'échelle de la position du quadrat.

- *Lalosse*

La prairie agroforestière du site de Lalosse est celle qui présente le moins de différences de rendement avec sa zone témoin. La zone agroforestière de ce site est même la seule à obtenir un gain de production très nettement supérieur à sa zone témoin entre la P1 et la P2, semblant ainsi traduire un effet de facilitation. Bien que différents en termes de diversité et de richesses spécifiques, les deux secteurs tendent à être plus ou moins similaires au niveau de la composition floristique et encore plus au niveau de la composition fonctionnelle. Les deux secteurs possèdent donc le même fond prairial. Une question se pose alors : quels sont les facteurs favorisant la conservation de la flore et une meilleure exploitation des ressources au cours de la saison ?

Bien que cette étude soit restreinte dans l'observation des paramètres environnementaux certaines hypothèses peuvent être formulées.

Suite aux observations de terrain et aux échanges avec l'agriculteur, il semblerait que les noyers du site de Lalosse débourrent très tardivement (mi-mai). Les prélèvements à la P2 ont donc été réalisés avant l'épanouissement total des feuilles. Les relations liées au feuillage (interception, évapotranspiration) n'étant pas encore totalement mises en place, leurs conséquences directes n'ont donc pas pu être observées. Cela se remarque aussi sur les graphiques de température (effet visible qu'à partir de juin). La conservation du rayonnement lumineux a sûrement permis de maintenir la production globale à un niveau similaire à la zone témoin. De plus la zone agroforestière du site de Lalosse possède un degré d'ouverture de la canopée plus élevé que les autres sites. Le gain massif de production entre la P1 et la P2 dans la zone agroforestière pourrait être expliqué par une meilleure utilisation des nutriments du sol. En effet, les sols agroforestiers tendent à être plus riches que les sols des prairies ouvertes [Tripathi *et al.*, 2013 ; Moreno *et al.*, 2007]. Mais cette hypothèse a quelques faiblesses. Si le gain de fertilité était réel pourquoi les rendements à la P1 sont-ils plus faibles en agroforesterie qu'en zone témoin ? Et vue la disposition de la zone témoin (au niveau d'un manquant) il est possible de s'interroger sur sa déconnection avec la portion agroforestière au niveau du compartiment pédologique. En absence d'analyse de sol il est impossible de plus avancer sur ces questionnements.

Pour conclure, il semblerait que les résultats favorables pour l'agroforesterie ne puissent pas être extrapolés de manière homogène à l'ensemble de l'exploitation. En effet, lors d'une visite de terrain il a été possible de constater une grande hétérogénéité des comportements des prairies en fonction des expositions. De plus la position dans le versant induit sûrement des circulations de nutriments dans les sols avec des sols lixivés en haut de pente et illuviaux en bas de pente ou dans les replats. Cette variabilité de résultats souligne la grande dépendance aux conditions locales d'une plantation agroforestière.

- *Pomy*

Les exclots à Pomy ne sont pas homogènes quant aux conditions d'espacement qu'ils représentent. L'arbre au sud de l'exclot 1 se situe à 5m de l'arbre central tandis que l'arbre au nord se situe à 5,58m. Pour l'exclot 2 l'arbre au sud se situe à 10m et l'arbre au nord est absent. Le quadrat de l'inter-rang a été néanmoins placé à 5m du tronc. Enfin, pour l'exclot 3, l'arbre au sud se situe à 5m du tronc et l'arbre au nord à 10m. Cette variabilité d'espacement pourrait être une piste pour expliquer l'hétérogénéité des données au sein de la modalité agroforestière de ce site.

Au niveau de la botanique, l'agroforesterie et le témoin semblent similaires ormis une plus forte abondance de deux graminées de prairies dans la zone témoin (*Gaudinia fragilis* et *Schenodorus pratensis*) et 'un plus fort recouvrement de Fabaceae en agroforesterie. Suite aux discussions

avec les éleveurs un début d'hypothèse peut être formulé pour expliquer le recouvrement en légumineuses. La parcelle est fertilisée chaque année notamment avec un peu d'azote en début de cycle. L'éleveuse a fait remarquer que cette tâche, comme toutes les autres opérations mécaniques, était difficile à conduire en agroforesterie. L'hypothèse est donc que la zone témoin étant plus accessible pour les engins reçoit une plus grande dose d'engrais que la zone agroforestière. Les Fabaceae étant sensibles à l'azote, leur recouvrement s'en verrait impacté [GNIS ; Cabaret & Seuret, 2004]. Mais ce raisonnement peut être infirmé par l'hypothèse que les herbacées en agroforesterie utilisent plus efficacement les engrais qu'en système ouvert [Gargoglione *et al.*, 2014] ce qui pourrait abaisser la dose seuil d'azote impactant les légumineuses. Finalement l'hypothèse d'une plus grande teneur en azote exogène dans les sols agroforestiers pourrait être confirmée par une analyse chimique des sols.

La perte de rendement pourrait être expliquée par le même raisonnement mais également par la compétition pour la lumière et pour les nutriments. D'après les études déjà réalisées sur la compétition racinaire entre le merisier et les herbacées, il semblerait que cet arbre ait tendance à avoir un système racinaire traçant mais qu'en présence de graminées ce dernier tend à éviter la compétition en développant ces racines dans les horizons les plus profonds [Dawson *et al.*, 2001]. Ainsi normalement les herbacées ne devraient être que peu impactées par le système racinaire du merisier.

- *Theix*

La prairie sous les arbres de haut jet de Theix, est celle enregistrant les plus faibles rendements en agroforesterie à la P1 et à la P2. C'est aussi celle qui obtient les différences les plus marquées avec sa zone témoin au niveau de sa composition floristique. Ce secteur se distingue des deux autres sur les différents paramètres botaniques étudiés (analyses sur la richesse et la diversité, ACP). Sous ces arbres de haut jet les communautés végétales sont moins diversifiées, moins riches et caractérisées (ou tendant à l'être) par des espèces inféodées aux espaces délaissées (*Gallium aparine*, *Pimpinella saxifraga*) ou très riches (*Alopecurus pratensis*, *Urtica dioica*) [Streeter *et al.*, 2011 ; Pouvaret, 2014]. Des analyses de sols permettraient d'étudier le niveau de trophie. Il serait attendu à ce qu'il soit supérieur en raison, soit de flux de matières organiques plus importants entre les arbres et les sols, soit d'une surconcentration du bétail (zones fraîches attractives l'été [Meuret, 2014]), ou soit d'un apport de nutriments par la lixiviation des zones plus hautes sur la parcelle (secteur en contre bas par rapport aux autres zones d'études). Mais cet enrichissement potentiel n'entraîne pas un gain de rendement notable. Au contraire, cette zone est la moins productive. Il y a donc un ou plusieurs facteurs limitants. Ce ou ces facteurs limitants pourraient être partagés avec la zone têtard qui connaît elle aussi des différences de rendements avec la zone témoin et cela malgré une certaine similarité botanique.

Le premier facteur limitant pourrait être l'accès à la lumière. En effet le degré d'ouverture de la canopée sous les arbres de haut jet est plus faible (25%) que sous les arbres têtards (68%). Comme vu en début de rapport une baisse de l'accès à la lumière entraîne une baisse (linéaire ou non) des rendements [Solangaarachchi & Harper, 1987 - Wall *et al.*, 1997 in Benavides *et al.*, 2009 ; Gosse *et al.*, 1986].

Le second facteur limitant serait, en lien avec l'ombrage, les conditions climatiques. En effet, lors du mois de janvier, les températures sont plus élevées dans le témoin par rapport à la zone sous les arbres de haut jet. Cela conduit à accentuer le stress hivernal déjà très présent à l'échelle de la commune (41 jours de stress hivernal entre février et la P2). Il se pourrait que les différences de microclimat soient suffisamment conséquentes pour engendrer une différence de teneur en matière sèche dans le fourrage (herbe plus verte). Néanmoins, le résultat sur les TMS pourrait être aussi imputable à la composition botanique. Les températures plus fraîches en

début de saison pourraient être responsables des rendements bas à la P1 sous les arbres de haut jet. Les données sur la P3 et la P4 permettront de déterminer si le caractère plus frais de l'agroforesterie conduit à une amélioration des rendements lors de l'été. N'ayant aucune donnée sur le microclimat sous les arbres têtards, cette piste d'explication ne pourra pas être étudiée dans cette modalité.

Enfin, le système racinaire du frêne pourrait être le facteur limitant commun. Le frêne a un système racinaire traçant avec une forte concentration de racines dans les horizons superficiels du sol [Rust & Savill, 2000].

3.2) *Discussion de la méthode*

Au vu des discussions précédemment énoncées il apparaît que la philosophie de l'étude du programme PARASOL a été d'aborder l'agroforesterie de manière systémique et non manière analytique. L'agroforesterie est donc un objet de recherche unique, subdivisé uniquement en trois compartiments (herbe – arbre – animal). De ce fait que peu de variables environnementales ont été étudiées.

