



Université de Montpellier

Mémoire déposé en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches

École Doctorale GAIA

Filière EFSA

«Impact croisé du climat et de la gestion sur la végétation des pâturages : apport des outils numériques»

Simon Taugourdeau

CIRAD UMR SELMET

Systèmes d'Élevage Méditerranéens et Tropicaux

Soutenu le :

03/07/2024

Montpellier

Devant le jury composé de :

Mme Agnès Bégué Rapportrice
Directrice de Recherche- HDR , CIRAD UMR TETIS
Mme Servane Lemauiel- Lavenant , Rapportrice
Maître de conférences-HDR, Université de Caen ,UMR EVA Université de Caen INRAE
M Gianni Bellocchi Rapporteur
Directeur de Recherche-HDR , INRAE UMR UREP
M Fabrice Vinatier Examineur
Chargé de Recherche, INRAE – UMR LISAH
Mme Gaelle Damour Examinatrice
Directrice de Recherche- HDR , CIRAD UMR GECO
M Abdelilah Araba, Examineur
Professeur, Institut Hassan II
M Christian Corniaux (Membre invité)
Chercheur , CIRAD UMR SELMET

Avant-propos

« Je déclare avoir respecté, dans la conception et la rédaction de ce mémoire d'HDR, les valeurs et principes d'intégrité scientifique destinés à garantir le caractère honnête et scientifiquement rigoureux de tout travail de recherche, visés à l'article L.211-2 du Code de la recherche et énoncés par la Charte nationale de déontologie des métiers de la recherche et la Charte d'intégrité scientifique de l'Université de Montpellier. Je m'engage à les promouvoir dans le cadre de mes activités futures d'encadrement de recherche. »

Ce mémoire, structuré en trois parties selon les préconisations de l'école doctorale GAIA, décrira mon résumé de carrière avec un bilan de mes publications et de mon encadrement, présentera de manière synthétique mes travaux de recherche depuis mon doctorat, et un projet de recherche pour mes activités futures,

Je remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé à l'accomplissement de ce manuscrit, et en particulier les étudiants de niveau Master ou Doctorants que j'ai eu le plaisir d'encadrer et qui ont contribué à la réalisation de mes activités de recherche.

Je remercie ceux qui ont relu et fait des commentaires sur mon manuscrit (M. Lesnoff, M. Dendoncker, M. Jouven, F. Stark, O. Taugourdeau, D. Taugourdeau et O. Ndiaye).

Pour finir une pensée pour mon épouse Aissatou Fall qui me soutient toujours dans mes réalisations.

Résumé

Après un master en Fonctionnement des écosystèmes à l'université de Montpellier (2008-2010), j'ai fait ma thèse à l'université de Lorraine (soutenue en 2014) entre le laboratoire agronomie et environnement et l'Agroscope (Zurich, Suisse). Par la suite j'ai travaillé au sein de l'institut Norvégien de Bioéconomie(NIBIO) avant d'être recruté au CIRAD au sein de l'unité SELMET en 2015.

Mes activités de recherche ont principalement porté sur les impacts du changement climatique et des pratiques de gestion sur la diversité des pâturages en particulier des parcours arides et semi-arides.

J'ai commencé par travailler sur l'utilisation de bases de relevés botaniques et de traits fonctionnels. J'ai à la fois mis en ligne des données , étudié différents biais(impact des données manquantes, intraspécifiques) et étudié les effets des pratiques en lien avec le climat.

Cependant, au Sahel, ces approches bases de données sont limitées en particulier à cause du manque de précisions des données de pratique ou de climat. C'est pour cela que nous avons conduit des mesures sur le terrain pour voir l'impact des pratiques et du climat sur la dynamique des herbacées annuelles en particulier sur leur phénologie. Pour les ligneux, nous nous sommes principalement intéressés à leur **régénération ???** et à l'importance des zones de dépressions topographiques.

Ces mesures de terrains sont cependant lourdes. Une des possibilités est d'avoir des méthodes de suivi indirectes reposant sur de l'imagerie. Je me suis intéressé à l'utilisation des drones et de la photogrammétrie pour faire les suivis de la végétation des zones arides ou semi-arides. En plus de permettre de faire des mesures plus simplement, les outils tels que les drones peuvent permettre d'étudier de nouvelles questions comme l'hétérogénéité spatiale de la végétation.

Mon projet de recherche se projette dans la continuité des activités avec la même grande question de recherche sur l'impact des pratiques et de gestion. D'une manière plus spécifique, mon projet se déroule en 3 parties.

1. Utilisation des outils reposant sur la photogrammétrie pour mettre en place des suivis participatifs de la végétation des parcours. L'objectif est d'avoir une double utilisation des images pour à la fois suivre des données de biomasse et des données de biodiversité. L'utilisation des données issues de bases de données hétérogènes induit des méthodes d'analyses spécifiques. Ces travaux permettront d'appréhender les impacts des variations du climat.

2. Etude de l'hétérogénéité spatiale de la végétation des pâturages, en lien avec les pratiques de pâturages et l'impact des pérennes. En effet les pâturages semi-arides et arides sont très hétérogènes spatialement. L'objectif est d'utiliser les outils comme le drone pour caractériser cette hétérogénéité puis identifier les drivers de cette hétérogénéité (sol, présence de ligneux, comportement des animaux au pâturage). Ce travail sur l'hétérogénéité permettrait d'appréhender d'une manière plus fine les pratiques de pâturages et l'impact de pratiques de replantation. Un des objectifs est d'arriver à comprendre l'impact du timing du passage des animaux en lien avec la phénologie des plantes. En effet le drone permet de faire des suivis très fréquents et d'intégrer aussi l'aspect temporel.

3. Modélisation des communautés végétales des pâturages arides et semi-arides. L'objectif est d'intégrer à la fois l'impact des pratiques et des variations du climat. L'idée est d'avoir un modèle spatialement explicite intégrant les communautés végétales. Ce modèle permettra d'explorer différentes interactions entre climat et pratiques. Il serait intéressant de tester l'importance des processus stochastiques dans la dynamique des communautés végétales en zones arides.

Table des matières

Avant-propos	2
Résumé	3
Présentation du candidat.....	8
A. Résumé du parcours professionnel	9
Master FENEC (Fonctionnement des Ecosystèmes Naturels Et Cultivés) à l'Université Montpellier II (2008-2010)	9
Thèse sur l'impact du climat et des pratiques sur la diversité fonctionnelle à l'origine des services écosystémiques des prairies en Europe (2010-2014).	9
Post doctorat en Norvège sur l'impact de l'abandon du pâturage sur la diversité fonctionnelle des prairies boréales(2014-2015)	9
Chercheur en écologie des pâturages au sein de l'UMR SELMET (2015-2017)	10
Chercheur accueilli à l'ISRA dans le cadre du dispositif en partenariat Pôle Pastoralisme et zones sèches (2017-2022)	10
Chercheur au sein de l'UMR SELMET et de l'UMR AMAP(2022-2023).....	10
B. Curriculum vitae	10
C. Liste de publications	13
Articles de périodiques.....	14
a) Articles acceptés dans des revue internationales à facteur d'impact sup à 1.2 [AI]	14
b) Articles soumis dans des revues à facteur d'impact (supérieur à 1.2).....	17
c) Article accepté dans des revues à comité de lecture sans facteur d'impact ou inférieur à 1.2 [AC]	17
d) Article soumis dans des revues à comité de lecture sans facteur d'impact.....	18
Ouvrages et chapitres d'ouvrages	18
a) Chapitres d'Ouvrage [Co].....	18
Communications scientifiques et posters en conférence.....	19
a) Congrès et colloques internationaux avec publication des actes [Ci].....	19
e) Autres congrès et colloques avec publication des actes [Ca].....	22
f) Autres colloques et séminaires sans actes [Cs]	22
Rapports	23
a) Rapport Diplômants [Rd].....	23
b) Rapport d' expertise [Re]	23
c) Rapport de recherche [Rr].....	24
Autres documents	24
a) Notice de logiciel [NI]	24

b) Vidéo internet [Vi]	24
c) Invitation Média [IM]	24
D. Travaux Encadrés	24
Thèses de doctorat	25
a) Co- encadrement direct [Td]	25
b) Co encadrement secondaire [Ts]	25
a) Etudiants de Master/ingénieur diplômant [Em]	25
c) Etudiants en Césure (non diplômants) [Ec]	28
Encadrement de Post doc. [Pd]	28
E. Obtentions de moyen nécessaire à la réalisation de la recherche	29
Projets en porteur principal	29
a) Projets en porteur /rédacteur principal obtenus[Ppo].....	29
d) Projet en porteur /rédacteur principal non obtenus [Ppn]	30
e) Projets en porteur /rédacteur principal soumis en attente [Ppa].....	31
Projet en collaborateur.....	31
a) Projets en collaborateur obtenus[Pco]	31
b) Projet en collaborateur non obtenus [Pcn]	32
c) Projets en collaborateur en attente [Pca].....	32
F. Vie collective et Réseaux Scientifiques.	32
Positionnement Scientifique au sein de l'unité SELMET	32
Contribution à la vie collective des unités de recherches et des institutions de recherches	32
PPZS Contribution au pôle pastoralisme et zones sèches.....	33
Participations aux réseaux scientifique sur les fourrages et les pâturages	33
Partenariats Scientifiques	33
Mémoires des travaux de recherches.....	35
I. Contexte.	36
Les pâturages dans le monde.....	36
Végétation des pâturages.....	37
Le « numérique ».....	38
G. Présentation de mes questions de recherches.....	39
H. Impacts du climat et des pratiques sur la diversité de traits fonctionnels à l'origine des services écosystémiques à partir de données historiques.....	40
Quantification des biais dans le calcul de diversité fonctionnelle à partir de bases de traits.....	41
Impact des pratiques et du climat sur les indices de diversité fonctionnelle.....	43

Création d'indicateur de Services écosystémiques à partir de données historiques.....	44
Synthèse et commentaires sur l'usage des données historiques pour l'étude de la diversité fonctionnelles et des services écosystémiques des pâturages	47
I. Etude des dynamiques de la végétation au Sahel durant la saison des pluies.....	48
Comprendre les dynamique des herbacées au cours de la saison des pluies.....	49
Régénération des ligneux	52
Synthèse sur les études de la dynamique de la végétation	54
J. Utilisation de la photogrammétrie pour le suivi de la végétation des zones arides.	55
Suivi des ligneux par drone	56
Evaluation de la biomasse herbacées	59
Le drone, une étape intermédiaire pour la cartographie de la végétation	62
Etudes de l'hétérogénéité spatiale impact des arbres sur les herbacées	64
Synthèse sur l'utilisation de la photogrammétrie	65
K. Conclusion sur les activités de recherches	66
Contribution aux travaux méthodologiques	66
Contribution à la création de la connaissance	66
Formation de jeunes chercheurs	66
Perspectives de recherche.....	69
I. Dynamique des communautés annuelles et pérennes en lien les changements globaux utilisant par l'utilisation d'approches participatives	71
Développer des outils pouvant être utilisés par les acteurs locaux pour caractériser la végétation	71
Utilisation de méthodes pour analyser des données hétérogènes pour comprendre l'impact du climat sur la biodiversité des parcours.....	73
L. Etude de l'hétérogénéité spatiale de la végétation des zones arides en lien avec les pratiques de gestions des parcours	74
Utilisation des outils numériques pour spatialiser les caractéristiques des couverts végétaux.	77
Etudes des interactions spatiales entre plantes dans les écosystèmes arides en utilisant les outils numériques	77
Etudes de l'impact spatial du pâturage sur la végétation des écosystèmes arides en utilisant les outils numériques	78
M. Modélisation spatiale des couverts herbacés.....	79
Modélisation spatialisée des communautés herbacées annuelles des zones arides.....	80
Intégration des modèles des écosystèmes dans les territoires pastoraux.	82
Conclusions	84
Liste des figures	Erreur ! Signet non défini.

Références	85
Annexes	92
Liste des 9 publications jointes au dossier	92

Présentation du candidat



Crédit Simon Taugourdeau (Sénégal)

- Résumé du parcours professionnel

Mon parcours professionnel se caractérise par 6 périodes successives : 1) Master en Fonctionnement des écosystèmes de l'université de Montpellier (2008-2010) et les deux stages de recherche effectués durant cette période ; 2) thèse (2010-2014) entre Nancy (Univ Lorraine) et Zurich (Agroscope) dans le cadre du Projet Européen Mutisward ; 3) séjour en Norvège (2014-2015) à l'institut NIBIO dans le cadre de mon post doctorat ; 4) recrutement (2015) au CIRAD à UMR SELMET comme chercheur en écologie avec un séjour de 1 an et demi à Montpellier ; 5) expatriation de 6 ans (2017-2022) au Sénégal dans le cadre du DP PPZS ; 6) retour à Montpellier depuis 2022 avec un accueil partiel au sein de l'UMR AMAP.

Master FENEC (Fonctionnement des Ecosystèmes Naturels Et Cultivés) à l'Université Montpellier II (2008-2010)

Après ma licence en Science du vivant à l'université de Caen Basse - Normandie, j'ai effectué un Master en Fonctionnement des Ecosystèmes Naturels et Cultivés à l'Université de Montpellier. Dans le cadre de ce master, j'ai pu approfondir mes connaissances en écologie des communautés et en écologie des écosystèmes, et aussi en analyse de données, principalement avec la découverte du logiciel R. J'ai effectué deux stages de recherche. durant ces études. Un premier stage de recherche en Master 1 au CEFÉ (CNRS) sous la supervision de Marie-Laure Navas sur la variabilité intra-spécifique des traits fonctionnels en lien avec le climat et le pâturage à partir d'une base de données . Pour mon stage de Master 2, j'ai changé de thématique en effectuant mon stage au sein de l'UMR ECO SOL (CIRAD) sur l'étude de l'indice foliaire du café agroforestier au Costa Rica en utilisant de la télédétection sous la direction de Gueric Le Maire, Olivier Roupsard et Jacques Avelino. Ce stage m'a permis de découvrir l'usage de la télédétection. Bien que ces deux thématiques de stage soient très différentes, j'ai continué à les combiner (base de données de traits fonctionnels et outils de télédétection) lors de la suite de mon parcours professionnel.

Thèse sur l'impact du climat et des pratiques sur la diversité fonctionnelle à l'origine des services écosystémiques des prairies en Europe (2010-2014).

J'ai effectué ma thèse inscrit dans l'école doctoral RP2E de l'université de Lorraine au sein de l'UMR LAE sous la direction de Sylvain Plantureux et au sein de l'Agroscope -Reckenholz dans l'équipe de production fourragère sous la direction d'Olivier Huguenin-Elie. Mon travail reposait principalement sur des données déjà acquises dans le cadre de projets de recherche passés et le but était de pouvoir faire une analyse plus poussée en utilisant une approche traits fonctionnels. Cette thèse s'intégrait dans le cadre du projet européen MULTISWARD, ce qui m'a permis d'être en contact avec de nombreux chercheurs travaillant sur les prairies en Europe. Cette thèse m'a permis d'appréhender encore plus les approches bases de données de relevés botaniques et de trait fonctionnels et d'appréhender les liens entre diversité fonctionnelle et services écosystémiques.

Post doctorat en Norvège sur l'abandon du pâturage sur la diversité fonctionnelle des prairies boréales(2014-2015)

A la suite de ma thèse, j'ai effectué un séjour en Norvège dans l'équipe Biodiversité des pâturages de l'institut NIBIO. Ce travail s'effectuait dans le cadre du projet « sau i drift » dont le but était de comprendre l'impact de l'abandon du pâturage ovin sur la végétation des prairies. J'ai donné un appui à l'analyse des données qui avaient été collectées par l'équipe Biodiversité des pâturages en utilisant une base de traits pour avoir une approche diversité fonctionnelle.

Chercheur en écologie des pâturages au sein de l'UMR SELMET (2015-2017)

Pendant mon post doc, j'ai été recruté en poste de cadre scientifique au CIRAD dans l'UMR Selmet. J'ai d'abord effectué une période d'intégration d'un an et demi à Montpellier. Durant cette période, j'ai effectué une dizaine de missions à l'étranger et Outre-Mer, aussi bien dans le cadre d'un plan de compagnonnage (Madagascar, Guyane, Réunion, Burkina Faso et Sénégal) que dans le cadre d'activités de projet (Sénégal, Burkina Faso, Tchad et Egypte). J'ai aussi initié des activités, en particulier sur la mise au propre de données historiques du CIRAD et sur l'utilisation d'appareils photographiques pour évaluer la diversité fonctionnelle des pâturages.

Chercheur accueilli à l'ISRA dans le cadre du dispositif en partenariat Pôle Pastoralisme et zones sèches (2017-2022)

Après cette période d'intégration, je suis parti en expatriation à Dakar au sein de L'institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA), accueilli dans les locaux du LNERV (Laboratoire National d'Élevage et de Recherches Vétérinaire). Cette expatriation s'effectuait dans le cadre du dispositif en partenariat PPZS. Une de mes activités était d'animer un groupe sur l'écologie pastorale avec les collègues sénégalais. Une grande partie de mon travail a également été consacrée à monter des projets, avec notamment le montage d'un projet européen DESIRA-Cassecs. Cela m'a mobilisé pendant un an et demi pour le montage, suivi d'une année d'appui à la coordination. C'est aussi durant ma période au Sénégal que j'ai commencé à utiliser le drone et ses applications pour la recherche. Cette expatriation a permis de former une véritable équipe autour de l'écologie des parcours sahéliens et d'encadrer de nombreux étudiants.

Chercheur au sein de l'UMR SELMET et de l'UMR AMAP(2022-2023)

De retour à Montpellier, j'ai sollicité un accueil au sein de l'unité AMAP pour renforcer les liens entre les deux unités (SELMET et AMAP). Cette période a eu pour but de finir la valorisation des activités du Sénégal mais également d'étendre mes activités sur d'autres zones arides, en particulier au Maghreb.

Un nouveau départ est prévu pour le Maroc avec une affectation à l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II au niveau du département productions animales en 2024.

Curriculum vitae

Simon TAUGOURDEAU

Nationalité :	Française
Date de naissance :	13/04/1987
Situation familiale :	Marié, 1 enfant
Adresse professionnelle :	Cirad SELMET Campus international de Baillarguet 34398 Montpellier Cedex 5 France Adresse électronique : simon.taugourdeau@cirad.fr
Profession :	Chercheur en écologie des communautés végétales
Fonction :	Cadre scientifique accueilli à l'ISRA dans le cadre du DP PPZS

	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement Environnements et sociétés
Unité :	UMR Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux (SELMET)
Caractérisation :	<p>Spécialités : Ecologie des communautés Ecologie Fonctionnelle Géomatique</p> <p>Filières : Ressources fourragères, parcours et prairies, Bovins, zébus, petits ruminants, Produits animaux : lait, viande,</p> <p>Thématiques : Biodiversité et services écosystémiques Drone et photogrammétrie Ressources pastorales et gestion du pâturage.</p> <p>Activités : Recherche, Développement, Formation par la recherche, Gestion de projet, Animation d'équipe, Animation scientifique, Diffusion des résultats de la recherche</p>
Expertise pays :	Sahel (Sénégal, Tchad, Burkina Faso). Afrique du Nord (Maroc et Egypte). Asie Centrale (Kazakhstan, Ouzbékistan et Mongolie). Océan Indien (Madagascar, Ile de la Réunion). Europe (France, Suisse et Norvège) Amérique (Costa Rica et Guyane Française)
Compétences linguistiques :	<p>Français : Langue maternelle</p> <p>Anglais : Professionnel</p>
Formation :	<p>Université de Lorraine 2014 Sciences Agronomiques (Doctorat / PhD)</p> <p>Université Montpellier II 2010 Sciences Technologies, Santé (Master)</p> <p>Université de CAEN Basse - Normandie 2008 Sciences du Vivant Biologie des Organismes (L3)</p> <p>Académie de CAEN 2005 Série Scientifique (Baccalauréat)</p>
Formation complémentaire :	Télépilote de Drone en scénario S1, S2 et S3. (2023)
Expérience Professionnelle :	- Chercheur à CIRAD-UMR SELMET (Juin 2015-Janvier 2017) à Montpellier « Écologue des écosystèmes pâturés méditerranéen et tropicaux » Accueilli à l'UMR AMAP botanique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des végétations.