La phénologie des arbres n'a pas été mesurée (date précise de débourrement, date de pleine ouverture des feuilles, date de chute des feuilles) et le degré d'ouverture n'a pas été étudié de manière dynamique (une seule mesure à une seule période). L'étude des liens entre la phénologie des arbres et la lumière disponible pour le couvert demanderait l'établissement d'un autre protocole. Basé sur le même schéma que celui appliqué (différentes postions au nord et au sud de l'arbre) des mesures au luxmètre pourraient être répétées au cours des différents stades phénologiques et à différentes périodes de la journée. Croisées avec des photos hémisphériques, ces données pourraient permettre de comprendre comment le régime de taille (traduction en pratique sylvicole du degré d'ouverture de la canopée) joue sur la compétition sur la lumière. En intégrant les variables climatiques régionales, les espèces cultivées et l'espacement de la plantation il serait possible de réaliser un modèle prédictif de l'interception du rayonnement lumineux à l'échelle de la parcelle. Une collaboration avec le CIRAD AMAP est en cours sur cette thématique. L'étude de ces paramètres pourraient être important pour une meilleure intégration des prairies agroforestières dans les circuits de pâturage. Même si les résultats présentés ne relèvent pas d'influence nette de l'agroforesterie sur les types fonctionnels, il serait possible d'envisager qu'un débourrement tardif des arbres pourrait, toutes conditions égales par ailleurs, favoriser les herbacées précoces. A l'inverse une chute de feuilles précoce pourrait favoriser une repousse automnale. Une connaissance plus fine des mécanismes de compétition pour la lumière pourrait livrer des éléments pour éclairer les arbitrages des agriculteurs entre sylviculture et production fourragère.

Les mesures des variables climatiques (température et humidité) n'ont pas aussi été répétées. A défaut d'une étude complète du fonctionnement du microclimat de la parcelle, une répétition multiplication des sondes (trois par modalité étudiée au lieu d'une) pourrait permettre de réaliser des tests statistiques et ainsi réellement conclure sur les tendances observées lors de cette étude. Or l'acquisition des sondes est coûteuse. L'étude de ces variables pourraient être réalisées dans d'autres projets avec une démarche plus analytique.

Les données pédologiques n'ont pu être collectées. Pourtant il semblerait d'après la bibliographie que le type de sol conditionne fortement le succès d'une plantation agroforestière [Obrador & Moreno ; Palma *et al.*, 2016]. Un protocole avait été proposé avec trois prélèvements par explot selon trois modalités de distance à l'arbre. Les prélèvements devaient étudiés la structure, la texture et la composition chimique des sols. Les fosses pédologiques étaient volontairement exclues (dépassement du cadre du projet) même si elles auraient permis

une observation des systèmes racinaires. Un projet devait normalement étudier ces paramètres mais il n'a malheureusement pas été subventionné.

A ce stade du projet et du développement de logique inter-projets dans lequel il s'intègre, la situation ne permet d'avoir que des résultats à l'échelle d'une parcelle sans pour autant pouvoir confirmer ou infirmer solidement les hypothèses les expliquant, ce qui peut être un frein réel pour au développement d'outils de formation. Mais ce constat n'est que temporaire. En effet le programme PARASOL prévoit le regroupement et le croisement de ses différents jeux de données (dendrométrie, allométrie, enquête auprès des agriculteurs, comportement animal). Cette analyse basée sur une campagne de terrain de deux ans et sur des sites répartis sur l'ensemble de la France pourrait permettre d'avoir une vision plus systémique que l'approche uniquement analytique présentée dans ce stage. Ce changement d'échelle pourrait faire émerger d'autres résultats pouvant s'affranchir des manques de données précédemment relevés. De plus l'étude des rendements sera complétée par une analyse chimique de fourrage qui permettra de mieux estimer la capacité nutritionnelle des fourrages des prairies. Cette piste d'étude est demandée par Julie Resnaud (agricultrice de Pomy) qui relève que ses brebis montrent une préférence pour l'herbe ayant poussée au soleil. Selon elle, cette préférence serait due à une plus grande teneur en glucides des fourrages. Pour rappel la bibliographie semble indiquer qu'en agroforesterie les fourrages auraient des taux en glucides plus bas mais une concentration en protéines plus élevée [Sander *et al.*, 1997 - Wall *et al.*, 1997 in Benavides *et al.*, 2009 ; Peri *et al.*, 2007].

Pour ce qui est du protocole utilisé, il a l'avantage d'avoir une mise en place pas trop lourde et de ne pas demander trop de compétences techniques. Seule la botanique demande un certain degré de rigueur et de connaissances. Il est d'ailleurs préférable de réaliser les relevés le plus tard possible (limite supérieure de la P2) pour avoir le maximum d'espèces en floraison (ou défaut en début de floraison ou en fructification). Si des relevés totaux devraient être à nouveau réalisés il serait conseillé d'apporter sur le terrain une flore permettant d'identifier toutes les espèces au stade végétatif et pas seulement les Poacées. En raison de la complexité de ces outils un temps de formation avec un botaniste expert serait profitable. D'autres méthodes auraient pu être utilisées comme celle des relevés simplifiés [Theau *et al.*, 2010] mais elles n'ont qu'une vocation agronomique et non botanique. Pour conclure sur les relevés il semblerait que la détermination de l'aire minimale n'ait pas été effectuée en amont de la détermination de l'aire d'étude en 2016. Il a été décidé de ne pas changer la superficie des quadrats cette année afin de conserver une base de travail similaire aux deux années d'études précédentes et ainsi de pouvoir comparer les relevés botaniques et les mesures de biomasses. De plus l'aire minimale est censée être calculée en milieu homogène. Il se pourrait qu'elle soit donc difficilement mesurable dans le contexte de l'agroforesterie. La tâche 2 de PARASOL s'intéresse à différents secteurs géographiques. Il se peut donc que minimale varie entre les sites. Le choix effectué a donc été de suivre une zone précise (celle du prélèvement) et homogène entre les sites.

Suite aux résultats il semble apparaître un effet exclot sur certains sites. Vu le faible nombre de surfaces en agroforesterie intra-parcellaire en élevage, il semble que ce biais (c'est-à-dire la variabilité des profils au sein de la parcelle) ne puisse difficilement être corrigé sauf par l'augmentation de répétitions (et donc un coût de réalisation plus élevé).

Comme vu en début de partie, le manque de certaines données et le temps total demandé par l'expérimentation (transport compris) questionne sur les méthodes de recherche. Comment réussir à obtenir suffisamment de données répétées dans le temps et entre les sites, dans un contexte de baisse des dépenses publiques. Avec l'expérience de ces anciens programmes de recherche AGROOF tente de répondre à ces exigences matérielles par la recherche participative comme dans le projet ABRATATOUILLE [AGROOF *et al.*]. Les sciences participatives

peuvent se limiter à une simple implication citoyenne dans le processus de collecte de données avec les réseaux d'observateurs ou aller jusqu'à répondre aux besoins de nouveaux partenaires [Anadon, 2013]. C'est dans cet esprit que le CIRAD a mené un programme de recherches interdisciplinaires sur les sols du Sénégal avec un volet sur la légitimation des savoirs locaux [CIRAD, 2014]. La politique d'AGROOF à ce sujet est de créer un réseau d'agriculteurs-partenaires impliqués dans tout le processus du programme de recherche. Les modalités de participation pouvant être variables selon les projets. Dans le cadre de PARASOL, les agriculteurs auraient pu livrer leurs observations sur certaines parcelles aux dates approximatives d'épiaison (sous les arbres dans les témoins) d'espèces cibles (le Dactyle par exemple), la phénologie des arbres (date de débourrement, etc.) ou même une appréciation de la date du jaunissement de la parcelle. L'implication de cette nouvelle catégorie d'acteurs dans les programmes de recherche demande une phase de compréhension des exigences et du registre de chacun. Cette démarche exige de repenser les rapports chercheurs – agriculteurs pour aller vers une plus grande horizontalité de ces rapports sociaux.

Conclusion – retour sur les résultats et ouverture sur la complexité des systèmes agroforestiers

L'agroforesterie est un vaste ensemble de pratique, ayant évolué avec l'ensemble de pratiques agricoles des forêts cultivées à l'agroforesterie intraparcellaire. Aujourd'hui à l'ère de l'agroécologie et du changement climatique, l'agroforesterie interroge les agriculteurs mais aussi les acteurs publics. L'objectif de ce rapport était de contribuer à l'étude d'un cas particuliers d'agroforesterie, les prairies agroforestières intraparcellaires, dans le cadre du programme PARASOL. Cette étude s'est focalisée sur l'opportunité de ses systèmes pour la production fourragère, en se centrant sur les premières périodes de l'année 2017. Les résultats sur la caractérisation des conditions microclimatiques suivent ceux de la bibliographie : sous les arbres l'air est plus humide et les extrêmes de températures tendent à être tamponnés. Malgré cela une baisse plus ou moins généralisée des rendements tend à être observée. Cette baisse semble être due en partie à une compétition pour la lumière mais aussi à la compétition racinaire. En absence d'une caractérisation plus fine des paramètres environnementaux (facteurs biotiques et abiotiques) il paraît difficile de détailler plus finement les facteurs responsables des baisses de rendement ou au contraire des absences des différences de production avec les zones témoins (site de Lalosse). Les résultats sur la composition floristique semblent encore plus complexes à analyser au vu de leur grande dépendance aux conditions locales.

Finalement, seule la répétition dans le temps et l'espace du protocole permettrait de confirmer ou infirmer les grandes tendances observées et de mieux comprendre les clefs de la réussite d'un projet agroforestier. En effet cette répétition permettrait d'observer le comportement de ces prairies dans le cas d'épisodes climatiques extrêmes (comme les sécheresses notamment). Couplées avec des modèles sur le changement climatique, ces données seraient d'autant d'illustrations sur l'opportunité des prairies agroforestières dans le maintien de la production fourragère. Mais les suivis sur le long terme sont onéreux et faute de moyen il faudra aux chercheurs inventer d'autres méthodes de récolte de données. Les recherches participatives pourraient être une piste.

L'étude restreinte des rendements des prairies ne saurait à elle seule permettre de conclure sur l'opportunité des prairies agroforestières pour les systèmes d'élevage. En effet la philosophie même de l'agroforesterie est la co-culture et une approche intégrative des services écosystémiques dans l'évaluation de la parcelle. La production de bois doit être donc pris en compte par l'agriculteur dans la productivité de sa parcelle agroforestière. Il semble donc important de souligner que s'engager dans l'agroforesterie revient à renouer avec la culture de l'arbre (c'est-à-dire avec l'ensemble des pratiques inféodées à la sylviculture). Les rendements de ces prairies ne sauraient donc s'évaluer sur une seule année. La notion de surface équivalente est d'ailleurs un bon outil pour permettre de visualiser les gains (ou les pertes) de la co-culture. Les prairies agroforestières ont donc plusieurs fonctions : une fonction annuelle s'intégrant dans les logiques de fonctionnement du système fourrager et des fonctions sur le moyen et le long terme. L'agriculteur doit lors de l'élaboration du projet mais aussi tout le long de la vie du système, réaliser des arbitrages entre les différentes fonctions. Il doit aussi réfléchir à saisir au maximum les différentes opportunités que peuvent lui apporter ces systèmes au cours du temps. Deux des agriculteurs questionnés (Gert et Katherine De Ridder) lors de ce stage ont fait référence à l'arbre fourrager et l'utilisation du BRF comme piste de valorisation des arbres agroforestiers. Ces mêmes agriculteurs réfléchissent à bénéficier de la fertilité des sols des prairies agroforestières pour une rotation des cultures sur trois ou quatre années ce qui renforce l'intérêt de l'agroforesterie dans les logiques de long terme. Ainsi la place et les productions des plantations agroforestières évoluent avec leur degré de maturation. La notion de ratio de

surfaces équivalentes en mettant dos à dos les systèmes isolés et les cultures mixtes permet d'illustrer le bilan global de ce type de surface.

Pour finir, l'étude des systèmes agroforestiers ne saurait se restreindre à des données facilement traductibles en paramètres économiques. C'est le cas du bien-être animal, notion difficilement caractérisable car sujette à l'anthropomorphisme. Cette problématique semble être au cœur des préoccupations des agriculteurs se lançant en agroforesterie. Couplée avec une approche comportementale du pâturage, l'évaluation du bien-être animal pourra donner des éléments sur une éventuelle compensation par l'animal d'une production fourragère plus faible en agroforesterie.

Finalement il est important de ne pas tirer des conclusions hâtives des résultats présentés sur cette étude. Il est important de les contextualiser dans le temps (deux périodes d'étude d'une année), dans l'espace (seulement quatre sites) et le projet de recherche dans lequel il s'insère.

Bibliographie

- Anadon M. 2013. Recherche participative in *Dictionnaire critique et interdisciplinaire de la participation*. Barbier R, Blondiaux L, Chateauraynaud F, Fourniau JM, Lefebvre R, Neveu C & Salles D (dir.), GIS Démocratie et Participation, Paris.
- Agreil C & Greiff N. 2008. *Des troupeaux et des hommes en espaces naturels, une approche dynamique de la gestion pastorale*. Guide pratique. Conservatoire Rhône-Alpes des espaces naturels (eds.). Vourles, 87p.
- AGROOF, INRA, Fondation de France & Terra Symbiosis. *Les terres de Roumassouze, une site pilote pour l'agroforesterie maraîchère*. 4p.
- AGROOF. 2013. *Etude d'impact du microclimat agroforestier adulte en systèmes d'élevage ovin*. 35p.
- Ambroise R. 1999. Les prairies dans les paysages. *Fourrages*. 160:373-384.
- Ansquer P, Theau JP, Cruz P, Viegas J, Al Haj Khaled R & Duru M. 2004. Caractérisation de la diversité fonctionnelle des prairies naturelles. Une étape vers la construction d'outils pour gérer les milieux à flore complexe. *Fourrages* 179:353-368.
- ARVALIS, AGRIAL, CAM, CAVAC, EVEN Agri & Garun-Paysanne. 2011. *Récolte et conservation de l'herbe – comment ça marche ?*
- Association Française d'Agroforesterie. *Agroforesterie et Politique Agricole Commune* [html page]. Association Française d'Agroforesterie. <http://www.agroforesterie.fr/reglementations-agroforesterie.php>.
- Baudière A. & Serve L., 1975. Les groupements végétaux du Pla de Gorra-Blanc (massif du Puigmal, Pyrénées Orientales). Essai d'interprétation phytosociologique et phytogéographique. *Nat. Monsp., sér. Bot.* 25:5-21.
- Baumont R, Plantureux S, Farrié JP, Launay F, Michaud A & Pottier E. *Prairie permanentes, des références pour valoriser leur diversité*. Launay F (coord.). Institut de l'Elevage, Paris, 132p.
- Benavides R, Douglas GR & Osoro K. 2009. Silvopastoralism in New Zealand: review of effects of evergreen and deciduous trees on pasture dynamics. *Agroforest Syst.* 76:327-350.
- Madani B & Sayeh L. 2002. *Contribution à l'étude de l'entomofaune de la nappe alfatière de la région de Zaafrane*. W.Djelfa. Centre Universitaire Ziane Achour, Djelfa.
- Blanchon S. 2015. *Elaboration d'un outil de collecte d'informations agroécologiques à destination des exploitants engagés en MAEC pastorales dans le Haut-Jura*. 51p(+annexes).
- Bloor JMG, Jay-Robert P, Le Morvan A & Fleurance G. 2012. Déjections des herbivores domestiques au pâturage : caractéristiques et rôle dans le fonctionnement des prairies. *Prod. Anim.* 25(1):45-56.
- Bonnier G & De Layens. 1986. *Flore complète portative de la France, de la Suisse et de la Belgique*. Belin, Paris. 432p.
- Braun-Blanquet J, Roussine N & Nègre R. 1952. *Les groupements végétaux de la France méditerranéenne*. Dir. Carte Group. Vég. Afr. Nord, CNRS, 292 p.
- Buteau L. 2005. Développer l'agroforesterie en Haïti. *Spore*. 120:16.
- Cabaret MM & Seuret JM. 2004. *Fertilisation des prairies : azote, phosphore et potasse*. Elevage Rentabilité, 13:16.
- Chambre d'Agriculture. 2010. *L'agroforesterie dans les réglementations agricoles – Etat des lieux en juin 2010*. 17p.
- Chambre d'Agriculture de Lozère. 2013. *Rats taupiers : comment remettre en état les prairies ?*. 6p.
- CIRAD, 2014. *Recherche participative : entre savoirs paysans et savoirs scientifiques* [html pages]. <http://www.cirad.fr/nos-recherches/resultats-de-recherche/2014/recherche-participative-entre-savoirs-paysans-et-savoirs-scientifiques>
- Circle-2. 2013. *Adaptation inspiration book*. 83p.
- CIVAM, FARRE, FNAB & LPO. *Prairies fauchées et pâturées*. 6p.
- Coulon F, Dupraz C, Liagre F & Pointereau P. 2000. *Etude des pratiques agroforestières associant des arbres fruitiers de haute tige à*