	<ul style="list-style-type: none"> - Chercheur à CIRAD-UMR SELMET (Janvier 2017- Novembre 2022) accueilli au sein de l'ISRA LNERV (Dakar Sénégal) dans le cadre du dispositif en partenariat Pôle Pastoralisme et Zones Sèches.« Écologie des écosystèmes pâturés méditerranéen et tropicaux » - Chercheur à CIRAD-UMR SELMET (Juin 2015-Janvier 2017) à Montpellier « Écologie des écosystèmes pâturés méditerranéen et tropicaux » - Septembre 2014 - Juin 2015 : Chercheur à BIOFORSK (Septembre 2014- Juin 2015) à Stjørdal, Norvège, Division prairies et paysage "Comparaison de la diversité fonctionnelle entre écosystèmes pâturés par des moutons et abandonnés en Scandinavie" projet Sau i drift. - Doctorant à l'INRA (Novembre 2010 - Mars 2014) Laboratoire Agronomie et Environnement (Nancy) et à l'Agroscope (Zürich, Suisse). " Effets de la gestion et du climat sur la diversité fonctionnelle reliée aux services écosystémiques des prairies permanentes en Europe "Financement : projet européen MUTLISWARD. - Stage de 6 mois (Janvier - Juin 2010) au CIRAD (Montpellier) et au CATIE (Turrialba Costa Rica)" Dynamique du LAI dans une agroforêt à café, approche de terrain et de télédétection " Financement : projet européen CAFNET projet - Coffee Flux Project - Stage de 3 mois (Mars - Juin 2009) au centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (CNRS) - (Montpellier FR)" Variabilité intra spécifique de traits fonctionnels le long de gradients écologiques "
Participations aux Projets	<p>38 Projets en porteur /rédacteur principal</p> <ul style="list-style-type: none"> 11 Projets en porteur /rédacteur principal obtenus [Ppo] 24 Projets en porteur /rédacteur principal non obtenus [Ppn] 3 Projets en porteur /rédacteur principal soumis en attente [Ppa] <p>8 Participation aux projets</p> <ul style="list-style-type: none"> 6 Projets obtenus en tant que collaborateur [Pco] 2 Projet non obtenus en tant que collaborateur [Pcn] 3 projets en attente [Pca1]
Encadrement	<p>4 Doctorants :</p> <ul style="list-style-type: none"> 3 co-encadrements directs [Td] A. N'goran 2020-2024 (en cours) 2 articles en co-rédaction A. Barnes 2020-2023 1 article en co-rédaction O. Diatta 2018-2021, 6 articles en co-rédaction 1 encadrement secondaire [Ts] M. Dendoncker 2015-2020, 6 articles en co-rédaction
Encadrement de stage	<p>32 étudiants de Master d'Université [Em] et 6 étudiants en Césure [Ec].</p>

Publications	36 Articles de périodiques
	23 Articles revues Facteur d'impact facteur supérieur à 1.2 [Ai] acceptés+ 2 soumis [Ai]
	11 articles dans revues à comité de lecture sans impact Facteur [AC] ou inférieur à 1.2 +2 soumis [AC]
	2 Chapitres d'ouvrage [Co]
	34 Communications scientifiques (présentation orale et posters)
	21 Congrès et colloques internationaux avec publication des actes [Ci]
	5 Autres congrès et colloques avec publication des actes [Ca]
	8 Autres colloques et séminaires sans actes [Cs]
	7 Rapports
	3 diplômants[Rd]
2 d'expertises [Re]	
2 de recherche [Rr]	
Contact :	simon.taugourdeau@cirad.fr

Liste de publications

Les publications sont regroupées en 5 grandes catégories : Articles avec comité de lecture (i), Ouvrages et chapitres (ii), communications et posters en conférence scientifiques (ii), rapports disponibles en ligne (iv) et les autres documents (v) incluant la participation à des communications dans la presse et des vidéos sur l'internet.

Les publications sont rangées par ordre chronologique pour chaque catégorie. Le nom de l'auteur de ce document est en gras. Les noms des étudiants encadrés qui sont co-auteurs sont indiqués en couleur (Bleu pour les étudiants en master, Vert pour les étudiants en thèse et Rouge pour les post doctorants).

En date de Novembre 2023, ce sont 84 publications différentes (incluant 4 articles soumis) depuis le début de ma carrière. Ces publications sont principalement des articles (38) et des présentations (34) (oral et poster) en conférences. Le tableau ci-dessous présente pour les articles et les conférences, les différentes positions (premier, dernier ou coauteur), les co-publications avec les étudiants (doctorant ou master) et les co-publications avec un auteur d'un pays du Sud.

Dans le reste du document, elles seront citées en vert avec leur code.

	Position	Co auteur avec un étudiant

	Premier auteur	Dernier auteur	Co auteur	Doctorant	Master	Oui	Non
Articles	8	16	14	8	9	28	10
Conférences	12	11	11	4	9	16	15

Pour les articles et les conférences, la figure suivante présente la distribution temporelle de ces publications. Depuis 2015 et mon recrutement au CIRAD, j'ai en moyenne 3,1 articles par an et 3 conférences.

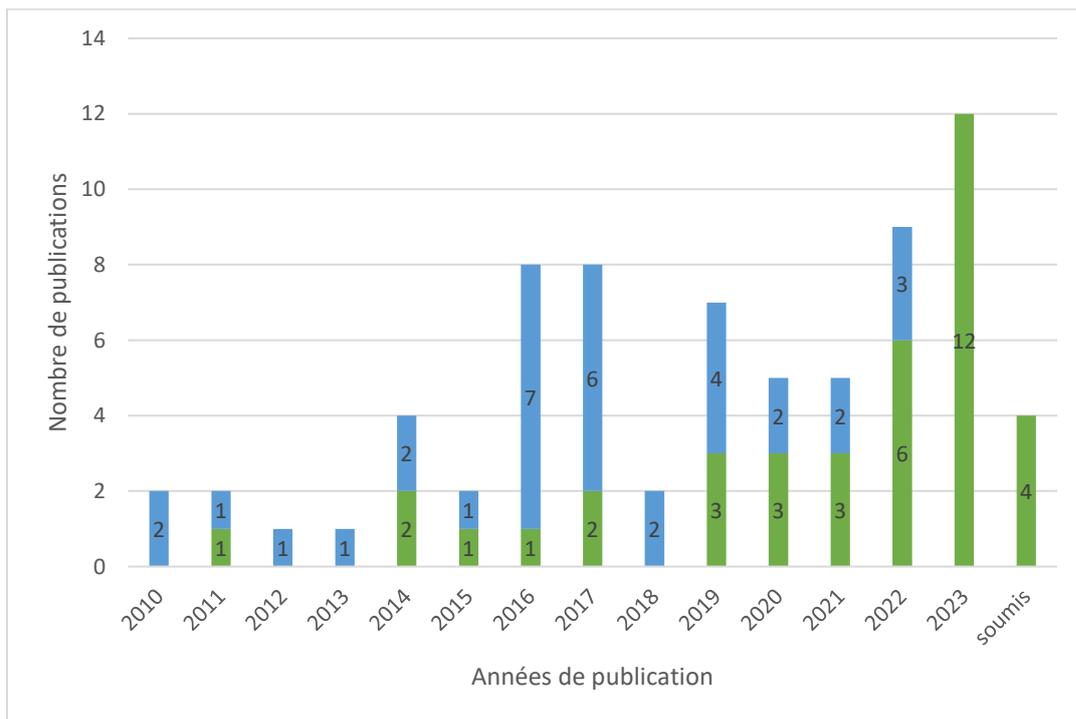


Figure 1 : Répartitions des publications en fonctions des années de publications (en vert les articles et en bleu les conférence).

Ces publications ont 1517 citations (google scholar au 25/10/2023) dont 1035 pour un article[Ai7] .10 Articles ont plus de 10 citations.

Articles de périodiques

- a) Articles acceptés dans des revue internationales à facteur d'impact sup à 1.2 [AI]
 [AI1] Gomez Delgado Federico, Rroupsard Olivier, Le Maire Guerric, **Taugourdeau Simon**, Pérez A., Van Oijen Marcel, Vaast Philippe, Rapidel Bruno, Harmand Jean-Michel,

- Voltz Marc, Bonnefond Jean-Marc, Imbach Pablo, Moussa Roger. (2011). Modelling the hydrological behaviour of a coffee agroforestry basin in Costa Rica. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15 (1) : 369-392. <https://doi.org/10.5194/hess-15-369-2011>
- [AI2] **Taugourdeau Simon**, Le Maire Gueric, Avelino Jacques, Jones Jeffrey R., Ramirez Luis G., Jara Quesada Manuel, Charbonnier Fabien, Gómez-Delgado Federico, Harmand Jean-Michel, Rapidel Bruno, Vaast Philippe, Rouspard Olivier. (2014). Leaf area index as an indicator of ecosystem services and management practices: An application for coffee agroforestry. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 192: 19-37. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.03.042>
- [AI3] **Taugourdeau Simon**, Villerd Jean, Plantureux Sylvain, Huguenin-Elie Olivier, Amiaud Bernard. (2014). Filling the gap in functional trait databases: Use of ecological hypotheses to replace missing data. *Ecology and Evolution*, 4 (7): 944-958. <https://doi.org/10.1002/ece3.989>
- [AI4] Kinoshita Rintaro, Rouspard Olivier, Chevallier Tiphaine, Albrecht Alain, **Taugourdeau Simon**, Ahmed Zia, van Es Harold M. (2016). Large topsoil organic carbon variability is controlled by Andisol properties and effectively assessed by VNIR spectroscopy in a coffee agroforestry system of Costa Rica. *Geoderma*, 262 : 254-265. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.026>
- [AI5] Wehn Solvi, **Taugourdeau Simon**, Johansen Line, Hovstad Knut Anders. (2017). Effects of abandonment on plant diversity in seminatural grasslands along soil and climate gradients. *Journal of Vegetation Science*, 28 (4): 838-847. <https://doi.org/10.1111/jvs.12543>
- [AI6] **Taugourdeau Simon**, Daget Philippe, Chatelain Cyrille, Mathieu Daniel, Juanès Xavier, Huguenin Johann, Ickowicz Alexandre. (2019.) FLOTROP, a massive contribution to plant diversity data for open ecosystems in northern tropical Africa. *Scientific Data*, 6:118, 8 p. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0120-8>
- [AI7] Johansen Line, **Taugourdeau Simon**, Hovstad Knut Anders, Wehn Solvi. (2019). Ceased grazing management changes the ecosystem services of semi-natural grasslands. *Ecosystems and People*, 15 (1): 192-203. <https://doi.org/10.1080/26395916.2019.1644534>
- [AI8] Kattge Jens, Bönisch Gerhard, Diaz Sandra, Lavorel Sandra, Prentice Lain Colin, Leadley Paul, Tautenhahn Susanne, Werner Gijsbert D. A., Bastianelli Denis, Derroire Géraldine, Hérault Bruno, Justes Eric, Laclau Jean-Paul, Le Maire Gueric, Nouvellon Yann, **Taugourdeau Simon**, et al..(2020). TRY plant trait database – enhanced coverage and open access *Global Change Biology*, 26 (1) : 119-188. <https://doi.org/10.1111/gcb.14904>
- [AI9] **Dendoncker Morgane**, Brandt Martin, Rasmussen Kjeld, **Taugourdeau Simon**, Fensholt Rasmus, Tucker Compton J., Vincke Caroline. (2020). 50 years of woody vegetation changes in the Ferlo (Senegal) assessed by high-resolution imagery and field surveys *Regional Environmental Change*, 20 (4):137, 13 p. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01724-4>
- [AI10] **Bossoukpe Marina**, Faye Emile, Ndiaye Ousmane, Diatta S., **Diatta Ousmane**, Diouf A., **Dendoncker Morgane**, Assouma Mohamed Habibou, **Taugourdeau Simon**. (2021). Low-cost drones help measure tree characteristics in the Sahelian savanna. *Journal of Arid Environments*, 187:104449, 8 p. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104449>
- [AI11] **Taugourdeau Simon**, **Dionisi Mathilde**, **Lascoste Mylène**, Lesnoff Matthieu, Capron Jean-Marie, Borne Frédéric, Borianne Philippe, Julien Lionel. (2022). A first attempt to

- combine NIRS and plenoptic cameras for the assessment of grasslands functional diversity and species composition. *Agriculture* (Basel), 12 (5):704, 16 p. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050704>
- [AI12] Dumont Bertrand, Rossignol Nicolas, Huguenin-Elie Olivier, Jeanneret Philippe, Jerrentrup Jana Sabrina, Lüscher Gisela, **Taugourdeau Simon**, Villerd Jean, Plantureux Sylvain. (2022). Simple assessment of temperate grassland suitability as habitat for three insect taxa. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6:881410, 13 p. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.881410>
- [AI13] **Taugourdeau Simon, Diédhiou Antoine, Fassinou Cofélas, Bossoukpe Marina, Diatta Ousmane, N’Goran Ange**, Audebert Alain, Ndiaye Ousmane, Diouf Abdoul Aziz, Tagesson Torbern, Fensholt Rasmus, Faye Emile. (2022). Estimating herbaceous aboveground biomass in Sahelian rangelands using Structure from Motion data collected on the ground and by UAV. *Ecology and Evolution*, 12 (5):e8867, 17 p. <https://doi.org/10.1002/ece3.8867>
- [AI14] Lo Adama, Diouf Abdoul Aziz, Diédhiou Ibrahima, Bassène Cyrille Djitamagne Edouard, Leroux Louise, Tagesson Torbern, Fensholt Rasmus, Hiernaux Pierre, Mottet Anne, **Taugourdeau Simon**, Ngom Daouda, Touré Ibra, Ndao Babacar, Sarr Mamadou Adama. Dry season forage assessment across Senegalese rangelands using earth observation data. (2022). *Frontiers in Environmental Science*, 10:931299, 15 p. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.931299>
- [AI15] **Dendoncker Morgane**, Vincke Caroline, Bazan Samantha, **Madingou Mady Parfait Noé, Taugourdeau Simon**. (2023). The size of topographic depressions in a Sahelian savanna is a driver of woody vegetation diversity *Journal of Arid Environments* Volume 210, 104923 <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104923>
- [AI16] **Barnes Annaël**, Ickowicz Alexandre, Cesaro, Jean-Daniel, Salgado Paulo, Rayot Véronique, Koldasbekova Sholpan, **Taugourdeau Simon** 2023 Improving biodiversity offset schemes through the identification of ecosystem services at a landscape level *Land* Volume 12 Issue 1 10.3390/land12010202
- [AI17] Reiner Florian, Brandt Martin, Tong Xiaoye, Skole David, Ankit Kariryaa Philippe Ciais⁴, Andrew Davies⁵, Pierre Hiernaux, Jérôme Chave, Maurice Mugabowindekwe, Christian Igel, Stefan Oehmcke, Fabian Gieseke Sizhuo Li, Siyu Liu, Sassan Saatchi, Peter Boucher, Jenia Singh, **Simon Taugourdeau, Morgane Dendoncker**, Xiao-Peng Song, Ole Mertz, Compton J. Tucker, Rasmus Fensholt (2023) More than one quarter of Africa’s tree cover found outside areas previously classified as forest *Nature communications* 14, Article number: 2258 (2023) <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37880-4>
- [AI18] **Dendoncker Morgane, Taugourdeau Simon**, Messier, Christian, Vincke Caroline (2023) A functional trait-based approach to evaluate the resilience of key ecosystem functions of tropical savannas *Forests*. 14(2), 291; <https://doi.org/10.3390/f14020291>
- [AI19] Rouabah, Abdelhak; Lasserre-Joulin, Françoise; Plantureux, Sylvain; **Taugourdeau, Simon**; Amiaud, Bernard (2023) Functional trait composition of carabid beetle communities predicts prey suppression through both mass ratio and niche complementarity mechanisms *Insect* <https://doi.org/10.1111/1744-7917.13261>
- [AI20] Cesaro Jean-Daniel, Mbaye Tamsir, Ba Baba, Fall Ba Marieme, Akodewou Amah, Delay Etienne, **Taugourdeau Simon** (soumis en 2022) Reforestation and sylvopastoral system in Sahelian drylands: evaluation of return of investment by assessing restored ecosystemic services provision to local stakeholders *Frontiers in Environmental Science* 11 | <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1073124>

- [AI21] **Taugourdeau Simon**, Louault, Frédérique, Michelot-Antalik, Alice, Messad Samir, Munoz François, Bastianelli Denis, Carrere Pascal, Plantureux Sylvain (2023, in press) A set of ecosystem service indicators for European grasslands based on botanical surveys *Grassland research (in press)*
- [AI22] Haftay Hailu Gebremedhn, Ndiaye Ousmane, **Cofélas Fassinou**; **Simon Taugourdeau**, Torbern Tagesson, Paulo Salgado (2023, in press) Response of herbaceous plant attributes to grazing in savannah ecosystems of Senegal *Ecological Processes (in press)*
- [AI23] **Nungi-Pambu Maïalichah Adama Lo**, **Fassinou Cofélas**, Tageson Torbern, Fensholt Rasmus, Diouf Abdoul Aziz, Menassol Jean Baptiste, Assouma Mohammed Habibou, Ibra Toure **Taugourdeau Simon**(2023) A framework for national-scale predictions of forage dry mass in Senegal: UAVs as an intermediate step between field measurements and Sentinel-2 images. *International journal of remote Sensing (in press)*
- b) *Articles soumis dans des revues à facteur d'impact (supérieur à 1.2)*
- [AI24] Haftay Hailu Gebremedhn, Salgado Paulo, **Fassinou Cofélas**; **N'Goran; Ange, Diatta Ousmane**, Ndiaye; Ousmane, **Taugourdeau Simon** (Soumis en 2022, correction mineures) Estimation of Sahelian Savanna Forage Biomass and Chemical Composition Using Low-cost Unmanned Aerial Vehicle Technology. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*
- [AI25] **Dendoncker Morgane**, Caroline Vincke, **Ramata Ndianor** Abdoul Aziz Diouf, Sabine Mieke Daouda Ngom and **Simon Taugourdeau** Regeneration impoverishment of Sahelian woody communities put them at risk in three land management types (soumis en 2023) *New Forests*
- c) *Article accepté dans des revues à comité de lecture sans facteur d'impact ou inférieur à 1.2 [AC]*
- [AC1] Kanoun Mohamed, Huguenin Johann, Yakhlef Hacène, Kanoun Meguellati Amel, Julien Lionel, **Taugourdeau Simon**, Bellahrache Ahmed. 2015 Pratiques d'alimentation pour l'engraissement des agneaux dans des systèmes d'élevage agropastoraux de la région d'El-Guedid-Djelfa. *Livestock Research for Rural Development*, 27 (10), 14 p. <http://www.lrrd.org/lrrd27/10/kano27211.html>
- [AC2] Kanoun Mohamed, Huguenin Johann, Yakhlef Hacène, Kanoun Meguellati Amel, Julien Lionel, Benidir M., **Taugourdeau Simon**, Bellahrache Ahmed. 2017. Diversité des stratégies d'adaptation des agropasteurs ovins face aux situations d'incertitude en territoires steppiques : cas de la région d'El Guedid. *Revue des BioRessources*, 7 (2) : 28-42. <https://revues.univ-ouargla.dz/index.php/volume-7-numero-2-dec-2017/4190-70203>
- [AC3] Chatelain Cyrille, **Taugourdeau Simon**. 2019. Du Sahel à la forêt tropicale, l'African Plant Database, une référence pour les projets botaniques africains. *La Feuille Verte* (49) : 23-24. http://www.ville-ge.ch/cjb/cjb/pdf_fv/fv49.pdf
- [AC4] **Taugourdeau Simon**, Mbaye Tamsir., 2020. Editorial, numéro thématique « Ecologie pastorale au Sahel ». *Revue d'Élevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux*, 74 73 (3) : 147-148, doi:10.19182/remvt.3631
- [AC5] **Bossoukpe Marina**, Ndiaye Ousmane, **Diatta Ousmane**, Diatta Sekouna, Audebert Alain, Couteron Pierre, Leroux Louise, Diouf Abdoul Aziz, **Dendoncker Morgane**, Faye Emile, **Taugourdeau Simon**. 2021. Unmanned aerial vehicle for the assessment of woody and herbaceous phytomass in Sahelian savanna. *Revue d'Élevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux*, 74 (4) : 199-205. <https://doi.org/10.19182/remvt.36802>

- [AC6] **Diatta Ousmane**, Ndiaye Ousmane, Ngom Daouda, Diatta S., Fensholt Rasmus, Tagesson Torbern, **Taugourdeau Simon**. 2021. Réponses de la phytomasse herbacée aux fluctuations de la pluviométrie en milieu pâturé sahélien du Ferlo. *Fourrages (246)* : 97-105. <https://afpf-asso.fr/revue/non-thematique-263?a=2304>
- [AC7] **N’Goran Adjoua Ange-Jokébed**, Diouf Abdoul Aziz, Diatta Sekouna, Assouma Mohamed Habibou, **Djagoun Afolabi Juste**, Assogba Gildas Geraud Comlan, Cournac Laurent, Chapuis-Lardy Lydie, Blanfort Vincent, **Taugourdeau Simon**. 2022. Variabilité des stocks de carbone du sol sous et hors houppier dans la zone sylvopastorale du Sénégal. *Revue d’Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux*, 75 (3) : 67-75. <https://doi.org/10.19182/remvt.36984>
- [AC8] Cesaro Jean-Daniel, Delay Etienne, Mbaye Tamsir, **Taugourdeau Simon**. 2022. Modélisation territoriale de la Grande Muraille verte : un enjeu d’évaluation et de prospective. *Cahiers de l’Observatoire Hommes-Milieus International Téssékéré* (11), 10 p. <https://ohmi-tessekere.in2p3.fr/cahiers-de-l-ohmi>
- [AC9] **Taugourdeau Simon**; **Cofélas Fassinou** ; **Bossoukpe Marina** ; **Diatta Ousmane**; Ndiaye, Ousmane ; **Diehdiou Antoine** ; **N’Goran Ange** ; Audebert Alain ; Faye Emile (2023) UAV outputs and associated field measurements of the herbaceous and tree layers of the Senegalese savannah, *African Journal of Ecology Volume61, Issue3*
- [AC10] **Diatta, O.**, D. Ngom, O. Ndiaye, S. Diatta, and **S. Taugourdeau**. 2023. Structure and phenology of Herbaceous stratum in the Sahelian rangelands of Senegal. *Grasses* 2:98-111.
- [AC11] **Diatta Ousmane**, Paulo Salgado, Sékouna Diatta, Ousmane Ndiaye, Daouda Ngom, Denis Bastianelli, Mohamed Habibou Assouma, Alexandre Ickowicz, **Simon Taugourdeau**(Soumis en 2021) Dynamique à court termes du disponible fourrager et de la digestibilité de la matière organique des fourrages herbacés sous pâture et sous mise en défens à Dahra, dans le Sahel Sénégalais. *Revue d’Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux*, (in press)
- d) *Article soumis dans des revues à comité de lecture sans facteur d’impact*
- [AC12] **Cofélas Fassinou**, **Ange N’goran**, **Ousmane Diatta**, Yélognissè Agbohessou Ousmane Ndiaye, Sékouna Diatta, Paulo Salgado, **Simon Taugourdeau**. (Soumis en 2022,correction majeures) The impact of tree distance on the biomass of herbaceous vegetation in a Sahelian silvopastoral system: a combined field measurements and UAV-based approach *Bois et Forêt des tropiques*
- [AC13] **Ange-jokébed A. N’Goran** *, Ousmane Ndiaye, Ousmane Diatta, Daouda Ngom, Sékouna Diatta, Hailu Haftay, **Cofélas Fassinou**, Laurent Bonnal, Denis Bastianelli, Paulo Salgado and Simon Taugourdeau Impact of water regime and harvest on the quantity and quality of herbaceous forage in the Savanah ecosystem of Senegal (soumis en 2023) *Revue d’Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux*