- des cultures ou des pâtures. Solagro, Toulouse. 203p.
- Coulon JB. Effet de la nature des fourrages sur les caractéristiques physico-chimiques et organoleptiques du fromage. *Fourrages*. 152:429-436
- Couturier C, Charry M, Doublet S & Pointereau P. *Afterres 2050*. Solagro, 96p.
- Cruz P, Duru M, Therond O, Theau JP, Ducourtieux C, Jouany C, Al Haj Khaled R & Ansquer P. 2002. Une nouvelle approche pour caractériser les prairies naturelles et leur valeur d'usage. *Fourrages* 172:335-354.
- Daget P & Poissonet J. 1972. Un procédé d'estimation de la valeur pastorale des pâturages. *Fourrages*. 49:31-39.
- Dawson LA, Duff EI, Campbell CD & Hirst DJ. 2001. Depth distribution of cherry (*Prunus avium* L.) tree roots as influenced by grass root competition. *Plant and Soil*. 231:11-19
- DeBruyne SA, Feldhake CM, Burger JA & Fike JH. 2011. Tree effects on forage growth and soil water in an Appalachian silvopasture. *Agroforest Syst* 83:189-200.
- Deregibus VA, Sanchez RA & Casal JJ. 1983. Effects of Light Quality on Tiller Production in *Lolium* spp. *Plant. Physiol.* 72:900-902.
- Devkota NR, Kemp P, Hodgson J, Valentine I, Jaya IKD. 2008. Relationship between tree canopy height and the production of pasture species in a silvopastoral system based on alder trees. *Agroforestry Systems*. 76:363-374.
- Direction de l'information légale et administrative. 2017. *Quelles sont les caractéristiques d'une Scop ?* [html page]. Service-Public-Pro. <https://www.service-public.fr/professionnels-entreprises/vosdroits/F31328>.
- Direction Générale de l'Énergie et du Climat. 2013. *Rapport de la France au titre du paragraphe 2 de l'article 3 de la décision n°280/2004/CE du Parlement européen et du Conseil du 11 février 2004 – actualisation 2013*. 178:73-84.
- Dudouet C. 2012. *La production du mouton*. Paulais AM (eds.). France Agricole, Paris. 336p.
- Dumont B. 1995. Déterminisme des choix alimentaires des herbivores au pâturage : principales théories. *Prod. Anim.* 8(4):285-292.
- Dumont B, Farrugia A & Garel JP. 2007. Pâturage et biodiversité des prairies permanentes. *Renc. Rech. Ruminants* 14:17-24.
- Dumont B, Meuret M, Boissy A & Petit M. 2001. Le pâturage vu par l'animal : mécanismes comportementaux et applications en élevage. *Fourrages*, 166:213-238.
- Dupraz C. 2003. *Roumassouze (Vézénobres) – 8 ans d'agroforesterie* [présentation]. 97p.
- Dupraz C. 2010. « Ça ne marchera jamais ! » (qu'ils disaient ...). *La revue française des arbres ruraux*.
- Dupraz C. 2016. L'ascenseur hydraulique ou comment les arbres redistribueraient l'eau du sol. *La revue française des arbres ruraux*.
- Dupraz C & Capillon A. 2006. *L'agroforesterie : une voie de diversification écologique de l'agriculture européenne ?* 11p.
- Dupraz C & Liagre F. 2008. *Agroforesterie : des arbres et des cultures*. France Agricole, Paris. 420p.
- Duru M, Balent G, Gibon A, Magda D, Theau JP, Cruz P & Jouany C. 1998. Fonctionnement et dynamique des prairies permanentes. Exemple des Pyrénées centrales. *Fourrages*, 153:97-113.
- Duru M., Cruz P., Magda D. 2008. La conduite des couverts prairiaux, source de flexibilité in *L'élevage en mouvement. Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores*. Dedieu B., Chia E., Leclerc B., Moulin C.H., Tichit M. (eds.). Quae, 57-72.
- Duru M, Cruz P & Theau JP. 2010 Évaluer la souplesse d'utilisation des prairies permanentes par la caractérisation de la composition fonctionnelle de la végétation et la phénologie des espèces. *Fourrages*. 201:3-10.
- Duru M, Cruz P, Theau JP, Jouany C, Ansquer P, Al Haj Khaled R & Therond O. 2007. Typologies de prairies riches en espèces en vue d'évaluer leur valeur d'usage : bases agro-écologiques et exemples d'application. *Fourrages*. 192:453-475.
- EchoAlpes. *Les outils de diagnostic et de pilotage de la végétation d'alpage*. 13p.
- Eichhorn MP, Paris P, Herzog F, Incoll LD, Liagre F, Mantzanas K, Mayus M, Moreno G, Papanastasis VP, Pilbeam DJ, Pisanelli A & Dupraz C. 2006. Silvoarable systems in Europe – past, present and future prospects. *Agroforestry Systems* 67:29-50.

- Esperschuetz J, Balaine N, Clough T, Bulman S, Dickinson NM, Horswell J & Robinson BH. 2017. The potential of *L. scoparium*, *K. robusta* and *P. radiata* to mitigate N losses in silvopastoral systems. *Environmental Pollution* 225:12-19.
- FAO, WFP, & IFAD. 2012. *The State of Food Insecurity in the World 2012. Economic Growth is necessary but not Sufficient to Accelerate Reduction of Hunger and Malnutrition*. FAO, Rome, Italy, pp. 1-61.
- FCCC. 2015. *Convention-cadre sur les changements climatiques*. 39p.
- Fages R & Mignot C. 2015. A. *Place et perception des systèmes agroforestiers en élevage – synthèse des entretiens menés dans les Deux Sèvres*. Hannachi Y & Moreau JC (coord.). 12p.
- Fages R & Mignot C. 2015. B. *Place et perception des systèmes agroforestiers en élevage – synthèse des entretiens menés en Ille et Vilaine*. Hannachi Y & Moreau JC (coord.). 12p.
- Fages R & Mignot C. 2015. C. *Place et perception des systèmes agroforestiers en élevage – synthèse des entretiens menés en Soane et Loire*. Hannachi Y & Moreau JC (coord.). 12p.
- Fages R & Mignot C. 2015. D. *L'arbre dans les exploitations d'élevage herbivore : des fonctions et usages multiples- Synthèse des entretiens menés dans le Gers*. 8p.
- Fages R & Mignot C. 2015. E. *L'arbre dans les exploitations d'élevage herbivore : des fonctions et usages multiples- Synthèse des entretiens menés dans le Lot*. 6p.
- Fages R & Mignot C. 2015. F. *L'arbre dans les exploitations d'élevage herbivore : des fonctions et usages multiples- Synthèse des entretiens menés dans les Pyrénées*. 7p.
- Farrié JP, Launay F & Devun J. 2012. Place et utilisation des prairies permanentes dans les élevages en France. *Fourrages*. 21:205-212
- Farrugia A, Martin B, Baumont R, Prache S, Doreau M, Hoste H & Durand D. 2008. Quels intérêts de la diversité floristique des prairies permanentes pour les ruminants et les produits animaux ?. *Prod Anim.*, 21(2):181-200.
- Francour P. *Comment mesurer la biodiversité ?*. Université de Nice & Ecomer. 59p.
- Gargaglione V, Peri PL & Rubio G. 2014. Tree–grass interactions for N in *Nothofagus antarctica* silvopastoral systems: evidence of facilitation from trees to underneath grasses. *Agroforest Syst.* 88:779-790.
- George SJ, Mohan Kumar B, Wahid PA & Kamalam NV. 1996. Root competition for phosphorus between the tree and herbaceous components of silvopastoral systems in Kerala, India. *Plant and Soil* 179:189-196.
- Ginane C, Dumont B, Baumont R, Prache S, Fleurance G & Farrugia A. 2008 Comprendre le comportement alimentaire des herbivores au pâturage : intérêts pour l'élevage et l'environnement. *Renc. Rech. Ruminants* 15:315-322.
- GNIS. *Les méthodes d'amélioration des prairies* [html page]. <http://www.prairies-gnis.org/pages/methodes3.htm>
- Gosse C, Varlet-Grancher C, Bonhomme R, Chartier M, Allirand JM & Lemaire G. 1986. Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*. 6(1):47-56.
- Grall J & Coïc N. 2006. *Synthèse des méthodes d'évaluation de la qualité du benthos en milieu côtier*. Institut Universitaire Européen de la Mer & Université de Bretagne Occidentale Laboratoire des sciences de l'Environnement MARin (eds.). 91p.
- Grime JP, Hodgson JG & Hunt R. 1988. *Comparative plant ecology. A functional approach to common British species*. Unwin, Hyman, London, 742 pp.
- Guevara-Escobar A, Kemp PD, Hodgson J, Mackay AD & Edwards WRN. 1997. Case study of a mature *Populus deltoides*–pasture system in a hill environment. *Proceedings of the New Zealand Grassland Association*. 59:179-185.
- Guevara-Escobar A, Edwards WRN, Morton RH, Kemp PD & Mackay AD. 1998. Tree water use and rainfall partitioning in a mature poplar–pasture system. *Tree Physiology*. 20:97-106.
- Howell J. 2005. Les vaches auraient-elles aussi une culture ? Un éleveur du Colorado témoigne. *Fourrages* 184:579-582.
- Institut de l'Élevage. 2014. *L'ARBre dans les exploitations d'ÉLEVage herbivore : des fonctions et usages multiples*. 49p.
- Institut National pour la Recherche Agronomique & Institut Technique des Céréales et des Fourrages. 1975. *Clé de détermination de*