Ouvrages et chapitres d’ouvrages

- a) *Chapitres d’Ouvrage [Co]*
- [Co1] **Taugourdeau Simon**, Huguenin Johann. (2022). Adaptation de la végétation des pâturages méditerranéens et tropicaux. In : Élevages au pâturage et développement durable des territoires méditerranéens et tropicaux. Connaissances récentes sur leurs atouts et faiblesses. Ickowicz Alexandre (ed.), Moulin Charles-Henri (ed.). Versailles : Ed. Quae, 33-40. (Matière à débattre et décider) ISBN 978-2-7592-3485-1
- [Co2] Ickowicz Alexandre, Traoré El Hadji, Habibou Assouma, Salgado Paulo, Wane Abdrahmane, Touré Ibra, **Taugourdeau Simon**, Corniaux Christian, Mbaye Tamsir,

Cesaro Jean-Daniel, Delay Etienne, Bakhoum Amy, **Dendoncker Morgane**, Vincke Caroline.(2022) Silvopastoral systems and sustainability of Sahelian socioecosystems in Senegal. In : Grazing with trees. A silvopastoral approach to managing and restoring drylands. Haddad Fidaa F. (ed.), Herrera Pedro M. (ed.), Besbes Badi (ed.). Rome: FAO, 65-70. (FAO Forestry Paper, 187) ISBN 978-92-5-136956-2 <https://www.fao.org/publications/card/en/c/CC2280EN>

Communications scientifiques et posters en conférence

a) *Congrès et colloques internationaux avec publication des actes [Ci]*

- [Ci1] **Taugourdeau Simon**, Le Maire Gueric, Roupsard Olivier, Avelino Jacques, Gomez Delgado Federico, Jones Jeffrey R., Marsden Claire, Robelo A., Alpizar Edgardo, Barquero Alejandra, Rapidel Bruno, Vaast Philippe, Harmand Jean-Michel. 2010. LAI dynamics of agroforestry and full sun coffee systems in Costa Rica. In : *Proceedings of Agro 2010 : the XIth ESA Congress, August 29th - September 3rd, 2010, Montpellier. s.l. : s.n., 1 p. ESA Congress. II, Montpellier, France, 29 Août 2010/3 Septembre 2010.*
- [Ci2] **Taugourdeau Simon**, Le Maire Gueric, Roupsard Olivier, Avelino Jacques, Gomez Delgado Federico, Jones Jeffrey R., Marsden Claire, Robelo A., Barquero Alejandra, Alpizar Edgardo, Rapidel Bruno, Vaast Philippe, Harmand Jean-Michel. Scaling-up LAI in coffee agroforestry systems in Costa Rica 2010. In : *Proceedings of the 23rd International Conference on Coffee Science; Bali, Indonesia, October 3-8, 2010. 23, Bali, Indonésie, 3 Octobre 2010/8 Octobre 2010.*
- [Ci3] Roupsard Olivier, Gomez Delgado Federico, Charbonnier Fabien, Benegas Laura, **Taugourdeau Simon**, Kinoshita Rintaro, Moussa Roger, Dreyer Erwin, Lacointe André, Rapidel Bruno, Pérez A., Robelo A., Barquero Alejandra, Rivera Wilson C., Navarro M., Jourdan Christophe, Le Maire Gueric, Thaler Philippe, Bonnefond Jean-Marc, Harmand Jean-Michel, Vaast Philippe. 2011. The CAFNET/Coffee-Flux project: evaluating water, carbon and sediment Ecosystem Services in a coffee agroforestry watershed of Costa Rica. In : *Proceedings of the 23rd International Conference on Coffee Science; Bali, Indonesia, October 3-8, 2010. 23, Bali, Indonésie, 3 Octobre 2010/8 Octobre 2010*
- [Ci4] **Taugourdeau Simon**, Schneider M., **Domenicone C.**, **Sempé L.**, Amiaud Bernard, Huguenin-Elie Olivier, Plantureux Sylvain. 2012. Functional diversity-area relationship in permanent grassland. In : *Grassland - a European Resource? : Proceedings of the 24th General Meeting of the European Grassland Federation Lublin, Poland 3-7 june 2012. ISBN 978-83-89250-77-3 24, Lublin, Pologne, 3 Juin 2012/7 Juin 2012.* <http://www.europeangrassland.org/printed-matter/proceedings.html>
- [Ci5] **Taugourdeau Simon**, Huguenin-Elie Olivier, Plantureux Sylvain, Michel N., Dumont Bertrand. 2013. Proposition of an index of intensity of grass use. In : *The Role of Grasslands in a Green Future. Threats and Perspectives in Less Favoured Areas: Proceedings of the 17th Symposium of the European Grassland Federation. Akureyri, Iceland 23-26 june 2013. A. Helgadóttir (ed.), A. Hopkins (ed.). Reykjavik : European Grassland Federation-Agricultural University of Iceland, 397-399. (Grassland science in Europe, 18) ISBN 978-9979-881-20-9*
- [Ci6] Plantureux Sylvain, Dumont Bertrand, Rossignol Nicolas, **Taugourdeau Simon**, Huguenin-Elie Olivier. 2014. An indicator-based tool to assess environmental impacts of multi-specific swards. In : *EGF at 50: The future of European Grasslands: Proceeding of the 25th EGF General Meeting: European Grassland Federation, 756-758. (Grassland science in Europe, 19) ISBN 978-0-9926940-1-2*

- [Ci7] Rouspard Olivier, Charbonnier Fabien, **Taugourdeau Simon**, Kinoshita Rintaro, Guidat Florian, Rançon Florian, Le Maire Gueric, Van den Meersche Karel, Jourdan Christophe, Harmand Jean-Michel, Vaast Philippe, Virginio Filho Elias de Melo, Imbach Pablo, Albrecht Alain, Chevallier Tiphaine. 2014. Using process models, remote sensing and spectrometry to open scientific locks in agroforestry systems: the example of coffee in Costa Rica. In : International Symposium on Agroecology for Food Security and Nutrition, 18-19 September 2014, Rome, Italy
- [Ci8] Johansen Line, Wehn Solvi, **Taugourdeau Simon**. 2016. The effect of selected soil and climate parameters on multiple ecosystem services from abandoned and managed semi-natural grasslands In : The multiple roles of grassland in the European bioeconomy: Proceedings of the 26th General Meeting of the European Grassland Federation European Grassland Federation-NIBIO, 636-638. (Grassland science in Europe, 21) ISBN 978-82-17-01677-9 General Meeting of the European Grassland Federation: Trondheim, Norvège, 4 Septembre 2016/8 Septembre 2016.<http://www.europeangrassland.org/printed-matter/proceedings.html>
- [Ci9] Johansen Line, Wehn Solvi, **Taugourdeau Simon**, Hovstad Knut Anders. 2016. Trade-offs between ecosystem services in managed and abandoned semi-natural grasslands. In : Proceedings of the 26th General Meeting of the European Grassland Federation: The multiple roles of grassland in the European bioeconomy. Ås : European Grassland Federation-NIBIO, 633-635. (Grassland science in Europe, 21) ISBN 978-82-17-01677-9 European Grassland Federation:<http://www.europeangrassland.org/printed-matter/proceedings.html>
- [Ci10] Hammouda Rachid Fethi, Huguenin Johann, **Taugourdeau Simon**, Nedjraoui Dalila. 2016. Resilience of steppe vegetation after a dryness cycle in Algeria: Example of Hadj Mechri Commune in the Laghouat Wilaya. In : Proceedings of the 10th International Rangeland Congress. Saskatoon : IRC, 907-909. ISBN 978-1-77136-458-4 International Rangeland Congress : “The future management of grazing and wild lands in a high-tech world”. 10, Saskatoon, Canada, 16 Juillet 2016/22 Juillet 2016. http://www.irc2016canada.ca/pdf/papers/X_IRC_Proceedings_Aug2016.pdf
- [Ci11] **Taugourdeau Simon**, Huguenin Johann, Balent Gérard, Blanfort Vincent. 2016. Can functional traits explain the dynamic of undesirable species in tropical grasslands? In : Tropical ecology and society reconciling conservation and sustainable use of biodiversity. ATBC. Storrs : ATBC, Résumé, p. 373. Annual Meeting of the Association for Tropical Biology and Conservation (ATBC 2016), Montpellier, France, 19 Juin 2016/23 Juin 2016.
- [Ci12] **Taugourdeau Simon**, Julien Lionel, Capron Jean-Marie, Barradas Ana, Messad Samir, Huguenin Johann. 2016. Assessments of the values of multi-species grassland for grazing, silage and hay production. In : Proceedings of the 26th General Meeting of the European Grassland Federation: The multiple roles of grassland in the European bioeconomy..). Ås : European Grassland Federation-NIBIO, 216-221. (Grassland science in Europe, 21) ISBN 978-82-17-01677-9 General Meeting of the European Grassland Federation: “The Multiple Roles of Grassland in the European Bioeconomy”. 26, Trondheim, Norvège, 4 Septembre 2016/8 Septembre 2016. <http://www.europeangrassland.org/printed-matter/proceedings.html>
- [Ci13] **Taugourdeau Simon**, **Dionisi Mathide**, Capron Jean-Marie, **Lascoste Mylène.**, Lesnoff Matthieu, Julien Lionel, Borne Frédéric, Borianne Philippe. 2017 Indirect measurements of Mediterranean grassland vegetation characteristics using plenoptic camera and NIRS.. In : Grassland resources for extensive farming systems in marginal

lands: major drivers and future scenarios. Proceedings of the 19th Symposium of the European Grassland Federation. ISBN 978-88-901771-9-4 Symposium of the European Grassland Federation. 19, Alghero, Italie, 7 Mai 2017/10 Mai 2017. <http://www.egf2017.org/>

- [Ci14] **Randrianarivony Louise**, Tillard Emmanuel, Riviere Expédit, Salgado Paulo, Blanford Vincent, Lecomte Philippe, **Taugourdeau Simon**. 2018. Impacts of long-term fertilisation on plant functional traits and diversity of grasslands on Reunion Island. In : Sustainable meat and milk production from grasslands. Wageningen : Wageningen Academic Publishers, 661-663. (Grassland science in Europe, 23) European Grassland Federation General Meeting. 27, Cork, Irlande, <http://www.europeangrassland.org/fileadmin/media/EGF2018.pdf>
- [Ci15] **Taugourdeau Simon**, Ndiaye Ousmane, **Diatta Ousmane**, Assouma Mohamed Habibou. 2018. Dynamic of herbaceous biomass during the wet season in the Sahel In : Sustainable meat and milk production from grasslands. 676-678. (Grassland science in Europe, 23) European Grassland Federation General Meeting. 27, Cork, Irlande, 17 Juin 2018/21 Juin 2018.
- [Ci16] **Bossoukpe Marina**, Ndiaye Ousmane, Diatta Sekouna, **Diatta Ousmane**, Diouf Abdoul Aziz, Assouma Mohamed Habibou, Faye Emile, **Taugourdeau Simon**. 2020. Ground based photogrammetry to assess herbaceous biomass in Sahelian rangelands. University of Helsinki. Helsinki : 3 p. European Grassland Federation General Meeting (EGF 2020), Helsinki, Pays-Bas, 19 Octobre 2020/21 Octobre 2020.
- [Ci17] **Taugourdeau Simon**, Messad Samir, Louault F., Michelot-Antalik A., **Vignerot Manon**, **Poisson Lisa**, **Yentur Lena**, Bastianelli Denis, Carrère Pascal, Plantureux Sylvain. 2020. Pasture ecosystem services indicators: an expert based set of indicators of ecosystem services. University of Helsinki. Helsinki : 3p. European Grassland Federation General Meeting (EGF 2020). 28, Helsinki, Pays-Bas, 19 Octobre 2020/21 Octobre 2020.
- [Ci18] **Diédhiou Antoine**, **Diatta Ousmane**, Ndiaye Ousmane, **Bossoukpe Marina**, Ngom Daouda, Julien Lionel, Touré Ibra, Diouf Abdoul Aziz, Bayet Théophile., Cambier Christophe, Faye Emile, **Taugourdeau Simon**. 2021. Monitoring rangeland biomass during wet and dry seasons from a video obtained with a simple digital camera. Proceedings of the 21st Symposium of the European Grassland Federation, Sensing – New insights into grassland science and practice. online hosted by Universität Kassel, Germany 17-19 May 2021. ISBN 978-3-00-068789-1 European Grassland Federation Symposium (EGF2021). 21, Kassel, Allemagne, 17 Mai 2021/19 Mai 2021.
- [Ci19] **Barnes Annaël**, **Taugourdeau Simon**, Bazan Samantha, Rayot Véronique. 2021. Uses and knowledge of plant species by Mongolian herders in the Gobi Desert and identification of species of interest for planting. IRC. Nairobi : IRC, 4 p. International Grassland Congress (IGC 2021). 24, Nairobi, Kenya, 25 Octobre 2021/29 Octobre 2021.
- [Ci20] **Fassinou Cofélas**, **N’Goran Adjoua Ange-Jokébed**, **Diatta Ousmane**, Diatta Sékouna, Ndiaye Ousmane, **Taugourdeau Simon**. 2022. Impact of tree on the growth of the herbaceous layer of Sahelian savannah. A UAV based approach. In : Grassland at the heart of circular and sustainable food systems. INRAE, Université de Caen. Wageningen : Wageningen Academic Publishers, 370-372. (Grassland Science in Europe, 27) ISBN 978-2-7380-1445-0 Caen, France, 26 Juin 2022/30 Juin 2022.
- [Ci21] **N’Goran Adjoua Ange-Jokébed**, Ndiaye Ousmane, Ngom Daouda, **Diatta Ousmane**, Salgado Paulo, Diatta Sekouna, Hailu Hafthay, **Fassinou Cofélas**, **Taugourdeau**

Simon. 2022 Impact of irrigation, cutting, and fertilization on the phenology of Sahelian ranges. In : Grassland at the heart of circular and sustainable food systems. ISBN 978-2-7380-1445-0 European Grassland Federation General Meeting (EGF 2022). 29, Caen, France, 26 Juin 2022/30 Juin 2022.

e) *Autres congrès et colloques avec publication des actes [Ca]*

- [Ca1] **Taugourdeau Simon,** Diatta Sekouna, Ndiaye Ousmane, Mathieu Daniel, Ickowicz Alexandre. 2017. Les herbiers, un outil pour étudier les variations des traits fonctionnels des espèces sahéliennes. In : Pastoralisme dans le courant des changements globaux: Défis, enjeux, perspectives. ISRA, CIRAD, PPZS. Dakar : PPZS, Dakar, Sénégal, 20 Novembre 2017/23 Novembre 2017
- [Ca2] **Camara Moussa., Gomis Zoé.,** Ndiaye Ousmane, Sall Cheikh., Chatelain Cyrille, **Taugourdeau Simon.** 2017. L'herbier pastoral de l'institut sénégalais de la recherche agronomique. In : Pastoralisme dans le courant des changements globaux: Défis, enjeux, perspectives. ISRA, CIRAD, PPZS. Dakar : PPZS, 2 p. Pastoralisme dans le courant des changements globaux: Défis, enjeux, perspectives, Dakar, Sénégal, 20 Novembre 2017/23 Novembre 2017
- [Ca3] **Taugourdeau Simon,** Diouf Abdoul Aiz, Mbaye Tamsir, **Dendoncker Morgane,** Ndiaye Ousmane, Hiernaux Pierre, Juanès Xavier, Ickowicz Alexandre. 2017. Facteurs écologiques impactant les communautés végétales ligneuses et herbacées des parcours du Ferlo entre 1970 et 1981. In : Pastoralisme dans le courant des changements globaux: Défis, enjeux, perspectives. ISRA, CIRAD, PPZS., Dakar, Sénégal, 20 Novembre 2017/23 Novembre 2017.
- [Ca4] **Dendoncker Morgane, Taugourdeau Simon,** Vincke Caroline. 2017. Evaluation préliminaire des contributions des ligneux à des services écosystémiques en zone sahélienne (exemple du Ferlo Sénégal). In : Pastoralisme dans le courant des changements globaux: Défis, enjeux, perspectives. ISRA, CIRAD, PPZS. Dakar : PPZS, Sénégal, 20 Novembre 2017/23 Novembre 2017.
- [Ca5] Diouf Abdoul Aziz, Sarr M.A., Ba T., **Taugourdeau Simon,** Dieye A.M., Sy I., Diop Amadou Tamsir. 2017. Evaluation intra-saisonnière de la production fourragère des parcours naturels du Sénégal. In : Pastoralisme dans le courant des changements globaux: Défis, enjeux, perspectives. ISRA, CIRAD, PPZS. Dakar : PPZS, 2 p Sénégal, 20 Novembre 2017/23 Novembre 2017

f) *Autres colloques et séminaires sans actes [Cs]*

- [Cs1] Huguenin Johann, Julien Lionel, Capron Jean-Marie, Ebel J.M, Barradas Ana, **Taugourdeau Simon.** 2015. Les prairies multi-spécifiques : une réponse agroécologique aux fluctuations fourragères en région méditerranéenne. Vandoeuvre-lès-Nancy : INRA, Résumé, 1-2. Séminaire Réseau Prairies Inra : Les prairies et l'Agro-écologie,
- [Cs2] Hammouda Rachid Fethi, Huguenin Johann, **Taugourdeau Simon,** Nedjraoui Dalila. 2016. Temporal changes of the botanical and functional composition of Algerian steppes of the Hadj Mechri commune (Wilaya de Laghouat). In : EcoSummit 2016 - Ecological Sustainability: Engineering Change. INRA, IRD. Montpellier : INRA, 1 p. International EcoSummit Congress 2016. 5, Montpellier, France, 29 Août 2016/1 Septembre 2016
- [Cs3] **Taugourdeau Simon,** Johansen Line, Wehn Solvi. 2016. Assessment of multiples ecosystem services of Norwegian semi-natural grasslands based on vegetation characteristics. In : EcoSummit 2016 - Ecological Sustainability: Engineering Change. INRA, IRD. Montpellier : s.n., 1 poster International EcoSummit Congress 2016, Montpellier, France, 29 Août 2016/1 Septembre 2016.

- [Cs4] Jahel Camille, Assouma Mohamed Habibou, **Taugourdeau Simon**, Degenne Pascal, Castets Mathieu, Lo Seen Danny, Sy Rassoul, Diop Djibril, Bourgoin Jeremy, Camara Astou. 2019. How to model moving farming systems? The case of transhumant breeders in northern Senegal. s.l : s.n., 3 p. International Symposium for Farming Systems Design (FSD6). 6, Montevideo, Uruguay, 18 Août 2019/21 Août 2019.
- [Cs5] **Taugourdeau Simon**, **Bossoukpe Marina**, Ndiaye Ousmane, Cesaro Jean-Daniel, Touré Ibra, Bourgoin Jeremy, Dorego G. Séraphine, Diouf Abdoul Aziz, Faye Emile. 2019. Utilisation des drones dans la recherche sur le pastoralisme. . Dakar : s.n., 1 poster AgriNumA 2019 : Symposium “Agriculture Numérique en Afrique”, Dakar, Sénégal, 28 Avril 2019/30 Avril 2019.
- [Cs6] **N’Goran A.J.A.**, Diouf Abdoul Aziz, Diatta Sekouna, **Djagoun A.**, Cournac Laurent, Chapuis-Lardy Lydie, Assouma Mohamed Habibou, Blanfort Vincent, **Taugourdeau Simon**. 2019. Soil C and N stocks in the sylvopastoral zone of Senegal is influenced by trees. Montpellier : s.n., 1 poster World Congress on Agroforestry. 4, Montpellier, France, 20 Mai 2019/22 Mai 2019
- [Cs7] Bazan Samantha, **Taugourdeau Simon**, Ndiaye Ousmane. 2019. L’herbier ALF du CIRAD: Une collection de plantes Africaines en ligne. 1 poster Colloque international science ouverte au Sud : Enjeux et perspectives pour une nouvelle dynamique, Dakar, Sénégal, 23 Octobre 2019/25 Octobre 2019
- [Cs8] Cesaro Jean-Daniel, Mbaye Tamsir, Touré Ibra, **Taugourdeau Simon**, Delay Etienne, Diouf Abdoul Aziz, Ba M.F., Diop Djibril, Ferrari Serena, Ba B., Ngom Daouda, Akodewou Amah. 2022. Reforestation et pastoralisme au Sahel : (ré)concilier les usages dans les territoires pour une relance de la Grande muraille verte . ONU. Abidjan : ONU, 1 p. Conférence des parties (COP15) de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification. 15, Abidjan, Côte d’Ivoire, 9 Mai 2022/20 Mai 2022.

Rapports

a) Rapport Diplômants [Rd]

- [Rd1] **Taugourdeau Simon** Variabilité intra spécifique de traits fonctionnels le long de gradients écologiques ” 2009 Réalisé sous la direction de Marie Laure Navas (Supagro)Université de Montpellier II MASTER 2 BGAE EcoSystemeS
- [Rd2] **Taugourdeau Simon** 2010, Indice foliaire d’un système agroforestier à base café: Mesure, dynamique et relation avec la production. Réalisé sous la direction de Gueric, Le Maire, Olivier Roupsard, Jacques Avelino CIRAD. Université de Montpellier II MASTER 2 BGAE EcoSystemeS
- [Rd3] **Taugourdeau Simon**. 2014. Effects of management and climate on the plant functional diversity related to ecosystem services of permanent grasslands in Europe. Nancy : Université de Lorraine, 193 p. Thèse de doctorat Réalisé sous la Direction de Sylvain Plantureux et Olivier Huguenin-Eli

b) Rapport d’expertise [Re]

- [Re1] Cesaro Jean-Daniel, Jolivot Audrey, **Taugourdeau Simon**. 2019. Mapping Amu Darya’s ecosystem riverbanks: land cover, ecology and LABR management. Montpellier: CIRAD-ES-UMR SELMET, 36 p
- [Re2] Jolivot Audrey, Bégué Agnès, Touré Ibra, **Taugourdeau Simon**, Ickowicz Alexandre. Rapport sur l’étude et la cartographie de la végétation dans la zone du PREPAS (Projet de renforcement de l’élevage pastoral dans les régions du Baha, de l’Ennedi et du Waadi Fira au Tchad). 2021. Montpellier : CIRAD, 31 p.

c) Rapport de recherche [Rr]

- [Rr1] **Taugourdeau Simon**, Cesaro Jean-Daniel. 2017. Utilisation des drones dans l'étude du pastoralisme : Piste de réflexions Montpellier : CIRAD-ES-UMR SELMET, 6 p.
- [Rr2] **Taugourdeau Simon**, Ndiaye Ousmane, **Diatta Ousmane**, **Bossoukpe Marina**, **N'Goran Ange**, **Djagoun Juste**. 2019. Test de protocole pour l'utilisation de la photogrammétrie pour l'étude de la végétation de savanes sahéliennes à partir d'appareil photographique compact et de drones lowcost. Montpellier : CIRAD, 30 p.

Autres documents

a) Notice de logiciel [NI]

- [NI1] **Taugourdeau Simon**, Messad Samir. 2017. TATALE: Tools for Assessment with Transformation and Aggregation using simple Logic and Expertise. Manual (Version March 2017). Montpellier : CIRAD-ES-UMR SELMET, 11 p. <http://umr-selmet.cirad.fr/les-produits-et-expertises/produits/tatale>

b) Vidéo internet [Vi]

- [V11] **Taugourdeau Simon** Webinaire utilisation du drone pour le suivi de la végétation au Sahel https://youtu.be/tHNTv_BDT80

c) Invitation Média [IM]

- [IM1] Participation à l'émission Infiniment Aride (16 Juillet 2022) France Culture <https://www.radiofrance.fr/franceculture/podcasts/infiniment/aride-2699405>

Travaux Encadrés

Au total, j'ai encadré 38 étudiants (5 d'entre eux ont été encadré sur deux profils différents (3 étudiants de master ont effectué une thèse co-encadrée par moi, une doctorante a travaillé ensuite en post doc et un étudiant en master a effectué une césure ensuite).

Sur ces 43 encadrements, 4 étudiants étaient en thèse co-encadrée, 32 Mémoires de niveau master (M1, M2 ou dernière année d'ingénieur) et 6 étudiants en césure (stage non diplômant) et un post doc.

La figure 2 présente la distribution des date de fin de ces encadrements par type (Doctorant D Master M, Césure C et Post Doc PD)

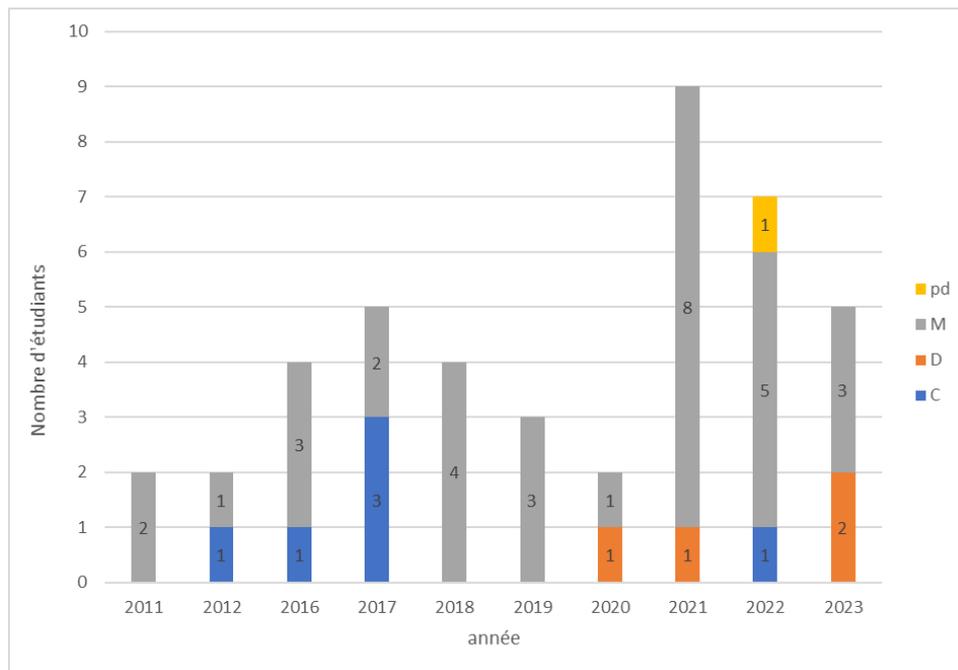


Figure 2 distribution temporelle des encadrements d'étudiants (Doctorant en orange, Master en gris, étudiants en césure en bleu et en jaune les post doctorant)

Ces étudiants étaient de 8 nationalités différentes avec principalement des étudiants français mais aussi des étudiants de 6 pays africains (Sénégal, Bénin, Côte d'Ivoire, Tchad, Congo et Madagascar). Entre 2016 et 2023, j'ai encadré en moyenne 5 étudiants par an. Sur ces 43 encadrements, 27 étaient des femmes et 16 étaient des hommes.

Thèses de doctorat

a) Co-encadrement direct [Td]

- [Td1] Ousmane Diatta 2018-2021 Dynamique saisonnière et inter-annuelle de la flore et de la végétation des parcours sahéliens du Sénégal (CRZ Dahra) Université Cheick Anta Diop ED SV (Directeur Daouda Ngom UCAD). <https://agritrop.cirad.fr/606892/>
- [Td2] Annaël Barnes 2020-2023 « Compensation Ecologique et Services écosystémiques en Asie Centrale ». Institut Agro ED GAIA (Directeur Paulo Salgado CIRAD SELMET et Co directrice Alexia Stockes INRAE AMAP) <https://agritrop.cirad.fr/606820/>
- [Td3] Ange N'Goran 2020-2023 « Impact des pratiques et du régime du pluie des pâturages sahélien » Université Cheick Anta Diop ED SV Directeur Daouda Ngom UCAD)

b) Co encadrement secondaire [Ts]

- [Ts1] Morgane Dendoncker (2015- 2020) « 50 ans de dynamique temporelle dans le Sahel sénégalais (Ferlo): bases pour une approche de diversité fonctionnelle » Université Catholique de Louvain. (Direction Caroline Vincke) <https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal:240625> Mémoires de niveau master/ingénieurs

a) Etudiants de Master/ingénieur diplômant [Em]

- [Em1] Lucie Sempé (2011): « Etude de la relation entre la surface d'échantillonnage et la diversité fonctionnelle reliée à la production primaire des prairies permanentes. » Master 1 Forêt Agronomie et Environnement Université de Lorraine. Nancy France

- [Em2] Cécile Domenicone (2011) « Etude de la relation entre la surface d'échantillonnage et la diversité fonctionnelle reliée à la biodiversité et la pollinisation » Master 1 Forêt Agronomie et Environnement Université de Lorraine. Nancy France
- [Em3] Marine Benoiste (2012) « Développement d'indicateurs de biodiversité des prairies » MASTER 2 Biodiversité, Écologie Et Évolution Parcours Écologie De La Conservation – Université Pierre et Marie Curie, Paris, France
- [Em4] Mylène Lascoste (2016) « Comparaison des caractéristiques agroécologiques entre des mélanges fourragers plurispécifiques et le trèfle d'Alexandrie en région méditerranéenne » Master 1 Agrosociétés, Environnement, Territoires, Paysage, Forêt Agroparitech
- [Em5] Mathilde Dionisi(2016) « Évaluation rapide de la biodiversité des prairies via la classification sur des images de couverts herbacés : test des logiciels d'analyse images » Master 1 Institut Polytechnique LaSalle Beauvais,France
- [Em6] Louise Randrianarivony(2016) « Étude de la dynamique de la biodiversité végétale des prairies réunionnaises sous différents traitements de fertilisation et conditions climatiques : approche d'écologie fonctionnelle » Master 2: «Environnement, Ecotoxicologie, Ecosystème » Spécialité: Gestion des Milieux Aquatiques Restauration et Conservation, Université Paul Verlaine, Metz, France <https://agritrop.cirad.fr/582044/>
- [Em7] Afolabi Juste Maxime DJAGOUN(2017-2018), « *Estimation de la variabilité morphologique des plantes du Sahel à partir des herbiers en lien avec les changements globaux* » – Master 2 en Agroforesterie Ecologie et Adaptation, UCAD, Sénégal <https://agritrop.cirad.fr/606877/>
- [Em8] Adjoua Ange-jokébed N'GORAN(2017-2018), « Influence des arbres sur les teneurs en carbone et azote du sol dans la zone sylvo-pastorale » Master 2 en Agroforesterie Ecologie et Adaptation, UCAD, Sénégal <https://agritrop.cirad.fr/606878/>
- [Em9] Mia Svensk(2018), « Potentialité du SPIR sur les herbiers », Master 1 Biodiversité végétale et gestion des écosystèmes tropicaux, Université Montpellier, France.
- [Em10] Claude Patrick Millet (2018) « Construction d'indicateurs de services écosystémiques délivrés par les prairies basées sur des critères végétaux » Master 2 Biodiversité végétale et gestion des écosystèmes tropicaux, Université Montpellier, France. <https://agritrop.cirad.fr/598139/>
- [Em11] Lena Yentur, 2018. Grassland ecosystems: Evaluating services through the development of indicators based on biodiversity criteria. 33 p. Mémoire de master 2 : Écosystèmes et Bioproduction Marine. Université de Nantes, France https://pesi.cirad.fr/content/download/4161/31438/version/1/file/Rapport_M2_Lena_Yentur_2018.pdf
- [Em12] Poisse Lisa. 2019. « Évaluation et validation d'indicateurs de services écosystémiques rendus par les prairies. » Nancy : Université Lorraine, 39 p. Mémoire de master 2 : Agronomie, environnement, territoires, paysage et forêt (AETPF) : Université de Lorraine, Nancy, France <https://agritrop.cirad.fr/598138/>
- [Em13] Vignerot Manon. 2019. Etude des compromis entre les services écosystémiques des prairies et de leur corrélation spatiale et temporelle. Montpellier : Université de Montpellier, 51 p. Mémoire de master 2 : Statistique pour les sciences de la vie : Université de Montpellier, France <https://agritrop.cirad.fr/598137/>
- [Em14] Annaël Barnes (2019) Etude préliminaire d'un dispositif de compensation écologique dans un écosystème aride à vocation sylvo-pastorale : cas d'une exploitation minière d'uranium dans la province du Dornogobi en Mongolie. Gestion Environnementale des

- [Em15] Marina Bossoukpe(2018-2021), « Etude de la végétation de savanes sahéliennes par photogrammétrie à partir d'appareil photographique compact et de drones low-costs », Master en Agroforesterie Ecologie et Adaptation, UCAD, Sénégal <https://agritrop.cirad.fr/606880/>
- [Em16] Antoine Diedhiou, (2020) « Utilisation de la photogrammetrie pour l'évaluation des caractéristiques de couverts herbacés au Sénégal »- Master en Agroforesterie Ecologie et Adaptation, UCAD, Sénégal <https://agritrop.cirad.fr/606881/>
- [Em17] Mady Parfait Noé Madingou(2021), « Diversité des ligneux dans les dépressions topographiques dans le nord Sénégal », Master Biodiversité Ecologie Evolution Parcours Biodiversité végétale et Gestion des Ecosystèmes Tropicaux, Université de Montpellier et AgroParisTech, France
- [Em18] Terei Massa Mabilo (2021-2022), « Caractérisation du pâturage naturel dans les zones de concentration des animaux en saison sèche de la vallée du Mandoul au Tchad », Master Management des Ressources Animales (MRA), Université d'Abomey-Calavi, Bénin
- [Em19] Fréjuste Joseph Cofélas Fassinou (2020-2022), « Impact des arbres sur la dynamique de la strate herbacée des savanes sahéliennes : approche par Drone » Master2 en Agroforesterie Ecologie et Adaptation, UCAD, Sénégal <https://agritrop.cirad.fr/606887/>
- [Em20] Marie Elene Dione (2021- 2022), « Etude de la variabilité de la surface foliaire spécifique des espèces ligneuses du ferlo sableux » Master 2 Aménagement et Gestion Durable des Ecosystèmes Forestiers et Agroforestiers, Université Assane Seck De Ziguinchor Sénégal <https://agritrop.cirad.fr/606883/>
- [Em21] Manoël Dewaesegger (2021-2022) “Long-term dynamics (1961-2021) of the woody vegetation in the savannas of the Senegalese silvopastoral region” Université Catholique de Louvain, Belgique
- [Em22] Louise Sail(2021-2022) : « Étude de la distribution spatiale de la végétation ligneuse dans la savane arborée sahélienne du Sénégal » Université Catholique de Louvain, Belgique
- [Em23] Nathan Romaszko (2021- non soutenu) “Évolution des communautés des végétales des écosystèmes ouverts des zones sèches de l'Afrique tropicale au nord de l'équateur » Master 2 Biodiversité Ecologie Evolution Parcours Biodiversité végétale et Gestion des Ecosystèmes Tropicaux, Montpellier France.
- [Em24] Marine Bistiaux (2021- non soutenu) « Variation des traits fonctionnels foliaire chez *Vachellia tortillis* et *Balanites aegyptica* » Université Catholique de Louvain, Belgique
- [Em25] Serge Nabénéza (2022) « Comptage de bovins à partir d'images acquises par drone au point d'abreuvement » Master « Sciences et Technologie de l'Agriculture, de l'Alimentation et de l'Environnement » Institut agro Montpellier, France.
- [Em26] Mélina Turpaud (2022) « Evaluation de Pl@ntNet dans l'identification des espèces des prairies méditerranéennes en lien avec les enjeux des professionnels des secteurs de l'agriculture et de l'élevage » Master 1 Biodiversité Ecologie Evolution Parcours Biodiversité végétale et Gestion des Ecosystèmes Tropicaux, Montpellier France.
- [Em27] Maïalich NUNGI-PAMBU(2022) “Utilisation des drones comme étape intermédiaire pour la cartographie de la végétation à l'échelle nationale : exemple du Sénégal » Mastère Systèmes D'informations Localisées pour L'aménagement Des Territoires, Agroparitech, Montpellier, France. <https://agritrop.cirad.fr/602811/>

- [Em28] Aymeric Beugnon (2022) « Impact de la végétation sur le stock de carbone organique: application à la compensation de l'activité minière dans le district de Sozak au Kazakhstan » Ecole Supérieure d'Agro-Développement International, Angers, France. <https://agritrop.cirad.fr/606821/>
- [Em29] Ramata Ndianor (2021-2023) « Régénération naturelle des espèces ligneuses dans le ferlo sableux : influence du mode de gestion des parcours (peuplements naturelles vs plantations) » Master2 en Agroforesterie Ecologie et Adaptation, UCAD, Sénégal <https://agritrop.cirad.fr/606885/>
- [Em30] Nolwenn Maudieu (2023) « Etude des relations entre densités des plantes pérennes et services écosystémiques dans le Désert de Gobi » Master 2 Biodiversité Ecologie Evolution Parcours Biodiversité végétale et Gestion des Ecosystèmes Tropicaux, Montpellier France. <https://agritrop.cirad.fr/606916/>
- [Em31] Clara Garcia Matos (2023) « Perception des services écosystémiques et acceptabilité sociale des pratiques de compensation dans le Désert de Gobi » Master2 Ingénierie Ecologique et Gestion de la Biodiversité Montpellier France.
- [Em32] Rakotomalala Andrianiaina (2023) « Caractérisation spatiale de la diversité de la végétation des parcours dans le centre de Madagascar » -Master II en Diagnostic, suivi écologique et aménagement des écosystèmes UNIVERSITE D'ANTANANARIVO, FACULTE DES SCIENCES

c) *Etudiants en Césure (non diplômants) [Ec]*

- [Ec1] Tiphaine Audic (2012) « Identification des critères de diversité fonctionnelle liées au cycle biogéochimique » Césure d'École Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse, France
- [Ec2] Sylvestre Georis (2016) « identification des déterminants de la biodiversité végétale des pâturages tropicaux et méditerranéens » Université catholique de Louvain, Belgique
- [Ec3] Zoé Daba Gomis (2017) « Création d'une base de l'herbier ISRA » Université Assane Seck De Ziguinchor Sénégal
- [Ec4] Ousmane Diatta(2017) « suivi de la végétation au cours de la saison et impact de la date de fauche sur la végétation » UCAD, Sénégal
- [Ec5] Moussa Camarra(2017) « Numérisation des planches d'herbiers d'ISRA » UCAD, Sénégal
- [Ec6] Fréjuste Joseph Cofélas Fassinou (2022). « Etude de l'impact de la Grande Muraille verte sur la densité des ligneux à l'échelle du Sénégal » UCAD, Sénégal

Encadrement de Post doc. [Pd]

- [Pd1] Morgane Dendoncker (2020-2022) « étude de la dynamique de ligneux et leur contribution au bilan carbone » Université catholique de Louvain, Belgique

Obtentions de moyen nécessaire à la réalisation de la recherche

J'ai participé au montage de 51 réponses à des appels d'offres, 38 en tant que porteur ou rédacteur. Sur ces 38 projets, 11 projets ont été obtenus, 24 rejetés et 3 sont soumis et en attente de réponse. Il y a trois autres projets en attente de réponse où je suis le porteur côté CIRAD mais pas le porteur du projet. Le taux d'acceptation de projets en tant que porteur est donc autour de 31 %. Les 11 projets acceptés ont permis l'obtention de 5 419 k€ dont 5 000 k€ pour le projet européen Cassecs que j'ai corédigé avec Habibou Assouma et qui est coordonné par El Hadj Traoré (ISRA) et Paulo Salgado (CIRAD).

La Figure 3 présente la distribution temporelle de ces réponses à des appels à projets. En moyenne depuis 2015, j'ai soumis 3,66 projets par an comme porteur. Mon activité de montage de projet résulte en partie de mon « isolement scientifique » au sein de mon Unité et donc de mon besoin de trouver des financements pour mes activités. De plus, mes partenaires au Sénégal étaient le plus souvent des chercheurs juniors ne disposant pas de financement ni d'expérience dans le montage de projet. Pour finir, le CIRAD étant un EPIC, il est nécessaire de rapporter des financements (notamment pour les salaires) pour contribuer à l'équilibre financier de l'établissement.

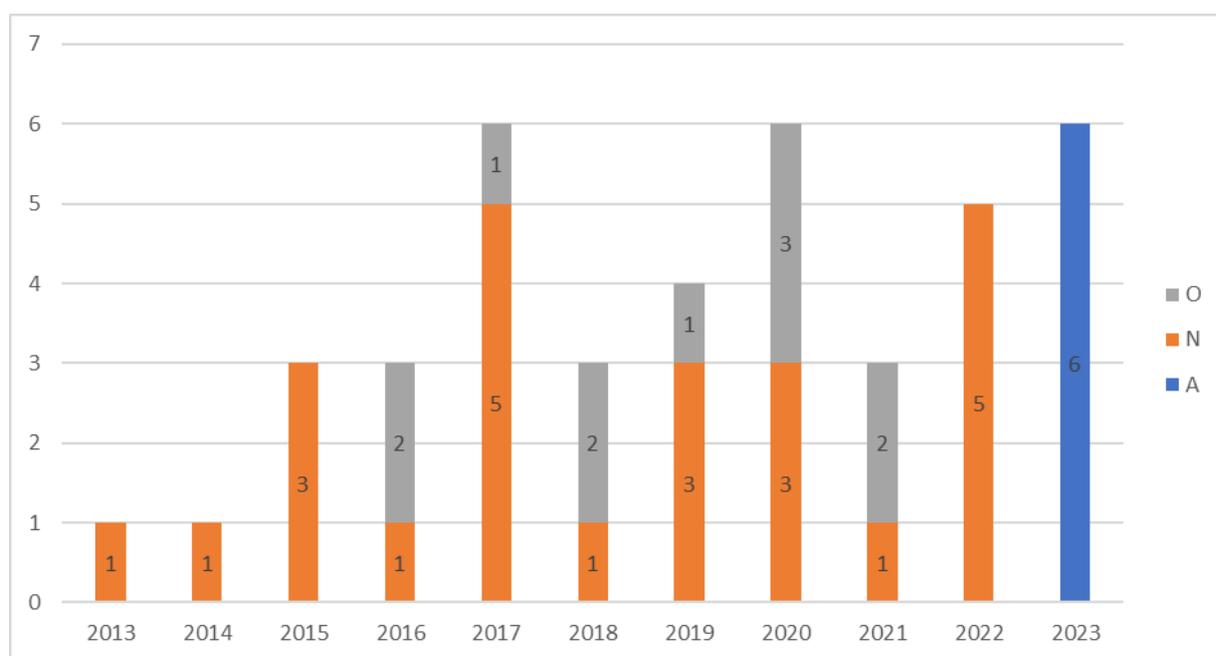


Figure 3 Répartition temporelle des réponses à des appels à projet comme porteur/rédacteur ou porteur coté CIRAD en gris, les projets obtenus, en orange les projets non retenus et en bleu en attente.