- quelques graminées au stade herbacé. Association de Coordination Technique Agricole, Paris. 2p.
- Jeangros B & Amaudruz M. 2005. Dix ans d'observations sur la phénologie des prairies permanentes en Suisse romande. *Revue Suisse Agricole*. 37(5):201-209.
- Jeangros B, Troxler J, Conod D, Scehovic J, Bosset JO, Bütikofer U, Gauch R, Mariaca R., Pauchard JP & Sieber R. 1997. Relations entre les caractéristiques de l'herbe et celles du fromage. Présentation et premiers résultats d'une étude pluridisciplinaire. *Fourrages*. 152:437-449.
- Joffre R, Leiva Morales JM, Rambal S & Fernandez Ales R. 1987. Dynamique racinaire et extraction de l'eau du sol par des graminées pérennes et annuelles méditerranéennes. *Acta Oecologica, Oecol. Plant*. 8(22)2 :181-194.
- Jones M, Sinclair FL & Grime VL. 1998. Effect of tree species and crown pruning on root length and soil water content in semi-arid agroforestry. *Plant and Soil*. 201:197-207.
- Jose S & Gillespie AR. 1998. Allelopathy in black walnut (*Juglans nigra* L.) alley cropping. II) Effects of juglone on hydroponically grown corn (*Zea mays* L.) and soybean (*Glycine max* L. Merr.) growth and physiology. *Plant and Soil*. 203:199-205
- Jose S, Gillespie AR, & Pallardy SG. 2004. Interspecific interactions in temperate agroforestry. *Agroforestry Systems*. 61:237-255
- Josien E. 2012. Nouveaux regards sur les prairies permanentes : des atouts pour demain. *Fourrages*. 211:179-180.
- Kainkwa RMR & Stigter CJ. 2000. Measuring wind gradients in agroforestry systems by shaded piche evaporimeters - I. Validation of the square-root dependence on wind speed. *Int. Agrophysics*. 14:279-289.
- Kallenbach RL, Kerley MS & Bishop-Hurley GJ. 2006. Cumulative forage production, forage quality and livestock performance from annual ryegrass and cereal rye mixture in a Pine-Walnut Silvopasture. *Agroforestry Systems* 66:43-53.
- Lançon J. 1978. A. Les restitutions du bétail au pâturage et leurs effets (1ère partie). *Fourrage*. 75:55-88.
- Lançon J. 1978. B. Les restitutions du bétail au pâturage et leurs effets (2ème partie). *Fourrage*. 76:91-122.
- Laflotte A. 2015. *Gestion de l'herbe et pâturage ovin en verger de prunier* [présentation]. ENSAIA. 25p.
- Leconte D. *Clé de détermination des principales graminées prairiales*. Groupement National Interprofessionnel des semences et plants. 4p.
- Le Monde & AFP. 2010. *Le climat, préoccupation majeure de la population mondiale* [html page]. Le Monde. http://www.lemonde.fr/planete/article/2010/10/26/le-climat-preoccupation-majeure-de-la-population-mondiale_1431201_3244.html#Jr4gQBzWRycmT8cp.99.
- Les Scop. *Qu'est ce qu'une SCOP* [html page]. Les Scop. <http://www.les-scop.coop/sites/fr/les-scop/qu-est-ce-qu-une-scop.html>.
- Les Scop. 2015. *Les chiffres clefs* [html page]. Les Scop. <http://www.les-scop.coop/sites/fr/les-chiffres-cles/>
- Lin CH, McGraw RL, George MF & Garrett HE. 1999. Shade effects on forage crops with potential in temperate agroforestry practices. *Agroforestry Systems*. 44:109-119
- Limbou P. *Clé de détermination des principales graminées prairiales au stade végétatif*. Fourrages Mieux. 5p.
- Loucougaray G, Gos P, Dobremez L, Nettier B, Pauthenet Y & Lavorel S. Pratiques agricoles et propriétés agro-écologiques des prairies dans un processus d'intensification écologique : le cas de l'élevage bovin dans le Vercors in *Actes du séminaire « Forêts et écosystème cultivés : vers une intensification écologique ? »*. 7p.
- Marcuvitz S & Turkington R. 2000. Differential effects of light quality, provided by different grass neighbours, on the growth and morphology of *Trifolium repens* L. (white clover). *Oecologia*. 125:293-300.
- Menzies P. 2006. *Manuel de lutte contre les parasites internes du mouton*. 70p.
- Meuret M. 1997. Prairies, parcours : comment utiliser les compléments ? *Réussir-Pâtre* 445:19-22.
- Meuret M. 2010. A. Stimuler l'appétit lors des circuits de garde : échange d'expériences entre un berger et un chevrier in *Un savoir-*

- faire de berger*. Meuret M. (eds.). Edition Quae & Educagri éditions, Mauguio. p:149-165.
- Meuret M. 2010. B. Modèle Menu : le berger vu comme un chef cuisinier in *Un savoir-faire de berger*. Meuret M. (eds.). Edition Quae & Educagri éditions, Mauguio. p:167-192.
- Meuret M. 2014. Des ressources fourragères à construire en tenant compte du point de vue de l'animal in *Espaces pastoraux, espaces de productions agricoles*. Association Française de Pastoralisme & Cardère (eds.). p:15-23
- Meuret M & Agreil C. *Des broussailles au menu*. 4p.
- Michaud D. 2003. La vache laitière à haute qualité territoriale (VLHQT). *Courrier de l'environnement de l'INRA*. 46:45-52.
- Ministère de l'Agriculture. 2015. *Les prairies permanentes*. 4p.
- Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Pêche. 2010. *CIRCULAIRE DGPAAT/SDBE/SDFB/C2010-3035*. 18p.
- Monteith JL, Ong CK & Corlett J. 1991. Microclimatic interactions in agroforestry systems. *Forest Ecology and Management*. 45:31-44.
- Montero MJ & Moreno G. *Light availability for understory pasture in Holm-oak dehesas*. 4p.
- Moreau JC, Ruget F, Ferrand M, Souverain F, Poisson S, Lannuzel F & Lacroix B. 2008. Prospective autour du changement climatique : adaptation de systèmes fourragers. *Renc. Rech. Ruminants*. 15:193-200.
- Moreno G, Obrador JJ & Garcia A. 2007. Impact of evergreen oaks on soil fertility and crop production in intercropped dehesas. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 119:270-280.
- Mosquera-Losada MR, Moreno G, Pardini A, McAdam JH, Papanastasis V, Burgess PJ, Lamersdorf N, Castro M, Liagre F & Rigueiro-Rodriguez A. 2012. Past, Present and Future of Agroforestry Systems in Europe in *Agroforestry in Europe* p 285-312.
- Moustakas A, Kunin E, Cameron C & Sankaran M. 2013. Facilitation or competition? Tree effects on grass biomass across a precipitation gradient. *PLoS ONE* 8(2)
- Obrador JJ & Moreno G. *Soil nutrient status and forage yield at varying distances from trees in four dehesas in Extremadura, Spain*. 3p.
- Oteng'I SBB, Stigter CJ, Ng'Ang'A JK & Mungap DN. 2000. Wind protection in a hedged agroforestry system in semiarid Kenya. *Agroforestry Systems*. 50:137-156.
- Palma JHN, Oliveira TS, Crous-Duran J & Paulo JA. 2016. Using Yield-SAFE model to assess hypothetical eucalyptus silvopastoral systems in Portugal in *3rd European Agroforestry Conference Book of Abstracts*. Gosme M et al. (eds.). European Agroforestry Federation, Montpellier, p:348-351.
- Peri PL, Lucas RJ & Moot DJ. 2007. Dry matter production, morphology and nutritive value of *Dactylis glomerata* growing under different light regimes. *Agroforest Syst* 70:63-79.
- Peri PL, Bahamonde HA, Lencinas MV, Gargaglione V, Soler R, Ormaechea S. 2016. A review of silvopastoral systems in native forests of *Nothofagus antarctica* in southern Patagonia, Argentina. *Agroforest Syst*. 90:933-960.
- Peyraud JL, Peeters A & De Vliegheer A. 2012. Place et atouts des prairies permanentes en France et en Europe. *Fourrages*. 211:195-204.
- Plantureux S, Pottier E, Carrère P. La prairie permanente : nouveaux enjeux, nouvelles définitions ?. *Fourrages*. 211:181-193.
- Porter JR & Xie L. 2014. Chapter 7 : Food Security and Food Production Systems in *IPCC WGII AR5*. GIEC.
- Pottier E, Michaud A, Farrié JP, Plantureux S & Baumont R. 2012. Les prairies permanentes françaises au cœur d'enjeux agricoles et environnementaux. *Innovations Agronomiques*. 25:85-97.
- Pouvaret S. 2014. *Que me disent les plantes de ma prairie ? Un guide pour l'identification de plantes indicatrices de pratiques agricoles. Un outil compagnon de l'éleveur pour comprendre ses pratiques sur le territoire des moyennes montagnes d'Auvergne*. Conservatoire d'espaces naturels d'Auvergne & Fédération régionale des centres d'initiatives pour valoriser l'agriculture et le milieu rural en Auvergne, Agriculture Durable de Moyenne Montagne (eds.). 129 p.
- R Core Team (2017). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