Projets en porteur principal

a) Projets en porteur /rédacteur principal obtenus [Ppo]

- [Ppo1] CRESI Patdyveg (2015-2016) « Dynamiques de la végétation des pâturages tropicaux et méditerranéens: Création et méta-analyses d'une base de données. » Ai CRESI 9k€
- [Ppo2] CRESI Plénoherbe(2015-2016) « Développement de mesures non destructives des caractéristiques des couverts herbacés à partir d'images plénoptiques et de spectrométrie proche infrarouge » AI CRESI 12k€

- [Ppo3] Ths(2016-2017) « mesures de Traits fonctionnels des espèces végétales à partir d’Herbier à l’aide de la Spectrométrie en proche infrarouge. » AI CRESI 10k€
- [Ppo4] PESI (2018-2019) « Pasture Ecosystem Services Indicators” MetaProgram Ecoserv (29k€)
- [Ppo5] DynaVEG (2018-2021) Dynamique de la diversité végétale (rédacteur porteur Ousmane Ndiaye ISRA) 6k€
- [Ppo6] Orano- stage (2019-2020) « Compensation écologique en Mongolie » Financement Privé Orano 35 k€
- [Ppo7] Cassecs(2020-2024) Carbon Sequestration and greenhouse gas emissions in (agro) Sylvopastoral Ecosystems in the sahelian CILSS States. DESIRA UE 5 000k€ (Rédacteur Porteur El Hadj Traoré ISRA).
- [Ppo8] Orano Thèse(2020-2024) « compensation écologique et services écosystémiques» Financement privé Orano 275k€
- [Ppo9] Digitag Camera (2020) « Segmentation d’images dans le but d’améliorer les prédictions de la biomasse des pâturages à partir de la photogrammétrie » DIgitag 7.5k€
- [Ppo10] Digitag Drone National(2021) « Utilisation des drones comme étapes intermédiaires pour la cartographie de la végétation à l’échelle national. Exemple du Sénégal » DIgitag 7.5k€
- [Ppo11] Digitag plantnet (2021) « Validation de l’outil Pl@ntnet pour les plantes des pâturages pour l’appui aux éleveurs » DIgitag 7.5k€

d) Projet en porteur /rédacteur principal non obtenus [Ppn]

- [Ppn1] CAF-HERB (2013): Ecosystem Services from the Understory Plant Community in Coffee Agroforestry Systems NSF project 1 752 k USD . Rédacteur principal (PI Travis Idol University of Hawaii)
- [Ppn2] CAF-HERB (2014) Ecosystem Services from the Understory Plant Community in Coffee Agroforestry Systems NSF project 1 752 k USD. Rédacteur principal (PI Travis Idol University of Hawaii)
- [Ppn3] Pasture Ecoserv (2015) « From boreal to tropical regions: Defintion of a common set of ecosystems servicesprovided by pasture ecosystems. Projet Aurora (France Norvège) . 10 kE
- [Ppn4] CESEMET(2015) « Changement d’Echelles des Services écosystémiques des systèmes d’Elevages Méditerranéens Et Tropicaux conduits aux pâturages: comparaison de méthodes. » MetaProgramme Ecoserv 30 k€
- [Ppn5] SCAP(2015) Services rendus aux Cultures par les écosystèmes semi-naturels dans les paysages Agro-sylvo-Pastoraux Africains » ANR AAPG 798 k€.
- [Ppn6] Openflora africa (2016) “Mapping Ecosystem Services of African Open ecosystem through their plant biodiversity using participative data” Agropolis foundation 257k€.
- [Ppn7] Divarb (2017) Services écosystémiques rendus par la biodiversité arborée dans la zone sylvopastorale sénégalaise Sep2d 35k€ (rédacteur porteur Ousmane Ndiaye ISRA°
- [Ppn8] Hist(2017)) « Utilisation des Herbiers pour estimer la variabilité Intra-Spécifique des Traits fonctionnels des plantes du sahel en lien avec les changements globaux » Sep2D 30k€
- [Ppn9] SénéScales (2017) évaluation multi-échelle de la diversité végétale des agroécosystèmes dans le Nord Sénégal Sep2d 29k€ (rédacteur porteur Gualbert Séraphin Dorégo ISRA)
- [Ppn10] Uht(2017) « Utilisation des Herbiers pour caractériser les traits des espèces végétales du Tchad en fonction des zones bioclimatiques » Sep2d 21k€ (rédacteur porteur Oueddo DASSERING IREd)

- [Ppn11] Esep (2017) » Évaluation des services écosystémiques rendus par les parcours sahéliens » projet isite MUSE 49 k€
- [Ppn12] GR2D2(2018) « Grazing and Rainfall Regime impacts on Drylands Dynamics” ANR JC 304k€.
- [Ppn13] GR2D2(2019) « Grazing and Rainfall Regime impacts on Dryland Dynamics.” ANR JC 296k€
- [Ppn14] Digitag drone (2019) : Quantification de la structure des arbres par photogrammétrie 3D pour renseigner les services écosystémiques en Afrique subsaharienne. Stage digitag 7.5k€
- [Ppn15] Digitag Services écosystémiques(2019) : Évaluation des services écosystémiques des parcours sahéliens à partir de télédétection Stagir digitag 7.5k€
- [Ppn16] LDSVE (2020) Long-term Dynamic of Sahelian Vegetation and Ecosystem services.
- [Ppn17] ESOSIS (2020) Ecosystem Services Of Savannah In Sahel. Muse 370 k€
- [Ppn18] SESI (2020) Senegalese ecosystem services indicators. AI CRESI 24.5k€
- [Ppn19] Ramona (2021) Rangeland monitoring for africa using earth observation - continental demonstrator (ramona) esa
- [Ppn20] DESIRS (2022) Dryland Ecosystem Services Indicators from Remote Sensing. CNES TOSCA 15k€
- [Ppn21] Digitag pâturage(2022), Mobilisation de l’outil drone pour étudier le comportement alimentaire des troupeaux ovins. Stage Digitag 7.5k€
- [Ppn22] GSH image (2022) Grazing land Spatial Heterogeneity using image analysis process. ANR PRC 365k€
- [Ppn23] MOD-SPAH (2022) Modélisation spatialisée des herbacées des pâturages extensifs. AI CRESI 18 k€
- [Ppn24] PIA-MED (2022) Participative monitoring based on Images Analysis of MEDiterranean biodiversity and ecosystem Biodiversa 310k€

e) *Projets en porteur /rédacteur principal soumis en attente [Ppa]*

- [Ppa1] MOD-SPAH Modélisation spatialisée des herbacées des pâturages extensifs (appel exploration MUSE 15k€)
- [Ppa2] GSH Image Grazing land Spatial Heterogeneity using image analysis process (ANR 900 k€)
- [Ppa3] NPM PM - Le Numérique au service de l’élevage Pastoral Méditerranéen (ANR MRSEI 35k€)

Projet en collaborateur.

a) *Projets en collaborateur obtenus[Pco]*

- [Pco1] PREPAS(2014-2026) Projet de renforcement de l’élevage pastoral au Tchad. Coopération suisse
- [Pco2] GIZ Amu Daria (2018-2020) Mapping Amu Darya’s ecosystem riverbanks: GIZ
- [Pco3] ACCEPT(2019-2023) Adapter l’accès aux ressources agro-pastorales dans un contexte de mobilité et de Changement Climatique pour l’Elevage Pastoral au Tchad. DESIRA UE 3 000k€
- [Pco4] Sante et territoire(2021-2025) La santé comme levier de développement dans le cadre de la transition agroécologique. DESIRA- AFD-UE
- [Pco5] DINAAMICC (2021-2025) Démarches intégrées et accompagnement pour une agriculture familiale à Madagascar innovante et résiliente aux changements climatiques DESIRA UE (5 000k€)

[Pco6] Dundi Ferlo (2022-2025) Dundi Ferlo – Reforestation du Ferlo pour une gestion durable des terres pastorales. We Forest

[Pco7] CamelShield (2020-2024) « Filière Camelin au Magrheb

b) Projet en collaborateur non obtenus [Pcn]

[Pcn1] climat smart land (2015) Mobilité des animaux d'élevage et organisation spatiale des stock/flux d'azote et de carbone: conséquences pour la co-conception de territoires climato-intelligents avec les acteurs locaux ANR PRC

[Pcn2] DTscat(2016) Dynamic of Soil Carbon Sequestration in Tropical and Temperate Agricultural systems Agropolis foundation.

c) Projets en collaborateur en attente [Pca]

[Pca1] Save Water Prima section 2: utilisation de l'intelligence artificiel pour l'évaluation des ressources en eaux en méditerranée

[Pca2] Eurodesert (h2020 Mission soil) « Desertification»

[Pca3] PAM-AgroAfrique - Pâturages Africains et Modélisation pour une AGROécologie durable en AFRIQUE(TSARA)

Vie collective et Réseaux Scientifiques.

Positionnement Scientifique au sein de l'unité SELMET

L'unité SELMET est une UMR (INRAE, CIRAD, Institut agro) qui est une unité très pluridisciplinaires alliant à la fois les sciences biologiques (zootechnie, physiologie animale, agronomie des fourrages), des sciences systémiques (agronome systèmes, modélisation) et des sciences humaines et sociales (économistes et géographes). A mon arrivée en 2015, deux collègues seulement travaillaient sur les questions d'écologie végétale (un sur le stock de carbone en Amazonie et un autre sur l'utilisation des ressources végétales au Maghreb). Au final, vu mon départ au Sénégal, il fut compliqué de collaborer avec eux et j'ai rapidement dû trouver mon autonomie pour financer mes activités de montage de projets.

Bien qu'elle soit enrichissante, la pluridisciplinarité trouve certaines limites dans le montage d'activités, mais aussi dans l'encadrement des étudiants notamment pour diriger des thèses.

Contribution à la vie collective des unités de recherches et des institutions de recherches

Durant ma thèse, je fus représentant des doctorants du Laboratoire agronomie environnement (LAE) pendant un an (2011-2012).

Depuis mon arrivée dans l'UMR SELMET, je suis membre actif du champ scientifique ARE (Animaux Ressources Environnement). J'ai participé au groupe fourrage au sein de l'unité et contribué à une réflexion sur l'écologie et les sciences environnementales au sein de l'unité avec Matthieu Vigne et Fabien Stark à la demande de la direction de l'unité.

J'ai également contribué au recrutement du poste de curateur de l'herbier ALF (herbier du CIRAD), de la demande de poste en interne, au processus de recrutement, et au tutorat de la personne recrutée (Samantha Bazan) lors de son arrivée au CIRAD.

Au niveau du CIRAD, j'ai participé au Chantier Transversal Stratégique (CTS) Biodiversité et je suis aussi présent dans l'animation de la communauté de pratiques sur le Drone.

PPZS Contribution au pôle pastoralisme et zones sèches

Mon affectation au Sénégal s'est effectuée dans le cadre du dispositif pôle pastoralisme et zones sèches (PPZS). Le PPZS est un groupement d'intérêt scientifique entre le CIRAD, le Centre de Suivi écologique de Dakar (CSE), l'institut sénégalais de recherches agricoles (ISRA) et l'université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD). Dans le cadre du PPZS, j'ai initié une réflexion sur l'écologie pastorale au sein du DP PPZS via la création d'un groupe de travail. Ce groupe de travail a permis d'entamer une réflexion sur l'écologie pastorale avec 5 autres collègues des autres institutions. Cette réflexion a contribué à nourrir le projet scientifique du dispositif entre 2018-2021 et 2022-2025 et une partie importante du projet CASSECS. J'ai aussi participé à l'évaluation du dispositif en 2018 et 2022. De plus, j'ai exercé la fonction d'intérimaire des animateurs du DP PPZS (Christian Corniaux et Paulo Salgado) durant leur absence, gérant ainsi le fonctionnement du dispositif (gestions des finances et du personnel d'appui).

Participations aux réseaux scientifique sur les fourrages et les pâturages

J'ai participé à plusieurs éditions de l'European Grassland Federation (EGF) : 2012 (Lublin), 2016 (Trondheim), 2017 (Alghero), 2018 (Cork), 2020 (Online), 2021 (online) et 2022 (Caen). J'ai aussi participé à l'international Grassland Congress (2015) à New Delhi.

Le PPZS a organisé en 2017 un colloque sur le pastoralisme dans les courants des changements globaux (P2CG). J'ai pris en charge l'édition du livre des actes du colloque.

Je suis aussi membre du comité éditorial de la revue fourrage et je fus éditeur du numéro spécial « Écologie pastorale au Sahel » de la revue d'élevage et de médecine vétérinaire ([Taugourdeau et Mbaye 2020 \[AC4\]](#)).

Partenariats Scientifiques

Le partenariat au sein de l'unité SELMET s'est plus structuré autour de projets pluridisciplinaires autour de l'élevage avec des activités sur la végétation que sur des réelles interactions scientifiques sur la thématique. Ces liens se sont faits principalement en fonction du lieux d'affectation au Sénégal avec Jean Daniel Cesaro sur les questions autour de la grande muraille verte, avec Paulo Salgado et Habibou Assouma dans le cadre du projet Cassecs et avec Ibra Touré et Alexandre Ickowicz sur les projets au Tchad.

Avec mon intention de m'orienter sur les territoires méditerranéens, je travaille plus avec Lionel Julien mais aussi les collègues INRAE et Institut agro de l'unité SELMET (Magali Jouven, Jean Baptiste Menassol et Fabien Strak).

Je travaille également avec l'équipe de l'herbier (Samantha Bazan) et du laboratoire d'Alimentation (Laurent Bonnal et Denis Bastianelli) sur les utilisations des herbiers et de la spectrométrie en proche infrarouge (SPIR).

J'ai aussi établi des collaborations du fait de mon accueil avec l'UMR AMAP que ce soit sur les services écosystémiques (Alexia Stokes, Jean Luc Maeght et Mao Zhun), sur les outils numériques (Pierre Bonnet, Philippe Borianne, Frédéric Borne) et en écologie (Pierre Couteron, Guillaume Papuga et Karim Barkaoui).

Au CIRAD, j'ai travaillé avec les collègues sur les thématique du drone (Emile Faye UPR Hortsys, Alain Audebert UMR AGAP et Audrey Jolivot UMR TETIS) et avec Amah Akodewou de l'UPR Forêt et société.

Au niveau de la recherche en France, mes collaborations ont eu lieu avec l'UMR UREP et l'UMR LAE dans le cadre du Projet PESI. Des pistes de collaborations sont prévues avec l'UMR UREP ainsi que l'UMR EVA dans les projets soumis

Au niveau Européen, des collaborations fortes avec l'Université Catholique de Louvain sur les arbres au Sahel et l'université de Copenhague et de Lund sur la télédétection et la tour à flux de Dahra Djoloff.

Au Sénégal, des collaborations fortes avec les partenaires du DP PPZS (ISRA, CSE et UCAD).

Au Maroc des collaborations en construction avec l'IAV, l'INRA (en particulier d'Oujda), l'université Mohammed V et l'ENFI.

Mémoires des travaux de recherches



Crédit Simon Taugourdeau (Suisse , Norvège et Sénégal)

I. Contexte.

Les pâturages dans le monde

Les pâturages au sens large regroupent les différentes occupations du sol présentant une vocation de production du fourrage pour les grands herbivores domestiques ou sauvages (Allen et al. 2011). Dans la majorité des pâturages, les fourrages sont consommés directement par les animaux qui pâturent. Le fourrage peut aussi être récolté pour être ensuite donné aux animaux. En plus de la production de fourrage, les pâturages rendent de nombreux services écosystémiques (Bengtsson et al. 2019). Ces écosystèmes séquestrent du carbone dans leur sol (Zhou et al. 2023) permettant de contribuer à atténuer l'impact des émissions de gaz à effet de serre (Assouma et al. 2018b). Ils contribuent également aux autres cycles biogéochimiques. Les pâturages peuvent produire de nombreuses autres ressources pour l'usage d'alimentation en construction, énergie ou médicinale. Les pâturages offrent un habitat à de très nombreuses espèces végétales et animales. La provision des services écosystémiques varie fortement selon les différents types de pâturages et leur végétation.

Les plantes des pâturages peuvent avoir différentes origines, soit semées soit spontanées. Il existe des pâturages plantés à l'origine avec l'apparition d'espèces spontanées; les deux origines coexistent alors (Plantureux 2012). La végétation des pâturages est constituée d'herbacées (graminées et légumineuses). De nombreux pâturages comprennent également des espèces ligneuses qui contribuent alors fortement aux services écosystémiques (Le Houerou 1980). Les interactions entre ces deux types d'herbacées et ligneuses constituent un élément central dans le fonctionnement des communautés végétales dans ces pâturages (Akpo et al. 2003). Dans le cadre de mes activités, mon objet d'étude était principalement les pâturages avec des communautés végétales spontanées ou en coexistence/stabilisées.

Dans ces pâturages, les communautés végétales sont fortement influencées par l'environnement et les pratiques de gestion. Les pâturages sont présents dans presque l'intégralité des climats. Ils sont souvent l'unique possibilité de valorisation agricole des espaces, dans des zones présentant des conditions environnementales difficiles (zones sèches, zones froides/montagneuses, zones fréquemment inondées). Par exemple, les zones arides sont le plus souvent des zones de pâturages. Les zones arides sont définies par le ratio entre pluviométrie et évapotranspiration. Ces zones sont souvent définies comme les zones où cet indice est inférieur à 0.65. Il existe aussi des différences entre les zones hyperarides en dessous de 0.05, aride (ratio inférieur entre 0.05-0.20) semi-aride (0.20-0.50) et zone sèches subhumides (entre 0.5-0.65). (Sorensen 2007). Les zones arides sont présentes sur tous les continents

Les communautés végétales des pâturages sont influencées par des facteurs climatiques. Aussi bien par les modifications des quantités de pluies (comme les sécheresses) que par les autres paramètres du climat comme la température. La végétation est aussi influencée par les pratiques de gestion (pâturage, fauche, intensité d'utilisation, fertilisation) (Gaujour et al. 2012).

Les pâturages sont gérés selon deux modes principaux au niveau du foncier: les pâturages peuvent être privatifs avec une gestion à l'échelle de la parcelle (« ranching systems »). L'éleveur décide de ses pratiques de pâturage, de fauche et de fertilisation. Les pâturages peuvent être gérés collectivement comme des espaces « communs », par plusieurs éleveurs (en particulier avec le pastoralisme). Dans ce système, les troupeaux ont une très forte mobilité pour utiliser au mieux les ressources, variables dans l'espace-temps. Les pratiques sont parfois décidées collectivement avec quelquefois des interventions d'acteurs extérieurs. Ces acteurs souhaitent réaliser des actions de restauration des écosystèmes comme l'initiative de la grande

muraille verte africaine (Cesaro et al. 2022) ou des actions de restauration/ conservation (les parcs nationaux).

Ces deux modes de gestions ne sont pas totalement exclusifs. Certains systèmes d'élevage reposent à la fois sur des pâturages communs et des pâturages privatif (ex : systèmes des alpages).

Il existe une interaction entre le climat et les pratiques. Par exemple, en zone aride, les impacts sont différents en fonction de la température. On peut noter la présence de zones arides chaudes comme en Afrique mais aussi des zones arides froides comme en Asie centrale. Cette différence est importante. Par exemple, le pâturage a un impact sur le fonctionnement des écosystèmes plus positif dans les zones arides froides que chaudes

Végétation des pâturages

La végétation des pâturages peut être décrite de manière très différentes et donc avec différentes variables. Le choix des variables peut dépendre des objectifs (comprendre les facteurs déterminant la végétation ou voir le lien entre la végétation et le fonctionnement de l'écosystème et donc des services écosystémiques).

La végétation peut être décrite via des variables décrivant sa structure (biomasse, hauteur du couvert, taux de couverture) ou des variables liées à sa flore en particulier liée à sa description taxonomique.

Par exemple, la présence de certaines espèces et leur abondance peut être indicatrices de certains facteurs pédoclimatique ou de pratiques (Akiyama and Kawamura 2007). De plus, la provision en services écosystémique peut être liée à une seule espèce. Une autre possibilité est de prendre en compte l'ensemble des espèces présentes et de créer des types de végétations en fonction des associations des espèces entre elles. On peut les identifier en se reposant sur des distances botaniques comme celle de Jaccard ou de Bray Curtis. Les différents types ainsi obtenus peuvent être liés à des facteurs pédoclimatiques ou même être indicateurs de services écosystémiques liés à des facteurs pédoclimatiques ou même être indicateurs de services écosystémiques (Mesbahi et al. 2019).. La flore est parfois résumée à sa richesse spécifique (nombre d'espèces) que ce soit pour comprendre le lien entre biodiversité et fonctionnement des écosystèmes (Hector et al. 1999, Hooper et al. 2005) mais aussi de nombreuses études ont porté sur les déterminants de cette richesse spécifique (Gaujour et al. 2012). Le désavantage des approches taxonomiques c'est qu'elles sont peu généralisables et comparables entre les terrains. En effet, les études se basant sur des espèces ou des typologies ne peuvent pas être utilisées dans des flores différentes. Pour la richesse spécifique, les résultats peuvent être plus généralisables, mais cela dépend de la richesse de la flore locale.

Il existe une approche qui permet à la fois des approches liées à la flore et au fonctionnement des plantes et qui est généralisable.

Un trait fonctionnel est défini comme une caractéristique morphologique, physiologique ou phénologique mesurable à l'échelle de l'individu qui est liée à la performance de cet individu via sa croissance, survie ou reproduction (Violle et al. 2007). Pour les plantes, ces traits peuvent être foliaire, racinaire, des organes reproductifs ou de la plante entière. Des protocoles standardisés ont été définis pour avoir des mesures comparables entre études (Cornelissen et al. 2003, Pérez-Harguindeguy et al. 2013). Ces traits sont par définition liés au fonctionnement des plantes et donc de l'écosystème. Le SLA est un exemple de trait fonctionnel qui correspond au ratio entre la surface et la masse sèche de la feuille. Il est lié à l'activité de photosynthèse

et d'évapotranspiration (Wright et al. 2004) donc à la productivité primaire (Garnier et al. 2004). Les plantes avec un fort SLA sont souvent associées à des plantes avec un fort niveau de photosynthèse et d'acquisition des ressources. Au contraire, les plantes avec faible SLA sont des plantes qui ont une allocation moins orientée pour créer de la surface photosynthétique mais plus pour créer des feuilles épaisses et/ou avec des protections biochimiques ou physiques. Ces plantes ont le plus souvent une stratégie de conservation des ressources. On parle de « leaf economic spectrum ». Le SLA est donc dépendant des conditions de température, d'humidité et de fertilité du sol.