- Rameau JC, Mansion D, Dumé G, Gauberville G, Bardat J, Bruno E & Keller R. 2008. *Flore forestière française, guide écologique illustré*. Institut pour le Développement Forestier, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Direction de la forêt et des affaires rurales, AgroParisTech-ENGREF & Inventaire forestier national (eds.), Paris. 2434p.
- Rizvi SJ, Haque H, Singh VK, Rizvi V. 1992. A discipline called allelopathy in *Allelopathy, basic and applied aspects*.
- Roth PL & Mitchell RJ. 1982. Effect of selected cover crops on the growth of black walnut in *Black Walnut for the Future*. North Central Forest Experiment Station. p110-113.
- Roudaut F, Aussibal G, Beylier B, Garde L & Gautier D. 2007. La broussaille, un atout pour le pâturage. *Renc. Rech. Ruminants*. 14:161-164.
- RPAPN. *Impact des différents modes de gestion, fauche et de pâturage* [html page]. La Biodiversité en Poitou-Charentes. <http://www.biodiversite-poitou-charentes.org/Impact-des-differents-modes-de-gestion-fauche-et-de.html>
- Rust S & Savill PS. 2000. The root systems of *Fraxinus excelsior* and *Fagus sylvatica* and their competitive relationships. *Forestry*. 73(5):499-508
- Sérès C. 2010. Changement climatique et agriculture d'élevage en zone de montagne : premiers éléments de réflexion. *Courrier de l'INRA*, 58:21-36.
- Sanchez-Jardon J, Acosta B, Elizalde HF, del Pozo A, Casado MA, Ovalle C, Hepp C & de Miguel JM. 2010. Floristic composition and herbage quality changes with tree cover in NW Patagonia, Chile. *Grassland Science un Europe*. 15:554-556.
- Sharrow. S. 2007. Soil compaction by grazing livestock in silvopastures as evidenced by changes in soil physical properties. *Agroforestry Systems* 71:215-223.
- Sibbald A. 2006. Silvopastoral Agroforestry a Land Use for the Future. *Scottish Forestry*. 60(1)
- Silva-Pando FL, Gonzalez-Hernandez MP & Rozados-Lorenzo MJ. 2002. Pasture production in a silvopastoral system in relation with microclimate variables in the atlantic coast of Spain. *Agroforestry Systems* 56:231-211.
- Stigter CJ, Mohammed AE, Nasr Al-amin NK, Onyewotu LOZ, Oteng'I SBB, Kainkwa RMR. 2002. Agroforestry solutions to soma African wind problems. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 90:1101-1114.
- Streeter D, Hart-Davis C, Hardcastle A, Cole F & Harper L. 2011. *Guide Delachaux des fleurs de France et d'Europe*. Delachaux et Niestlé, Paris. 706p.
- Theau JP, Cruz P, Fallour D, Jouany C, Lecloux E & Duru M. 2010. Une méthode simplifiée de relevé botanique pour une caractérisation agronomique des prairies permanentes. *Fourrages*. 201:19-25.
- Theau JP & Pauthenet Y. *Com. Pers*.
- Torquebieau E. 2007. *L'agroforesterie : des arbres et des champs*. CIRAD, l'Harmattan, Paris. 156p.
- Tripathi G, Deora R & Singh G. 2013. The influence of litter quality and micro-habitat on litter decomposition and soil properties in a silvopasture system. *Acta oecologica* 50:40-50.
- Vézina A. 2001. *Les haies brises vent*. Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. 18p.
- Wallace J. 2013. *La gestion des parasites internes du mouton* [html page]. Centre d'agriculture biologique du Canada. http://www.organiccentre.ca/NewspaperArticles/tcog_2012/tcog_sheep_parasites_f.asp
- Wang Q, Xu Z, Hu T, ur Rehman H, Chen H, Bo Ding Z & Hu H. 2014. Allelopathic activity and chemical constituents of walnut (*Juglans regia*) leaf litter in walnut-winter vegetable agroforestry system. *Natural Product Research*. 4p.
- Wezel A, Bellon S, Doré T, Francis C, Vallod D & David C. 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 29(4):503-515
- Willis RJ. 2000. *Juglans* ssp., juglone and allelopathy. *Allelopathy Journal*. 7(1):1-55.

Annexes

Annexe 1 : Présentation des modalités étudiées

Tableau 7 : Descriptions des modalités d'étude (NB : Ajout de la modalité têtard pour le site de Theix)

Variables	Modalités	Groupe de quadras étudiés	Nombre de répétitions
Traitement	Agroforesterie (AF)	AFNA, AFNB, AFNC, AFSA, AFSB, AFSC	18
	Zone témoin (ZT)	ZT	5
Exposition	Au nord de l'arbre (AFN)	AFNA, AFNB	6
	Au sud de l'arbre (AFS)	AFSA, AFSB	6
	Dans l'inter-rang (AFIR)	AFNC, AFSC	6
	Zone témoin (ZT)	ZT	5
Distance a l'arbre	A un mètre (AFA)	AFNA, AFSA	6
	A un quart de la distance avec l'arbre suivant (AFB)	AFNB, AFSB	6
	Dans l'inter-rang (AFIR)	AFNC, AFSC	6
	Zone témoin (ZT)	ZT	5
Situation	Concaténation entre l'exposition et la distance (ex : à un mètre au nord de l'arbre)	(ex : AFNA)	3
	Dans l'inter-rang (AFIR)	AFNC, AFSC	6
	Zone témoin (ZT)	ZT	5

Annexe 2 : Résultats des analyses statistiques sur les rendements

Tableau 8 : Résultats des analyses statistiques sur les rendements

Site	Variable	Traitements			Positions			
		Test	p-val	post-hoc	Test	p-val	post-hoc	
Lalosse	Rendements	P1	T-test	0.03351	x	Anova	0.157	x
		P2	T-test	0.2742	x	Anova	0.904	x
		Totaux	T-test	0.414	x	Anova	0.888	x
		Var	Wilcoxon	0.0151	x	Anova	0.266	x
	TMS	P1	Wilcoxon	0.9138	x	Anova	0.243	x
		P2	T-test	0.1005	x	Anova	0.0176	(zt-afir)
		Moy	Wilcoxon	0.8006	x	Anova	0.3928	x
Theix	Rendements	P1	Kruskal	8.766e-07	AF - AFT & ZT	Kruskal	0.0006752	Pbs post hoc
		P2	Kruskal	2.872e-06	AF -AFT -ZT	Kruskal	0.0004996	Pbs post hoc
		Totaux	Kruskal	2.482e-07	AF -AFT -ZT	Kruskal	0.0002496	Pbs post hoc
		Var	Kruskal	0.1274	x	Anova	0.0397	Pbs post hoc
	TMS	P1	Kruskal	0.01402	AF - ZT	Anova	0.00378	AFSA
		P2	Anova	0.00364	ZT - AF & AFT	Anova	0.012	(zt-aftnb)
		Moy	Anova	0.0253	AF - ZT	Anova	0.0193	Pbs post hoc
Pomy	Rendements	P1	T-test	0.1084	x	Anova	0.838	x
		P2	T-test	0.02786	x	Anova	0.282	x
		Totaux	T-test	0.01084	x	Anova	0.312	x
		Var	T-test	0.7478	x	Anova	0.584	x
	TMS	P1	Wilcoxon	0.9138	x	Kruskal	0.9929	x
		P2	T-test	0.1067	x	Anova	0.205	x
		Moy	T-test	0.3066	x	Anova	0.939	x
Bonnefont	Rendements	P2	T-test	0.005353	x	Anova	0.0762	x
	TMS	P2	T-test	0.4019	x	Anova	0.13	x

Annexe 3 : Graphiques des variables des Analyses en Composante Principale sur les recouvrements des espèces