Les traits fonctionnels sont aussi influencés par le pâturage (Diaz et al. 2001). Il « sélectionne » en effet des individus avec une taille plus faible, une date de floraison plus précoce et des traits foliaires liée à l'acquisition des ressources. On peut parler de stratégie de tolérance. Il existe cependant une autre stratégie de réponses aux pâturages. En effet certaines plantes se « protègent » du pâturage via des défenses physiques (épines) ou chimiques qui sont souvent liées à des traits foliaires liés à la conservation des ressources. Cet exemple montre que les individus peuvent avoir différentes stratégies de réponses à un facteur. Il est donc primordial de prendre en compte l'ensemble des valeurs de traits porté par les espèces à l'échelle des communautés. On peut parler de diversité fonctionnelle (Tilman 2001). Il existe différentes composantes de la diversité fonctionnelle : l'identité fonctionnelle correspond à la valeur moyenne du trait des individus d'une communauté, la richesse fonctionnelle correspond à la gamme de valeur de traits, la divergence, régularité et dispersion, s'intéresse à la répartition de l'abondance des espèces dans la gamme de valeur de traits (Mason et al. 2005, Laliberté et al. 2014).

Les indices de la diversité fonctionnelle sont liés aux fonctions et services des écosystèmes et ils permettent aussi d'identifier les impacts du climat et des pratiques sur la végétation (McGill et al. 2006). De plus, de nombreuses études ont montré des liens entre indices de diversité fonctionnelle et des fonctions des écosystèmes (de Bello et al. 2010)

Les traits fonctionnels peuvent être mesurés directement sur le terrain mais aussi peuvent être extraits dans des bases de données de traits. En effet, les données collectées par de nombreuses équipes ont été regroupées dans des bases de données collectives (Kattge et al. 2011, Kattge et al. 2020) Ces données de traits peuvent être extraites de ces bases de traits et combinées avec des relevés botaniques (liste d'espèces et abondances). Cette approche permet de réutiliser des bases de données et d'avoir des approches plus globales.

Le « numérique »

De nombreux travaux que j'ai portés reposent sur l'utilisation du « Numérique ».Le numérique est un terme générique qui désigne l'ensemble des processus liés à du calcul numérique. On parle aussi de révolution numérique.

On peut voir différent aspects de la révolution numérique :

- L'augmentation de la puissance du calcul numérique. Cette augmentation permet de faciliter les analyses de données y compris des techniques nouvelles de fouilles de données (Breiman et al. 1984, Breiman 2001). Elle permet aussi de mettre en place de modèles numériques de plus en plus complexes sur des échelles de plus en plus fines (Jahel et al. 2019, Metcalfe et al. 2020, Van Oijen et al. 2020).
- La miniaturisation et la diminution du coût de nombreux capteurs. Par exemple, les images satellites deviennent de plus en plus précises et de plus en plus fréquentes avec un coût moins important (Reiner et al. 2023) (Reiner et al. 2023). Les drones sont aussi

de moins en moins chers et de plus en plus précis et simples d'utilisation (Grenzdörffer et al. 2008).

- L'augmentation de la communication en particulier via Internet. Elle permet maintenant le stockage et le partage de nombreuses données. Il existe maintenant des bases de données regroupant des milliards d'occurrences des espèces sur Terre (<https://www.gbif.org>) ou des milliers de données de traits fonctionnels (<https://www.try-db.org/>). Cette connectivité permet aussi la mise en place d'observatoires participatifs via des applications (Goëau et al. 2014, Bonnet et al. 2020).

Bien sûr, ces trois aspects sont le plus souvent liés. Les outils numériques permettent de faciliter de nombreuses recherches et permettent aussi de répondre à de nouvelles questions.

Présentation de mes questions de recherches

Ma question de recherche principale porte sur la compréhension des impacts de pratiques et du climat sur les communautés végétales des pâturages. Mon objectif était le plus souvent d'identifier des variables liées aux services écosystémiques rendus par les pâturages. Le but étant de pouvoir prédire les impacts du changement climatique et de proposer des pratiques agroécologiques de gestion de ces pâturages pour maximiser les services rendus.

Mes activités se sont orientées autour de 3 grandes axes de recherches qui structurent la présentation de mes activités de recherches.

Les impacts du climat et des pratiques sur la diversité de traits fonctionnels à l'origine des services écosystémiques. Une de mes hypothèses pour identifier les interactions était qu'il était nécessaire d'avoir de larges bases de données couvrant de larges gradient. Pour cela, il était nécessaire d'avoir recours à des données déjà existantes. Je me suis particulièrement intéressé à la réutilisation des bases de données de relevés botaniques et à la manière de les remobiliser pour comprendre les changements de provision de services écosystémiques.

La seconde partie de mon travail regroupe un ensemble de travaux de terrain qui m'ont permis de combler les manques de connaissances via des approches par les bases de données de relevés botaniques. En effet, les relevés botaniques ne permettent pas d'étudier les dynamiques à court terme de la végétation tels que les changements phénologiques pour les herbacées et recrutements de nouveau individus pour les ligneux..

Pour finir, la troisième partie a porté sur la mise en place de méthodologies de suivi indirect de la végétation des pâturages. L'hypothèse étant que la mise en place de ces outils pourrait permettre d'alléger les mesures de terrains mais aussi que ces approches spatialisées permettent d'explorer de nouvelles questions.

Impacts du climat et des pratiques sur la diversité de traits fonctionnels à l'origine des services écosystémiques à partir de données historiques.



Crédit Simon Taugourdeau (Madagascar , Normandie et Sénégal)

Une partie importante de mes travaux a reposé sur l'utilisation de données déjà collectés de relevés botaniques et de traits fonctionnels. L'objectif est de les croiser pour pouvoir calculer des indices de diversité fonctionnelles. Cependant, l'utilisation de base de traits fonctionnels induit des biais en comparaison de mesures de traits sur le terrain :

Quantification des biais dans le calcul de diversité fonctionnelle à partir de bases de traits.

Une de mes questions de recherche a porté sur la quantification de biais lorsque l'on utilise des données de traits issues des bases de données.

Mes études ont porté sur 3 biais différentes :

- Sur les données manquantes et l'impact de l'utilisation de méthodes d'imputation (technique pour remplacer les données manquantes).
- Sur l'impact de la variation des traits au sein de l'espèce, on n'utilise en effet généralement que la valeur moyenne du trait dans la base de données.
- Sur la suppression des espèces peu abondantes qui ne sont pas forcément renseignées dans les bases de traits.

L'analyse sur les données manquantes a fait l'objet d'une publication (Taugourdeau et al., 2014[AI3]). Les autres études ne sont présentées que dans mon manuscrit de thèse[Rd3] malgré plusieurs soumissions de l'étude sur la variabilité intraspécifique.

Dans le cadre de cette étude sur les données manquantes, deux méthodes pour remplacer les données manquantes reposant sur des concepts d'écologie ont été développées. Une reposant sur le fait que les traits fonctionnels sont le plus souvent liés entre eux (création d'un modèle entre les traits qui est ensuite appliqué pour prédire les données manquantes) et une autre reposant sur le principe que des espèces ont souvent des ensembles de valeur de traits proches (la donnée manquante est remplacée par la valeur moyenne des espèces proches).

Pour tester ces méthodes, nous avons créé des jeux de données avec des pourcentages de données manquantes plus ou moins importants et corrigé les données manquantes avec ces différentes méthodes. Nous avons montré que les indices des diversités fonctionnelles étaient toujours liés entre eux avec 30% de données manquantes ; après, l'effet de données manquantes était trop important(Figure 4).

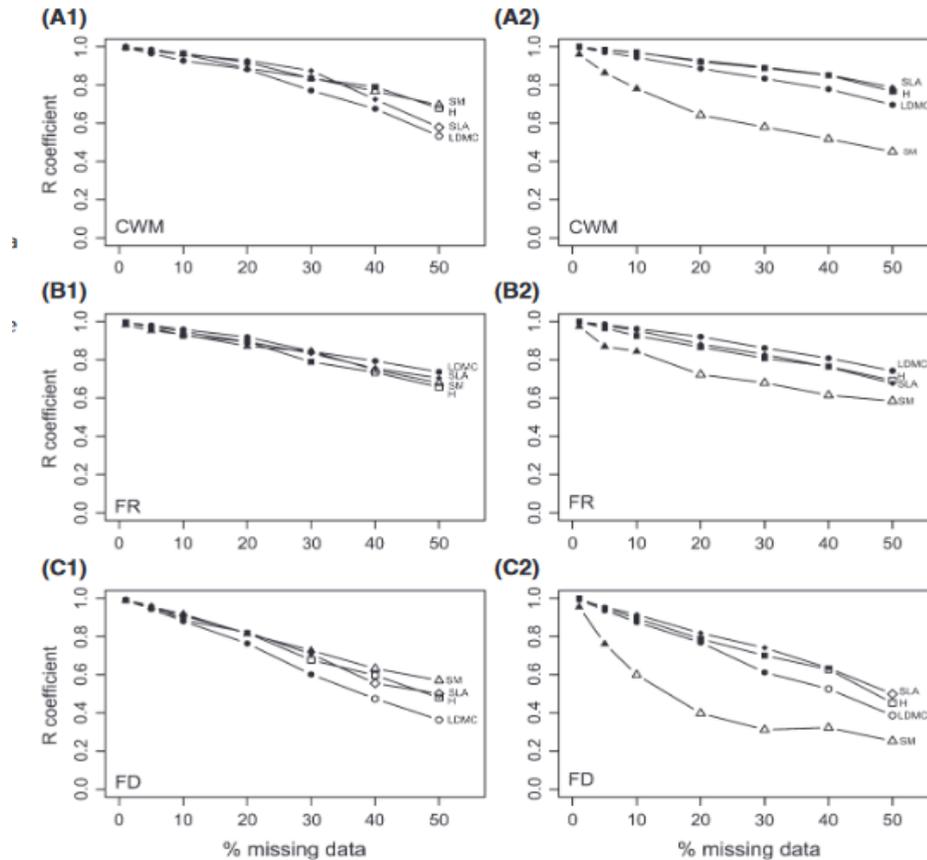


Figure 4: Effet du pourcentage de données manquantes sur le coefficient de corrélation de Pearson entre les indices calculés sans donnée manquante et avec des données manquantes corrigées par une des méthodes d'imputation. Sur l'identité fonctionnelle (CWM) avec la méthode des relations A1 et la méthode de la distance A2; sur la richesse fonctionnelle (FR) avec la méthode des relations B1 et la méthode de la distance B2 et sur la divergence fonctionnelle (FD) avec la méthode des relations C1 et la méthode de la distance C2. Le format des points représente le trait fonctionnel (triangle pour la masse des graines SM, diamant pour le SLA, cercle pour la teneur en matière sèche (LDMC) et carré la hauteur végétative (H)). Les symboles pleins correspondent aux situations où la corrélation était significative et les symboles correspond à la situation avec une corrélation qui n'est plus significative. Source Taugourdeau et al. (2014)[AI3].

Pour les autres biais, une méthodologie similaire de comparaison avait été utilisée. Ces travaux m'ont permis d'estimer les biais dans le calcul des indices de diversité fonctionnelle.

Impact des pratiques et du climat sur les indices de diversité fonctionnelle

L'un des enjeux de l'utilisation des bases de données historique est de pouvoir les utiliser pour appréhender l'impact croisé des pratiques et des variables du climat.

Dans le cadre de ma thèse [Rd3], j'ai ensuite effectué des analyses pour identifier l'impact des pratiques et du climat sur un jeu de données issu de la combinaison de trois jeux de données de France (Michaud et al. 2012, Plantureux et al. 2012) et de Suisse (Peter et al. 2008, Peter et al. 2009). Un des premiers enjeux était d'harmoniser les pratiques de gestion en particulier sur comment comparer la fauche et le pâturage pour définir un indice d'utilisation/défoliation. En se reposant sur un jeu de données croisant le chargement et le taux de couverture herbacée qui est consommée, nous avons établi un modèle permettant de prédire le pourcentage d'herbacées mangées en fonction du chargement. Pour la fauche, nous avons supposé que 100% des herbacées étaient impactées. Ce travail nous a permis de créer un indice d'utilisation de l'herbe (Taugourdeau et al. 2013 EGF, [CI5]), qui correspond à la somme des pourcentages du taux de couverture des herbacées défoliées au courant de l'année .

Le second enjeu était de bien prendre en compte les interactions entre le climat et les pratiques de gestion. Nous sommes partis sur l'hypothèse que l'impact des pratiques varie selon le climat. Nous avons donc supposé la possibilité d'avoir des effets locaux. (Une pratique qui n'a d'influence que dans certaines conditions climatiques.) Pour cela, j'ai utilisé des analyses qui reposent sur des arbres de régressions (Breiman et al. 1984) qui permettent de prendre en compte cet effet local. La figure 5 présente les résultats pour le nombre d'espèces, la valeur moyenne des dates de floraison, du SLA et du LNC. Pour le nombre d'espèces et le SLA, la plus faible valeur était définie uniquement par des variables du climat. En effet, pour les prairies de plaine dans ce jeu de données, aucune variable de pratique n'expliquait la variance du nombre d'espèces. De manière similaire, le trait moyen du SLA n'était pas influencé par des pratiques. A l'opposé, dans les prairies d'altitudes, les pratiques de défoliation et de fertilisation avaient un impact sur les différentes variétés de la végétation.

Pour évaluer la qualité du lien, j'ai utilisé une random forest (Breiman 2001) pour évaluer le pourcentage de variance des indices de biodiversité expliqué par les variables de climat et de pratiques. La variance du nombre d'espèces était expliquée à 61% par les variables décrivant le climat et les pratiques, les valeurs moyennes de traits étaient expliquées à environ 40 % pour le SLA, le LNC (teneur en azote foliaire) et OFL (date de floraison).

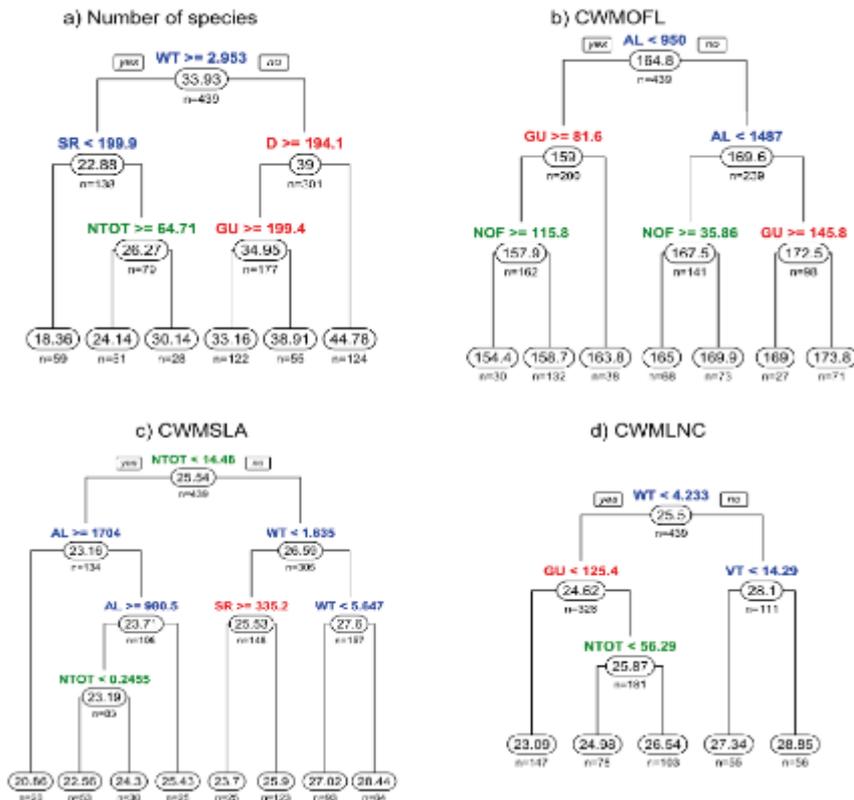


Figure 5: Arbres de régression sur les variables de diversité à partir des pratiques et du climat
a) Arbre pour la richesse spécifique calculé à partir de la pluie d'été (SR), la température d'hiver (WT), l'indice de perturbation (D), l'indice d'utilisation des prairies (GU) et l'apport en azote sur l'année (NTOT). b) Arbre pour le trait agrégé de la date de floraison (CWM OFL) calculé à partir de l'Altitude (AL), l'indice d'utilisation (GU) et l'apport en azote organique (NOF). c) Arbre pour le trait agrégé du SLA (CWMSLA) calculé à partir de l'Altitude (AL), la pluie d'été (SR), la température d'hiver (WT) et l'apport en azote sur l'année (NTOT). d) Arbre pour le trait agrégé de la teneur en azote (CWMLNC) calculé à la température d'hiver (WT), la température pendant la saison de végétation (VT) l'indice d'utilisation (GU) et l'apport en azote sur l'année (NTOT). La valeur dans le cercle correspond à la moyenne pour la catégorie et le n correspond au nombre de parcelles dans chaque catégorie. source [Taugourdeau \(2014\)\[RD3\]](#)

Par la suite, j'ai aussi étudié l'impact du climat et des pratiques sur la diversité fonctionnelle des prairies boréales en Norvège (Wehn et al., 2017, [Ai5]), du climat sur la composition botanique des ligneux au Sahel (Dendoncker et al., 2020 [Ai9]) et leurs diversités fonctionnelles (Dendoncker et al ; 2023 [Ai18]).

Pour nombre de ces études, la justification des variables de diversité fonctionnelle étudiées reposait sur leur lien avec des services écosystémiques rendus par les pâturages.

Création d'indicateur de Services écosystémiques à partir de données historiques

Dans le cadre du projet PESI [Ppo8], des indicateurs de services écosystémiques ont été développés. Ces indicateurs reposent sur un outil d'analyse multicritère TATALE (Taugourdeau et Messad 2017[NI]). Différentes variables, y compris de diversité fonctionnelle calculée à partir d'un relevé botanique des pâturages, sont successivement agrégées pour donner des scores (entre 0 et 1) évaluant la provision en services. Ces indicateurs ont été développés dans

ce projet pour 6 services écosystémiques (production de fourrage, flexibilité de la production, conservation de la biodiversité, robustesse des communautés aux aléas, pollinisation et disponibilité en azote). Un site internet www.pesi.cirad.fr a été créé pour présenter ces indicateurs (Taugourdeau et al., 2023 [Ai21]). La figure 6 présente l'indicateur pour la conservation de la biodiversité.

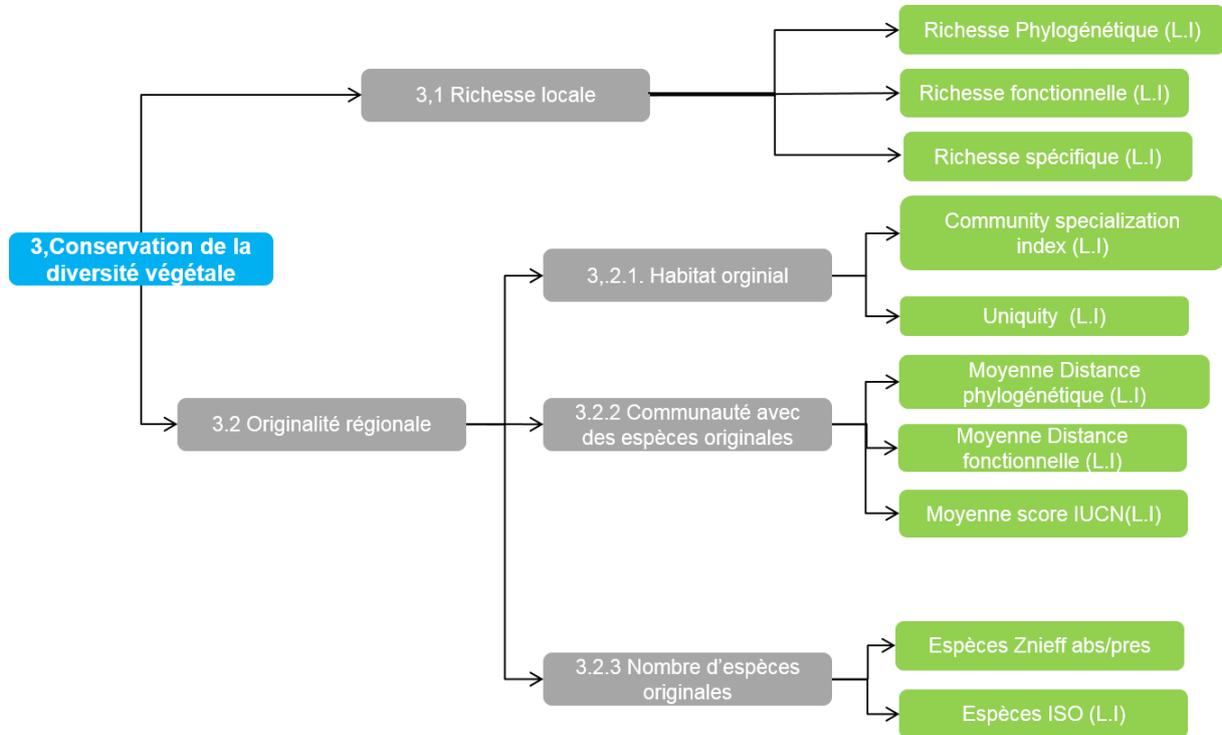


Figure 6 Exemple de l'indicateur de la conservation de la biodiversité. Le score de conservation est obtenu par l'agrégation du score liée à la richesse locale et du score liée à l'originalité régionale du relevé. Ce dernier étant issu lui-même d'un agrégation de trois scores intermédiaires sont issus de l'agrégation de différentes variables de végétation (en vert). Ces variables de végétation ont d'abord été normalisées en score entre 0 et 1.

Tous les choix permettant de développer ces indicateurs sont issus d'un atelier de travail réunissant 20 chercheurs dans le domaine, complété par des études bibliographiques.

Dans le cadre du stage de Lisa Poisse [Em12], certains scores (pour la pollinisation ou pour le fourrage) ont été validés avec des mesures de services. L'intérêt principal de ces indicateurs est de pouvoir être utilisés sur des données historiques. La figure 6 présentent les variations temporelles de 2000 relevés de prairies dans l'est de la France

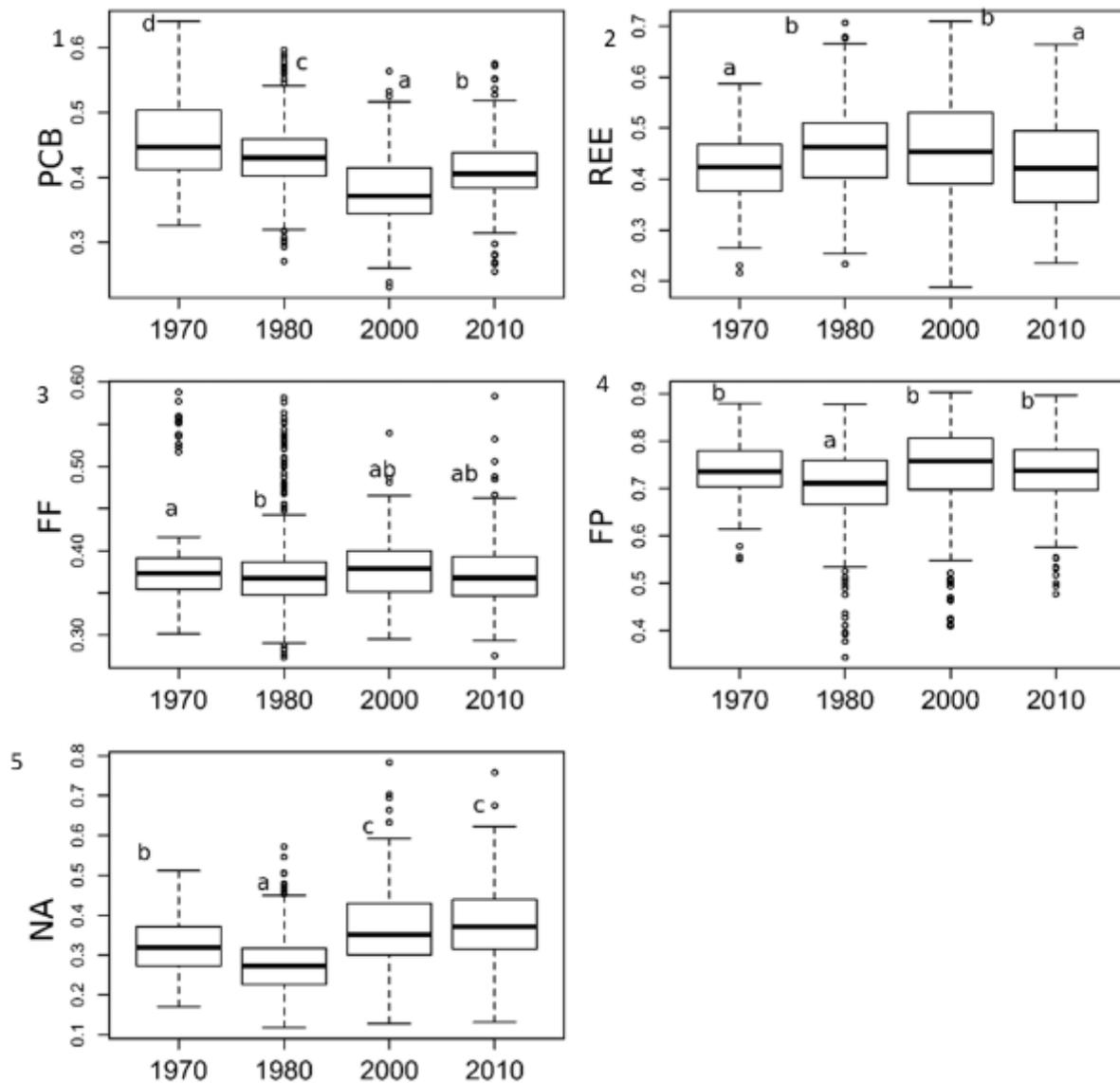


Figure 7: Dynamique des services écosystémiques dans l'est de la France entre 1970 et 2010 (PCB conservation de la biodiversité, REE robustesse à des événements extrêmes, FF souplesse d'exploitation, FP production en fourrage et NA disponibilité en azote). Source Taugourdeau et al., 2023 [Ai21]).

Ces indicateurs montrent des diminution des scores du services conservation de la biodiversité et au contraire un recyclage plus important de l'azote.

Des travaux similaires ont porté sur les services rendus par les prairies boréales (Johansen et al., 2019 [Ai7]), les ligneux au Sahel (Dendoncker et al. 2017, [Ca4]) et sur le lien entre arthropodes et flore des prairies (Dumont et al, 2022 [Ai12]).

Dans tous ces travaux, les services écosystémiques ont été définis par les équipes de recherche. Dans le cadre de la thèse d'Annaël Barnes [Td2], les services écosystémiques d'importance ont d'abord été définis par les acteurs locaux au Kazakhstan (Barnes et al 2023, [Ai16]). Les données existantes n'étaient pas suffisantes pour se reposer sur des expertises. Dans sa thèse, des mesures de terrain pour quantifier les services ont été effectuées. L'objectif était de voir la contribution des arbustes au services écosystémiques de ces zones arides. Au Sénégal, des

travaux similaires ont montré l'importance des arbres pour le processus des sols dans les pâturages de savanes (N'Goran et al 2022., [AC7]) .

Synthèse et commentaires sur l'usage des données historiques pour l'étude de la diversité fonctionnelles et des services écosystémiques des pâturages

Ces travaux ont montré l'intérêt de remobiliser des données historiques, que ça soit pour comprendre les variations de la diversité fonctionnelle ou des services écosystémiques.

J'ai aussi contribué à la mise en ligne de données en particulier de la base FLOTROP qui a permis de mettre en ligne plus de 300 000 observations botaniques issues de 37 000 relevés botaniques au Sahel(Taugourdeau et al., 2019 [Ai6]). Nous avons aussi contribué à la base TRY (Kattge et al., 2020 Ai8).

Sur les données historiques, des travaux ont aussi porté sur les herbiers. Les herbiers peuvent être une source intéressante pour mesurer des traits fonctionnels (Taugourdeau et al., 2017 [Ca1]) . Les herbiers peuvent par exemple permettre d'évaluer la variation de la surface foliaire avec les changements de pluviométrie sur plusieurs dizaines d'années (Taugourdeau et Huguenin, 2022 [Co1]). Pour avoir des traits plus chimiques, des tests de l'utilisation de la spectrométrie en proche infrarouge (SPIR) ont été initiés dans le cadre du Projet THS[Ppo3] et du stage de Mia Svensk [Em9]. Des travaux sont en cours sur l'utilisation de ces approches pour l'étude des traits fonctionnels des espèces ligneuses africaines.

Les utilisations des données historiques ont de nombreuses limites en particulier sur les terrains au Sahel et en zones arides plus globalement.

- Les services ne sont pas explicables uniquement par des critères de biodiversité. En effet, la végétation peut être décrite par d'autres variables comme la biomasse, l'indice foliaire, le taux de couverture ligneuse et arborée, etc
- Dans les zones pastorales dans les pâturages collectifs, il est difficile de quantifier aisément les impacts des pratiques de l'élevage. Pour ces zones, l'impact du pâturage est souvent défini par une distance au point d'eau. Cependant, en particulier durant la saison de croissance/ saisons des pluies, de nombreux points d'eau temporaires peuvent apparaître et donc l'intensité de pâturages n'est pas définie en fonction des points d'eau permanents. De plus, il est parfois difficile de localiser les points d'eau et les campements. Ceci en particulier sur les données historiques. Les données historiques comme les données de FLOTROP, y compris les données du climat, sont difficiles à obtenir sur des temps de long terme. Contrairement à mes travaux de thèse, il est donc très compliqué d'avoir des données disponibles pour le Sahel pour faire des analyses croisées du climat et des pratiques.
- Les relevés botaniques ne sont souvent réalisés qu'une seule fois dans la saison (par exemple au Sahel uniquement à la fin de la saison des pluies). De manière similaire, les traits fonctionnels sont souvent mesurés une seule fois dans la saison. Cependant, la dynamique en cours de saison en particulier pour les espèces annuelles est un paramètre important à prendre en compte dans les impacts des pratiques et du climat.

Pour ces différentes raisons, il était nécessaire d'effectuer des travaux de terrain sur la végétation au Sahel et plus largement les zones arides pour affiner les connaissances et les données existantes.

Etude des dynamiques de la végétation au Sahel durant la saison des pluies



Crédit Simon Taugourdeau Sénégal

Le Sahel est marqué par une saison des pluies courtes (entre Juillet et Octobre) et une saison sèche le reste de l'année. C'est durant cette période que les processus écologiques de la végétation ont principalement lieu. Une partie importante de mes activités a porté sur la compréhension de la dynamique de la végétation herbacée et pérenne.

Comprendre les dynamique des herbacées au cours de la saison des pluies.

Les précipitations durant la saison des pluies sont très variables que ça soit la quantité mais aussi sur la répartition avec des saisons avec des démarrages plus ou moins précoces ou des durées de plus ou moins courtes et d'éventuelles pauses (plusieurs semaines sans pluies). Une des questions de recherche était de comprendre comment ces variations de pluies impactent le couvert herbacé.

Au niveau de la station expérimentale du CRZ de Dahra Djoloff dans le Nord Sénégal, un dispositif d'observation de suivi des écosystèmes (Tour à flux) est en place depuis le début des années 2000 (Tagesson et al. 2015). En repartant de leur données et en continuant leur mesures dans le cadre de la thèse d'Ousmane Diatta [Td1], nous disposons de 11 ans de mesures de biomasse avec des mesures tous les 10 jours durant les saisons des pluies (Figure 8). Une analyse croisée avec les données de précipitations a montré que la quantité de pluie totale explique la biomasse maximum de la saison. Cependant la relation était meilleure lorsqu'on ne prenait compte que la quantité de pluie entre le début de la saison et la date où le maximum de biomasse est obtenu (Diatta et al. 2021, [AC6]). Cela laisse suggérer que les pluies arrivent après le maximum de biomasse (généralement obtenu mi-septembre). La date du pic de biomasse ne semble pas être influencée par le régime des pluies.

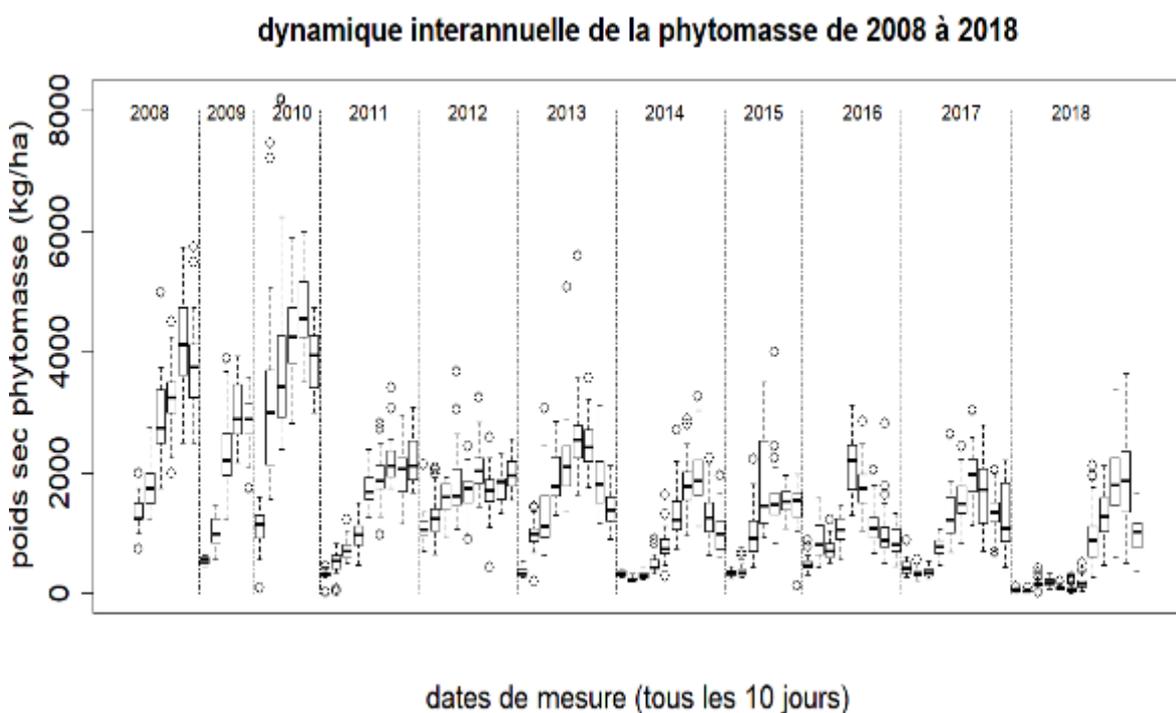


Figure 8: Dynamique interannuelle de la phytomasse herbacée de 2008 à 2018 à Dahra Djoloff. Les box plot représentent la distribution de mesures de biomasses effectuées à une date. source (Diatta et al. 2021, [AC6])

Pour compléter ces approches de biomasse, nous avons effectué des suivis de phénologie (Diatta et al ;2023 [AC10]) qui ont montré une très forte synchronisation entre toutes les espèces. Le déclenchement de la floraison est sans doute induit par un changement de photopériode. La période est donc similaire pour les différentes années. Ces travaux montrent que les pluies tardives ne sont pas utiles pour les herbacées au Sahel .

Sur cette dynamique, il était aussi nécessaire de voir l'impact des pratiques de gestion sur la végétation. Dans le cadre d'une comparaison entre une parcelle pâturée et une mise en défens durant la saison des pluies, nous avons remarqué peu de différence de biomasse entre les deux sites sur deux années de suivi (Diatta et al, 2023[AC11]). Dans les situations avec des différences, le site pâturé avait parfois un peu moins de biomasse que le site mise en défens. Cependant, la végétation du site pâturée avait un pourcentage d'individus au stade végétatif plus important en fin de saison que le site mise en défens (Diatta et al ;2023 [AC10]).

Ce résultat sur l'impact négatif des défoliations sur la biomasse sur pied en fin d'année et sur le retard sur la fructification et la sénescence est aussi confirmé par une autre expérimentation conduite au niveau du CRZ.de Dahra Djoloff. Pendant toute une saison des pluies, chaque semaine, 9 carrés (3 sur 3 parcelles) ont été fauchés intégralement. L'emplacement des carrés changeait à chaque coupe . Ce qui permet d'avoir un gradient de date de fauche. A la fin de la saison, des mesures ont été effectuées sur l'ensemble des carrés.

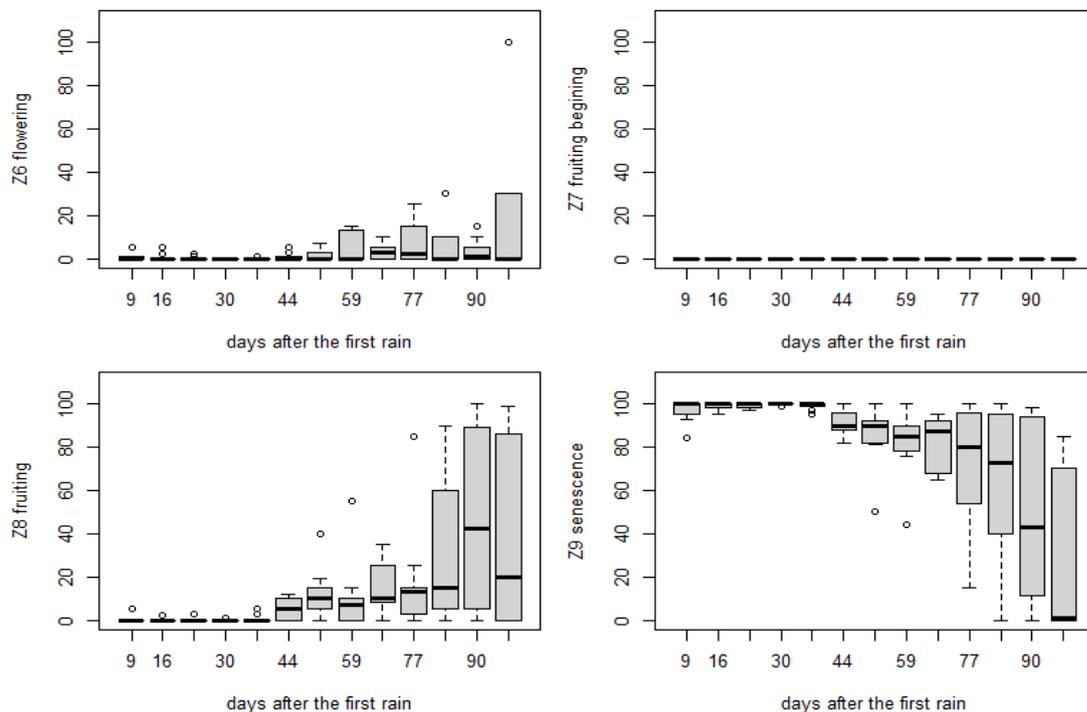


Figure 9: Pourcentage des différents stades de Zadok (stade phénologique) en fonction de la date de la fauche exprimée en jours après la première pluie. (Z6 Floraison , Z7 début fructification , Z8 fructification Z9 senescence)

Les sites fauchés le plus tardivement avaient des plantes encore en floraison alors que les carrés fauchés en début de saison étaient déjà tous sénescents. Cependant, les plantes dans les carrés fauché tardivement avaient des hauteurs beaucoup plus faibles tout en étant au stade floraison/fructification.

La phénologie est un paramètre important car elle est liée à la qualité nutritive des fourrages ; En effet, les individus plus jeunes ont une meilleure digestibilité que les individus en fin de croissance. Les parcelles pâturées ou fauchées ont une meilleure qualité fourragère (Diatta et al, 2023[AC11]). Il est intéressant de noter que cette différence se conservait encore durant la saison sèche sur la paille. La paille issues de plantes défoliées en saison des pluies aurait des meilleurs paramètres nutritifs que la paille de zones mises en défens.

Dans un autre essai, en condition plus contrôlée avec un dispositif d'exclusion des pluies et d'irrigation dans le cadre de la thèse d'Ange N'Goran [Td3], différentes pratiques ont été testées (fauche, irrigation et fertilisation). Pour la fauche, deux dates (fin juillet et début septembre) ont été implémentées (N'Goran et al., [AC13]). La quantité de biomasse produite sur l'année (la quantité fauchée en cours de saison plus la quantité à la fin de saison) étaient similaires sur les différents traitements. Cependant, lorsque l'on s'intéresse à la quantité de cette biomasse que l'animal pouvait utiliser pour son métabolisme (quantité *digestibilité). les différences étaient très marquées avec une quantité disponible plus importante pour les animaux dans les zones fauchées précocement.

Ces travaux ont montré que les pratiques de gestion en particulier de défoliation ont un impact sur la végétation herbacée. Elles diminuent la quantité de biomasse sur pied en fin de saison (mais pas la quantité produite sur l'année) mais permettent de retarder la fin de croissance et d'avoir de l'herbe de meilleure qualité. Il serait intéressant de réfléchir à des modes de gestion permettant d'exploiter ces résultats (fauche et stockage, pâturage rotatif en saison des pluies). Mais il faut aussi voir les impacts sur les stock de semence et la régénération des espèces. Un des intérêts d'avoir une quantité de biomasse sur pied plus faible est d'éventuellement réduire les compétitions entre les herbacées avec les plantules des arbres, par exemple dans le cadre de plantations..

Régénération des ligneux

La régénération des ligneux est un élément important pour la maintenance des écosystèmes de savanes. En effet, ces arbres ont des rôles multiples et rendent de nombreux services (Cesaro et al., [AI20]). Leur dynamique temporelle est cependant un enjeu fort avec des densités qui restent faibles (Dendoncker et al 2020, [AI 9]). Il est important de comprendre comment ces arbres se régénèrent et l'impact potentiel de différentes pratiques. Nous avons mesuré la régénération (plantules et jeunes plants) dans trois types d'occupations du sol : pâturage libre, parcelle de la grande muraille verte avec plantation de *Senegalia senegalensis* et une zone de pâturage semi-contrôlée issu d'une expérimentation (Miehe et al. 2010). Sur certains de ces sites nous disposons aussi de mesures plus anciennes, ce qui nous a permis de voir l'aspect temporel.

La figure 10 présente les variations de densité et de richesse spécifique des plantules et des jeunes plants en fonction des modes de gestion et de la topographie. Nous n'avons pas trouvé de différences entre les différents modes de gestion et un effet fort de la topographie avec plus de régénérations dans les dépressions. Ceci montre l'importance des dépressions pour les ligneux.