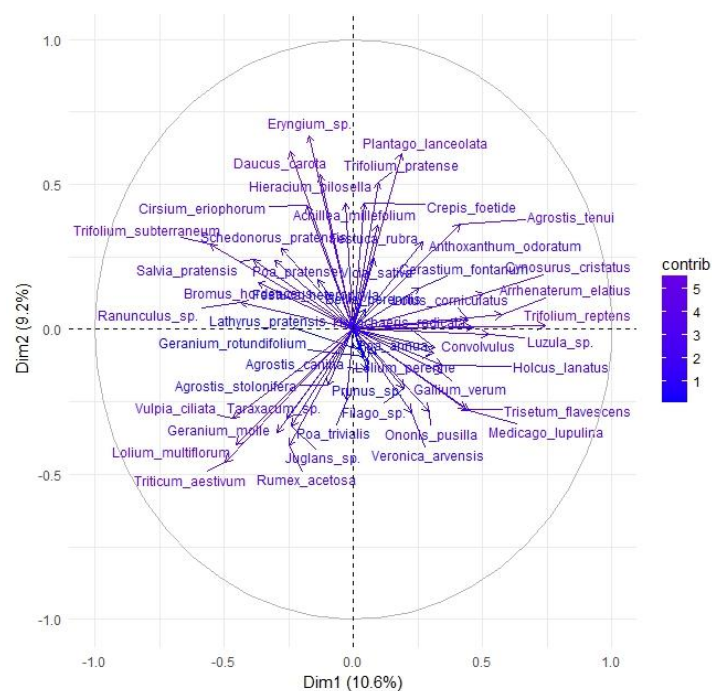


Figure 46 : Graphique des variables du plan factoriel formé par les deux premières dimensions de l'Analyse en Composante Principale sur l'abondance des espèces du site de Bonnefont

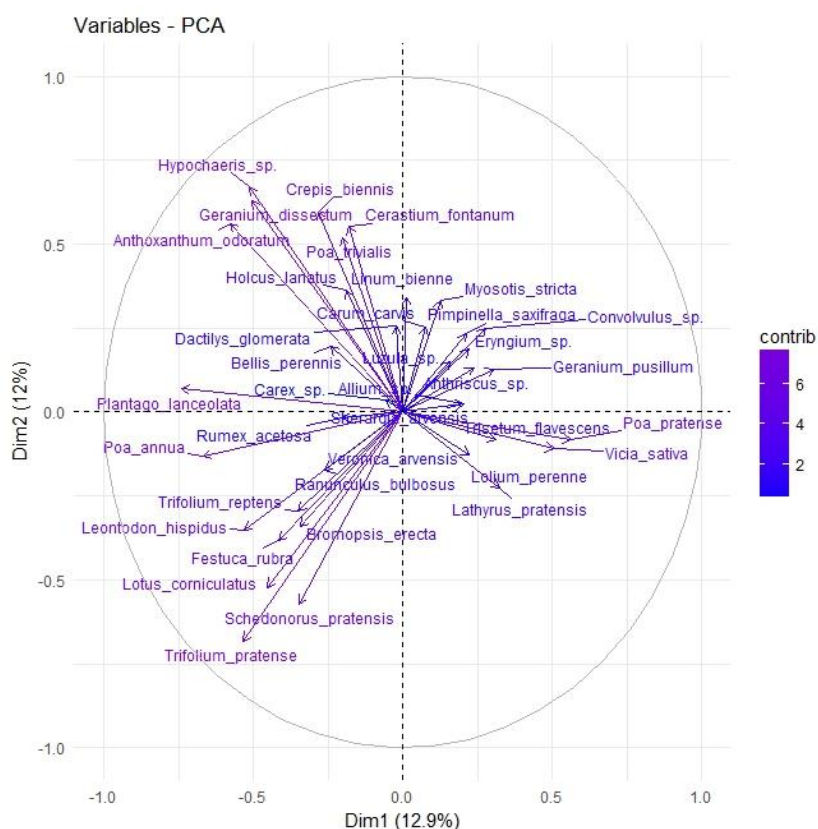


Figure 47 : Graphique des variables du plan factoriel formé par les deux premières dimensions de l'Analyse en Composante Principale sur l'abondance des espèces du site de Lalosse

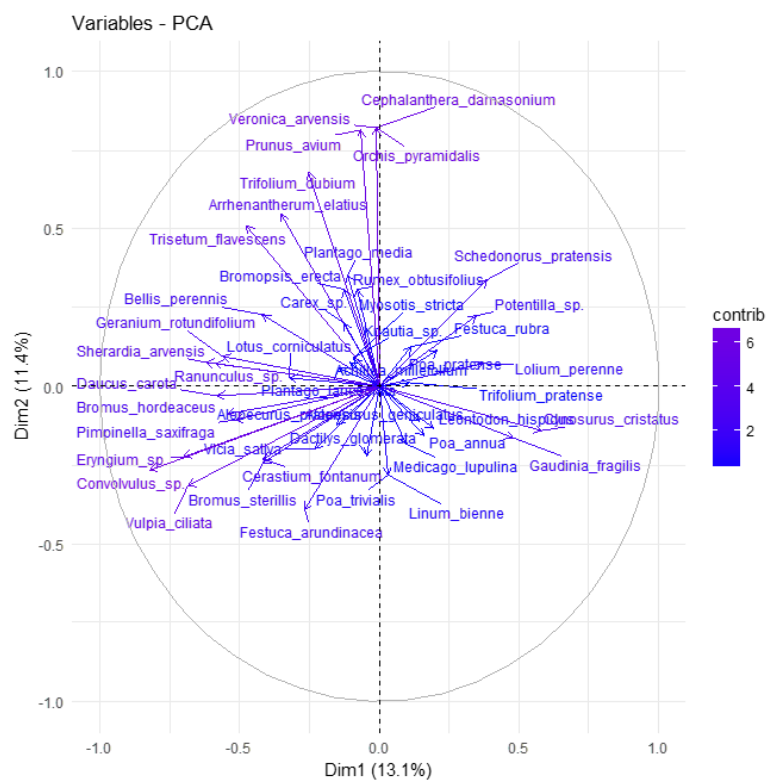


Figure 48 : Graphique des variables du plan factoriel formé par les deux premières dimensions de l'Analyse en Composante Principale sur l'abondance des espèces du site de Pomy

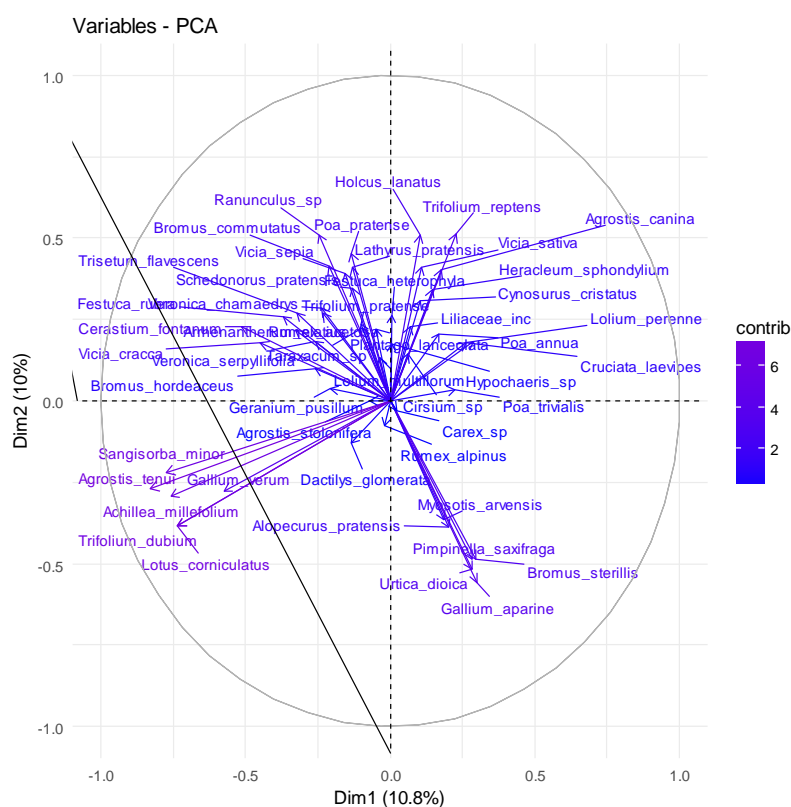


Figure 49 : Graphique des variables du plan factoriel formé par les deux premières dimensions de l'Analyse en Composante Principale sur l'abondance des espèces du site de Theix

Annexe 4 : Résultats des analyses des indices de Dufrene – Legendre

Tableau 9 : Résultats des analyses des indices de Dufrene Legendre sur les espèces indicatrices des différentes situations étudiées sur les sites de Bonnefont, Lalosse et Pomy (attention : recouvrement issue de la transformation du coefficient de Braun Blanquet)

Site	Espèce	Indice de Dufrene Legendre						P-value
		AFIR	AFNA	AFNB	AFSA	AFSB	ZT	
Bonnefont	<i>Agrostis tenui</i>	0,164	0,115	0,369	0,0109	0,003	0,236	0,003
		20%	17,50%	37,50%	1,70%	0,80%	24%	
	<i>Hypochaeris radicata</i>	0	0	0,048	0	0	0,857	0,0002
				0,80%			5%	
	<i>Medicago lupulina</i>	0	0	0	0	0	1	3,00E-05
							5%	
	<i>Plantago lanceolata</i>	0,321	0,03	0,122	0,024	0,031	0,275	0,009
		2,90%	0,80%	1,70%	0,30%	0,80%	2,50%	
Lalosse	<i>Poa trivialis</i>	0,001	0,713	0,165	0,005	0,005	0	0,015
		0,40%	38,30%	13,30%	0,80%	0,80%		
	<i>Trifolium subterraneum</i>	0,166	0	0	0	0,833	0	2,00E-05
		2,20%				10,80%		
	<i>Vulpia ciliata</i>	0,029	0	0	0,005	0,743	0,073	0,006
		3,30%			0,80%	42,50%	10,50%	
	<i>Bellis perennis</i>	0,263	0,193	0,023	0,193	0,07	0,168	0,015
		2,50%	1,80%	0,30%	1,80%	1%	2%	
Pomy	<i>Arrhenatherum elatius</i>	0,4444	0,1111	0	0	0	0	0,0333
		1,60%	1%					
	<i>Festuca arundinacea</i>	0	0	0,6667	0	0	0	0,0487
				1,70%				
	<i>Gaudinia fragilis</i>	0,0204	0,0297	0,0545	0,0124	0,0124	0,7584	0,0005
		0,90%	1%	1,80%	0,80%	0,80%	17%	
	<i>Schedonorus pratensis</i>	0,1461	0,0329	0,0082 (0,8%)	0,0741	0,1152	0,5037	0,0262
		5,90%	1,70%	0,80%	3%	0,80%	17%	
	<i>Trifolium dubium</i>	0,4444	0	0	0	0,1111	0	0,0335
		1,70%				0,80%		

Tableau 10 : Résultat de l'analyse des indices de Dufrene Legendre sur les espèces indicatrices du site de Theix (attention : recouvrement issue de la transformation du coefficient de Braun Blanquet)

Espèce	Indice de Dufrene - Legendre							P-value
	AFIR	AFN	AFS	AFTIR	AFTN	AFTS	ZT	
<i>Achillea millefolium</i>	0	0	0	0	0,0483 (0,8%)	0,0121 (0,4%)	0,6261 (4,5%)	0,0010
<i>Agrostis tenui</i>	0,0032 (0,4%)	0,0195 (2,5%)	0,0195 (2,5%)	0	0	0,0195 (2,5%)	0,3782 (13,5%)	0,0310
<i>Alopecurus pratensis</i>	0,0192 (2,5%)	0,0769 (3,3%)	0,6090 (15,8%)	0	0	0	0	0,0020
<i>Bromus hordeaceus</i>	0,0026 (0,4%)	0	0,0026 (0,4%)	0,0026 (0,4%)	0,0392 (6,3%)	0,0005 (0,1%)	0,7147 (19%)	0,0020
<i>Gallium aparine</i>	0,1563 (7,1%)	0,0613 (2,1%)	0,4933 (13,4%)	0	0,0006 (0,1%)	0	0	0,0340
<i>Sangisorba minor</i>	0	0	0	0	0	0	0,4000 (1%)	0,0160
<i>Trifolium reptens</i>	0,1286 (17,5%)	0,0413 (7,5%)	0,0184 (3,3%)	0,2870 (31,3%)	0,1607 (14,6%)	0,1110 (12,1%)	0,0397 (4,5%)	0,0490
<i>Vicia cracca</i>	0	0	0	0	0	0,0490 (0,4%)	0,2824 (1%)	0,0420

Tableau 11 : Résultats des analyse des indices de Dufrene Legendre sur les espèces indicatrices des zones agroforestières (têtard ou haut jet) et des zones témoins (attention : recouvrement issue de la transformation du coefficient de Braun Blanquet)

Site	Espece	Indice de Dufrene - Legendre			P-value
		AF	AFT	ZT	
Bonnefont	<i>Hypochaeris radicata</i>	0,002 0,20%		0,973 5%	0,0001
	<i>Luzula sp.</i>	0		0,4 1%	0,038
	<i>Medicago lupulina</i>	0		1 5%	0,00001
	<i>Trifolium reptens</i>	0,146 1%		0,709 2,50%	0,028
	<i>Myosotis stricta</i>	0,722 2,80%		0	0,019
	<i>Poa trivialis</i>	0,777 6,80%		0,014 0,50%	0,027
Lalosse	<i>Trifolium pratense</i>	0,033 1,10%	X	0,481 4,50%	0,047
	<i>Cynosurus cristatus</i>	0,0748 1,70%		0,6462 7%	0,0444
	<i>Dactylis glomerata</i>	0,7778 2,60%		0	0,0244
Pomy	<i>Gaudinia fragilis</i>	0,0292 1,10%		0,9415 17%	0,0002
	<i>Geranium rotundifolium</i>	0,672 2,10%		0,0387 0,50%	0,0167
	<i>Medicago lupulina</i>	0,9444 7,60%		0	0,0002
	<i>Schedonorus pratensis</i>	0,1313 3,80%		0,8182 17%	0,0113
	<i>Achillea millefolium</i>	0	0,0141 0,40%	0,7322 4,50%	0,001
	<i>Agrostis canina</i>	0,0077 1%	0,6205 13,10%	0	0,009
	<i>Agrostis tenui</i>	0,0186 1,80%	0,0029 0,80%	0,5019 13,00%	0,008
Theix	<i>Alopecurus pratensis</i>	0,5 7,20%	0	0	0,007

<i>Bromus hordeaceus</i>	0,0014 0,30%	0,0174 2,25%	0,8826 19%	0,001
<i>Cerastium fontanum</i>	0,0093 0,30%	0,1555 1%	0,484 2%	0,032
<i>Cruciata laevipes</i>	0,0958 1,40%	0,5096 2,60%	0	0,015
<i>Gallium aparine</i>	0,6642 7,50%	0,0002 >0,1%	0	0,008
<i>Geranium pusillum</i>	0	0	0,6 1,40%	0,001
<i>Heracleum sphondylium</i>	0	0,3333 0,80%	0	0,027
<i>Lathyrus pratensis</i>	0,006 0,10%	0,4457 1,10%	0	0,014
<i>Pimpinella saxifraga</i>	0,8475 12,10%	0,0285 1,40%	0	0,001
<i>Ranunculus sp</i>	0,0289 0,60%	0,4329 2,20%	0,2104 1,50%	0,047
<i>Sanguisorba minor</i>	0	0	0,4 1%	0,011
<i>Trifolium reptans</i>	0,1578 9,40%	0,5161 19,30%	0,1083 4,50%	0,031
<i>Vicia cracca</i>	0	0,0068 0,10%	0,3512 1%	0,036
<i>Vicia sativa</i>	0	0,3993 1,30%	0,0563 0,50%	0,017

Tableau 12 : Résultats des analyses des indices de Dufrene Legendre sur les types indicateurs des zones agroforestières (têtard ou haut jet) et des zones témoins (attention : recouvrement issue de la transformation du coefficient de Braun Blanquet)

Site	Espèce	Indice de Dufrene - Legendre			P-value
		AF	AFT	ZT	
Lalosse	b	0,715	X	0,171	0,009
		17,80%		11,80%	
	D2M	0,764		0,189	0,005
		10,10%		3,10%	
Pomy	D2M	0,7444		0,0424	0,0042
		3,70%		1%	
	Es	0,2951		0,6876	0,049
		8,90%		19, 5%	
Theix	D2B	0	0,0068	0,3512	0,0348
			0,10%	1%	
	D2M	0,7528	0,1204	0,1117	0,0005
		20,20%	3,60%	3%	
	D3H	0	0,3333	0	0,0243
			0,80%		
	D3M	0	0,0141	0,7322	0,0009
			0,40%	4,50%	
	Es	0,0011	0,1613	0,7486	0,0012
		0,30%	7,10%	22%	
	Leg	0,1287	0,592	0,1762	0,0007
		9,90%	25,20%	7,50%	

Tableau 13 : Résultats de l'analyse des indices de Dufrene – Legendre sur les types indicateurs des différentes expositions sur le site de Theix (attention : recouvrement issue de la transformation du coefficient de Braun Blanquet)

TYPE	Indice de Dufrene - Legendre							P-VALUE
	AFIR	AFN	AFS	AFTIR	AFTN	AFTS	ZT	
D2B	0	0	0	0	0	0,0490 (0,4%)	0,2824 (1%)	0,0459
D3M	0	0	0	0	0,0483 (0,8%)	0,0121 (0,4%)	0,6261 (4,5%)	0,0018
Es	0,0016 (0,4%)	0	0,0016 (0,4%)	0,1258 (6,7%)	0,0660 (8,8%)	0,1116 (5,9%)	0,4981 (22%)	0,0049
Leg	0,1085 (18,3%)	0,0351 (7,9%)	0,0148 (3,3%)	0,3595 (40,5%)	0,1635 (18,4%)	0,1479 (16,7%)	0,0666 (7,5%)	0,0001