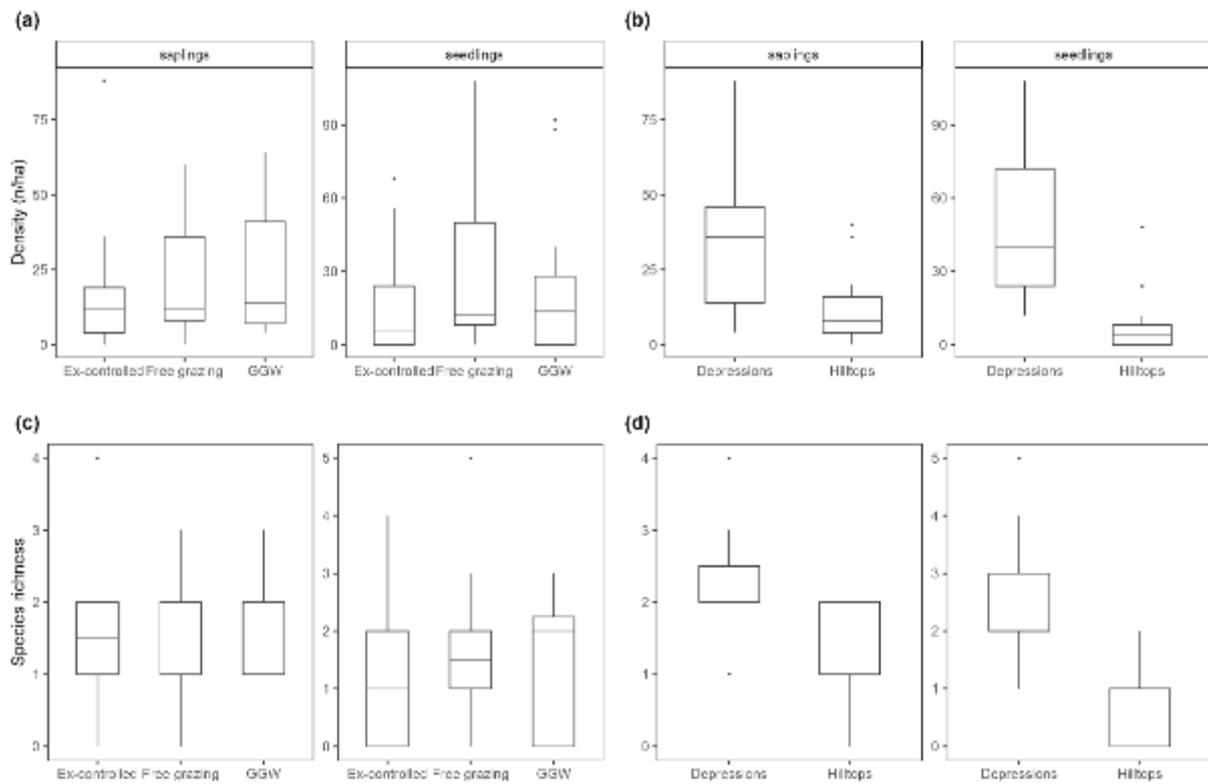


Figure 10: Densité moyenne (a et b) et richesse spécifique (c-d) pour les plantules et les jeunes plants en fonctions des pratiques (Grande muraille verte, pâturage libre et pâturage ancien contrôlé) et la topographie. Dendoncker et al., [AI25]

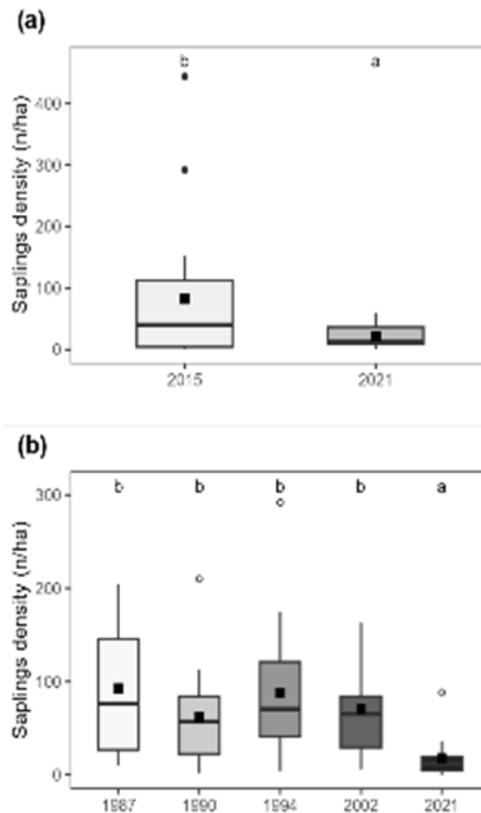


Figure 11: Evolutions de la densité de jeunes plants a) entre 2015-2021 pour des sites en pâturage libres b) entre 1987 et 2021 dans les sites avec un pâturages anciennement contrôlé (jusqu'en 2017) *Dendoncker et al., [AI25]*

La figure 11 présente l'aspect temporel. On note sur les deux jeux de données une forte diminution des régénérations. Cela indique un problème de résilience des communautés arborées et montre que les pratiques actuelles n'ont pas forcément d'impact sur la régénération des arbres.

Ce travail a montré l'importance des zones de dépressions topographiques qui représentent une faible surface mais qui regroupent la plus grande densité d'arbres (et de plantules) mais aussi de la diversité des arbres. Nous avons mené une étude pour mieux comprendre les déterminants de la diversité des dépressions topographiques en particulier leur surface (*Dendoncker et al. 2023 ; [Ai 15]*). Ces travaux montrent que certaines dépressions de petites tailles peuvent être très diversifiées, résultant sans doute de processus stochastiques.

Synthèse sur les études de la dynamique de la végétation

Les travaux conduits au Sénégal montrent l'importance des études phénologiques et des suivis en cours de saison qui permettent de mieux appréhender les impacts de pratiques sur la végétation. Il est important de réfléchir à la temporalité de l'utilisation des herbacées annuelles pour maximiser leur valeur fourragère.

Pour la régénération des ligneux, nous avons montré que les pratiques de plantation et de pâturages contrôlés n'avaient pas d'impact sur la régénération. Il faut cependant identifier des pratiques de gestions favorables aux régénérations, en particulier du pâturage en fonction de leur temporalité.

Ces travaux nécessitent cependant des mesures lourdes qui limitent la quantité de traitements qui peuvent être suivis. Dans le cadre de la thèse d'Ousmane Diatta, deux parcelles ont pu être suivies. En effet, du fait de la forte hétérogénéité spatiale, un nombre important de mesures devait être réalisé sur chaque parcelle. Au final, au niveau du CRZ, des collectes de données ont été réalisées de 2017 à 2022 pour la phénologie et de 2008 à 2023 pour des données de biomasse. Ces suivis de biomasse sont prévus dans le cadre du suivi au niveau de la tour à flux dans le futur.

Pour les ligneux, les mesures des plantules et des régénérations est aussi un travail important de terrain qui doit être effectué sur une période de temps court (entre le moment de la germination mais avant l'installation du couvert herbacé). Les inventaires des ligneux sont aussi très chronophages, en effet les ligneux en zones arides sont très éparses avec une forte hétérogénéité spatiale.

Il serait utile de disposer d'outils pour faciliter ces mesures de manière indirecte et de pouvoir augmenter le nombre d'acquisitions de données sur des situations plus contrastées.

Utilisation de la photogrammétrie pour le suivi de la végétation des zones arides.



Crédit Simon Taugourdeau Sénégal

La télédétection est utilisée pour évaluer des caractéristiques de la végétation en se reposant sur les réponses spectrales en particulier par des images satellites. De nombreux indices de végétation ont été proposés pour évaluer les caractéristiques. Vu l'étendue des parcours au Sahel, la télédétection permet de spatialiser la végétation sur des échelles permettant de quantifier la ressource pastorale à des échelles de gestion. Un des enjeux est d'avoir des données de références au sol représentatives de l'hétérogénéité spatiale des parcours. Ce travail de terrain dépend aussi de la résolution spatiale des images utilisées. Dans le cadre des suivis du Centre de Suivi Écologiques (CSE), les images utilisées ont une résolution spatiale de 1 km² et donc les mesures sur le terrain doivent être représentatives de cette échelle (Diouf et al. 2016, Diouf et al. 2017).

Plus récemment, on peut avoir des images de résolutions de plus en plus fines avec de nouvelles images satellite mais aussi avec l'apparition et la généralisation des aéronefs télépilotés (drones) qui permettent de produire des images à très haute résolution spatiale. De plus, les images drones sont produites avec des angles de vue différents et ces images peuvent être analysées avec de la photogrammétrie pour produire des modèles 3D.

L'approche par photogrammétrie peut aussi être utilisée directement via des appareils photographiques au sol. Dans un premier temps, l'objectif était de tester l'utilisation de ces outils (image satellite ou approche par photogrammétrie), pour l'étude des critères de végétation des zones sèches. Dans un second temps, utiliser ces outils pour répondre à de nouvelles questions scientifiques.

Suivi des ligneux par drone

Sur les zones de savanes, nous avons testé l'intérêt du drone en particulier Low Cost, en particulier des drones avec un capteur rouge vert bleu. Des tests de protocoles ont été effectués pour identifier le protocole de vols (altitude et taux de recouvrement) pour obtenir le meilleur rendu (Taugourdeau et al., 2019 [Rr2]).

Ces tests ont permis de mettre en place un protocole pour faire une première calibration, des images Drone ont été réalisées sur 35 sites de 1 ha dans le CRZ de Dahra (Bossoukpe et al. 2021 [AI10]). Les images ont été analysées en utilisant le logiciel PIX4Dmapper.

Les sorties étaient une orthomosaïque avec les différentes couleurs (rouge, vert et bleu) ainsi qu'un modèle de surface (altitude de chacun des points) et un modèle de terrain (estimation de l'altitude du sol). La différence entre le modèle de surface(DSM) et le modèle de terrain(DTM) est appelée modèle des hauteurs des couronnes (CHM)(Figure 12).

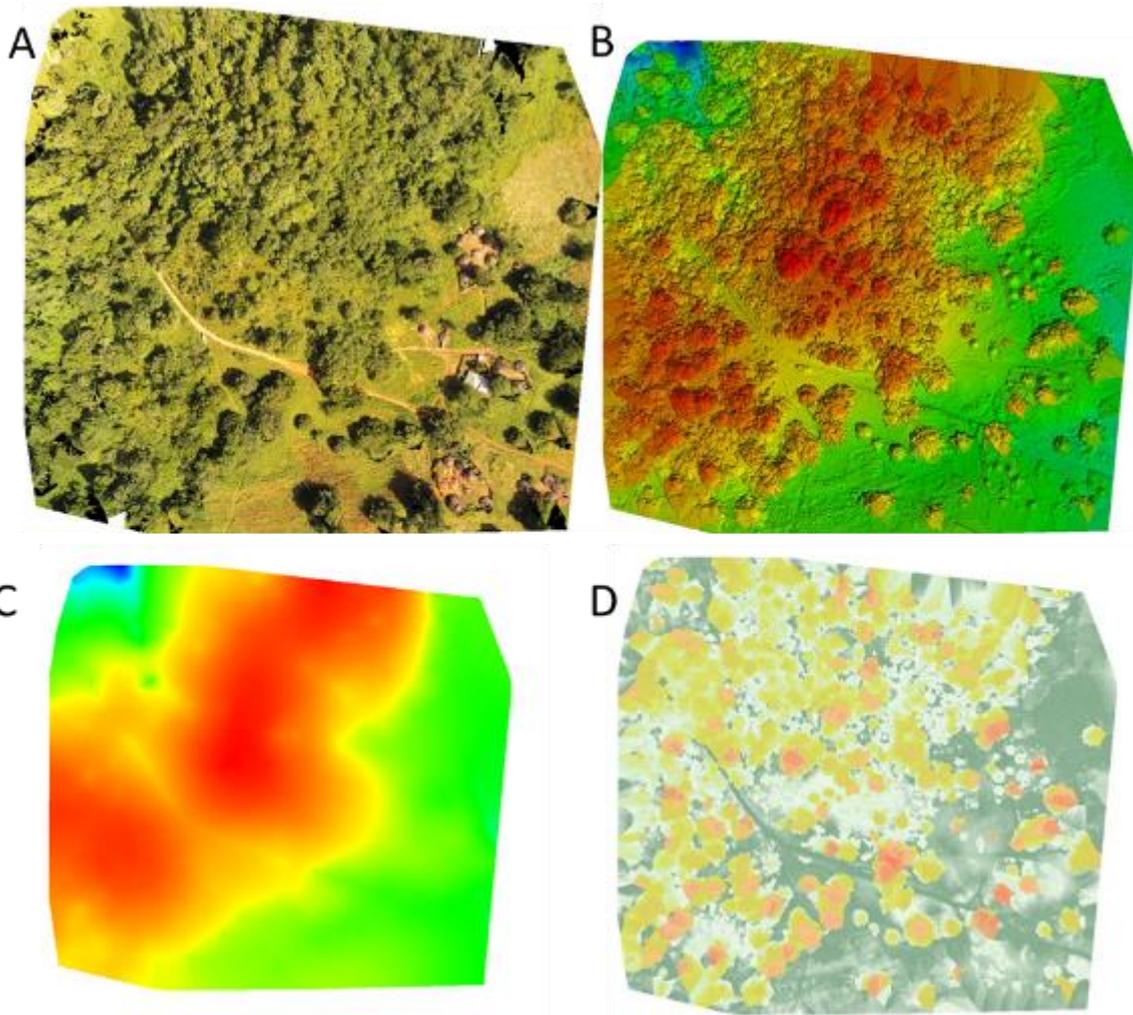


Figure 12: Exemple de sortie d'analyse en photogrammétrie issus de Drone A) orthomosaïque en Rouge vert bleu, B) modèle de surface (en rouge les pixels les plus élevés et en vert les plus bas), C) modèle de terrain (en rouge les pixels les plus élevés et en vert les plus bas) D) Modèle de couronne obtenu par la différence entre modèle de surface et modèle de terrain.

Sur chacun des sites, l'ensemble des arbres ont été identifiés et leur hauteur et surface extraites. Une typologie des arbres a été effectuée en fonction de ces mesures. 10 arbres ont été sélectionnés sur chaque site. En janvier 2019, 240 arbres ont été mesurés (hauteur, diamètre des couronnes et circonférence des troncs).

La hauteur de l'arbre et la surface des couronnes mesurées sont corrélées avec les mesures issues du drone (Figure 13)

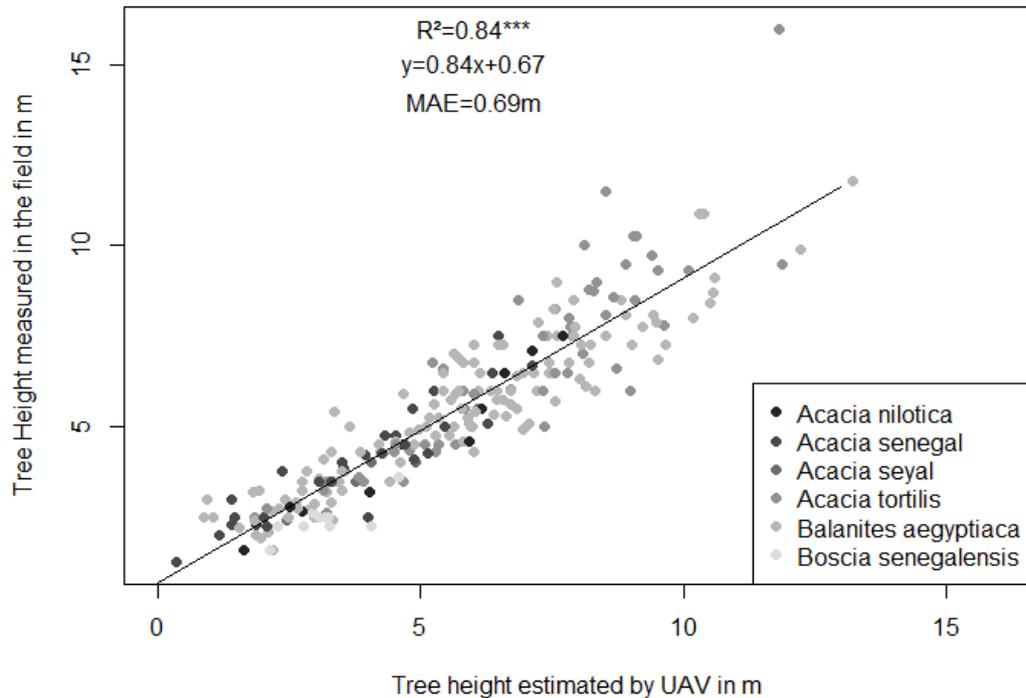


Figure 13: Corrélation entre la hauteur mesurée par drone et celle mesurée sur le terrain. Les différents niveaux de gris représentent les différentes espèces source *Bossoukpe et al. 2021 [AI10]*.

Nous avons trouvé les mêmes résultats pour la surface de la couronne ($R^2=0.93$). Pour la biomasse, nous avons utilisé des équations allométriques pour évaluer la biomasse des différents arbres. En plus des données issues de la 3D (hauteur max, hauteur moyenne, surface, ratio surface sur hauteur), nous avons utilisé des indices de végétation (Tableau 1). Nous avons trouvé un R^2 de 0.59 entre la biomasse ligneuses et foliaires avec des indices de drones (*Bossoukpe et al. 2021 [AC5]*) (Figure 14). Pour finir, ce jeu de données nous a aussi permis de tester la possibilité de prédire l'espèce à partir des données drones. Le jeu de données contenait 6 espèces de 3 genres différents (4 espèces d'*Acacia*). Nous utilisons l'algorithme de random forest pour prédire l'espèce. L'erreur de prédiction était de seulement 20%. Sur les 132 *Balanites aegyptiaca*, 124 étaient bien classées. Pour les 97 *Acacia*, 75 étaient correctement classifiés (*Bossoukpe et al. 2021 [AI10]*).

Tableau 1 : : Liste des indices de végétation utilisé

Acronym	Definition	Formula	Reference
NDGRI	Normalized Difference Green Red Index	$(R-G)/(R+G)$	(Lussem et al. 2019)
NDBRI	Normalized Difference Blue Red Index	$(B-R)/(B+R)$	
NDBGI	Normalized Difference Blue Green Index	$(B-G)/(B+G)$	
Vari	Visible Atmospheric Resistant Index	$(G-R)/(G+R-B)$	(McKinnon and Hoff 2017)
Exg	Excess of green	$G-0.39*R-0.61*B$	(Barbosa et al. 2019)
Gli	Green Leaf Index	$(2*G-R-B)/(2*G+R+B)$	(Barbosa et al. 2019)

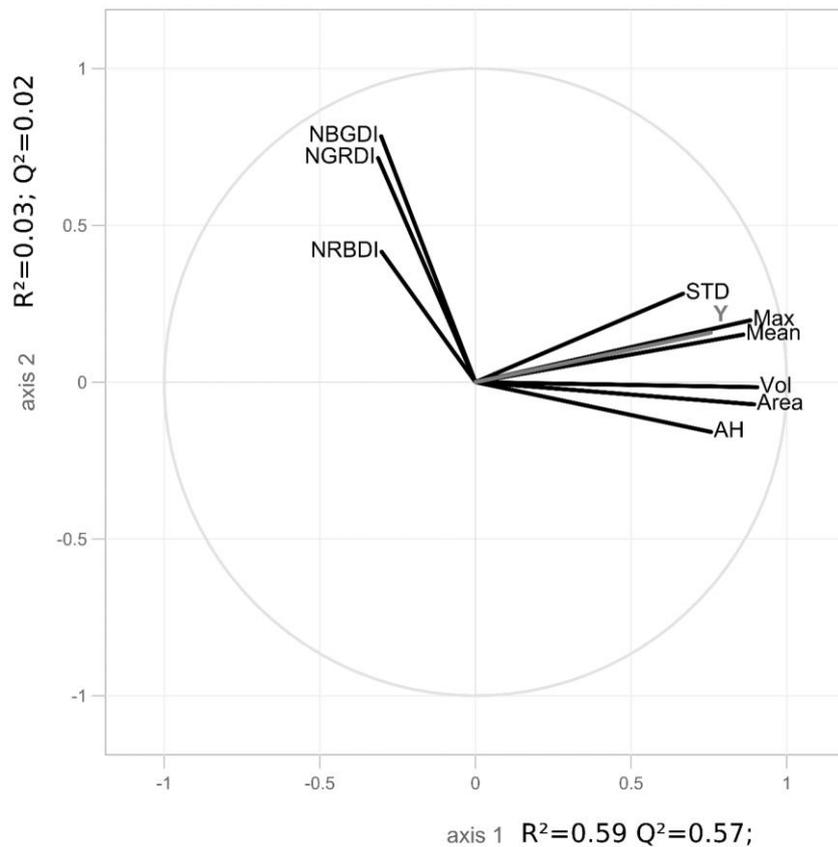


Figure 14: Régression PLS entre les variables du drone et la biomasse foliaire des arbres (Y). Le drone est la hauteur maximum de l'arbre (max), la hauteur moyenne (mean) et l'écart types des hauteurs (STD), le volume projeté (vol), la surface de la couronne (Area), le ratio entre la hauteur maximum et la surface de couronne et trois indices de végétation (NGRDI, NBGDI and NRBDI Tableau 1). Le R^2 de chaque axe est indiqué. Source (Bossoukpe et al. 2021 [AC5]).

Les outils drones permettent ainsi de faire des suivis des nombreux paramètres de la végétation ligneuse. D'autres campagnes de mesures ont été réalisées par la suite sur des gradients de végétations plus large avec des résultats similaires en termes de prédiction.

Les outils drones ont été par exemple remobilisés pour faire des cartographies des arbres pour étudier la répartition spatiale (Stage de Louise Sail [Em22]).

Evaluation de la biomasse herbacées

Pour les herbacées, en plus de l'utilisation des drones, nous avons aussi testé l'utilisation d'un appareil photographique avec une approche similaire de photogrammétrie. Une prise de vidéo a été effectuée à un mètre de hauteur avec un appareil photographique classique (voir exemple Figure 15).



Figure 15: exemple de modèle 3D des herbacées source *Bossoukpe et al. (2020)*[Ci16]

Sur les 35 mêmes sites au CRZ de Dahra que pour les ligneux, des données de biomasses herbacées ont été collectées sur 10 quadrats. Pour le premier quadrat, une vidéo avec une caméra a été prise: On avait donc un jeu de données à l'échelle de la station (paysage), des mesures durant la croissance de la végétation (2020 en drone et 2019 pour le suivi au sol) et une autre série de mesures sur le Nord et le Sud-Est du Sénégal(2020 pour les deux types de capteurs). Nous disposons ainsi de 6 jeux de données avec des mesures des herbacées et des images analysées en photogrammétrie. Nous avons utilisé un algorithme random forest entre les différents indices de végétation et les mesures de masse sèche. Nous avons effectué des modèles en mélangeant les 6 jeux de données ou pour drone et caméra au sol séparément, ou chacun des jeux de données séparément (*Taugourdeau et al. 2022*)[Ai13]. Nous avons trouvé des modèles avec des R^2 autour de 0.70 sur un jeu de données de validation (Figure 16). La différence entre les modèles réalisés avec les jeux de données combinées ou les jeux des données séparées restait faible, montrant que les données étaient comparables et que la création d'un modèle sur des jeux de données différentes pouvait être envisagée. Le drone permet d'avoir des approches spatialisées sur des échelles de plusieurs hectares permettant d'étudier des processus à ces approches. Au contraire, le drone est plus limité vu sa précision et sa résolution spatiale limitées ne permettant pas d'identifier les plantes individuellement.

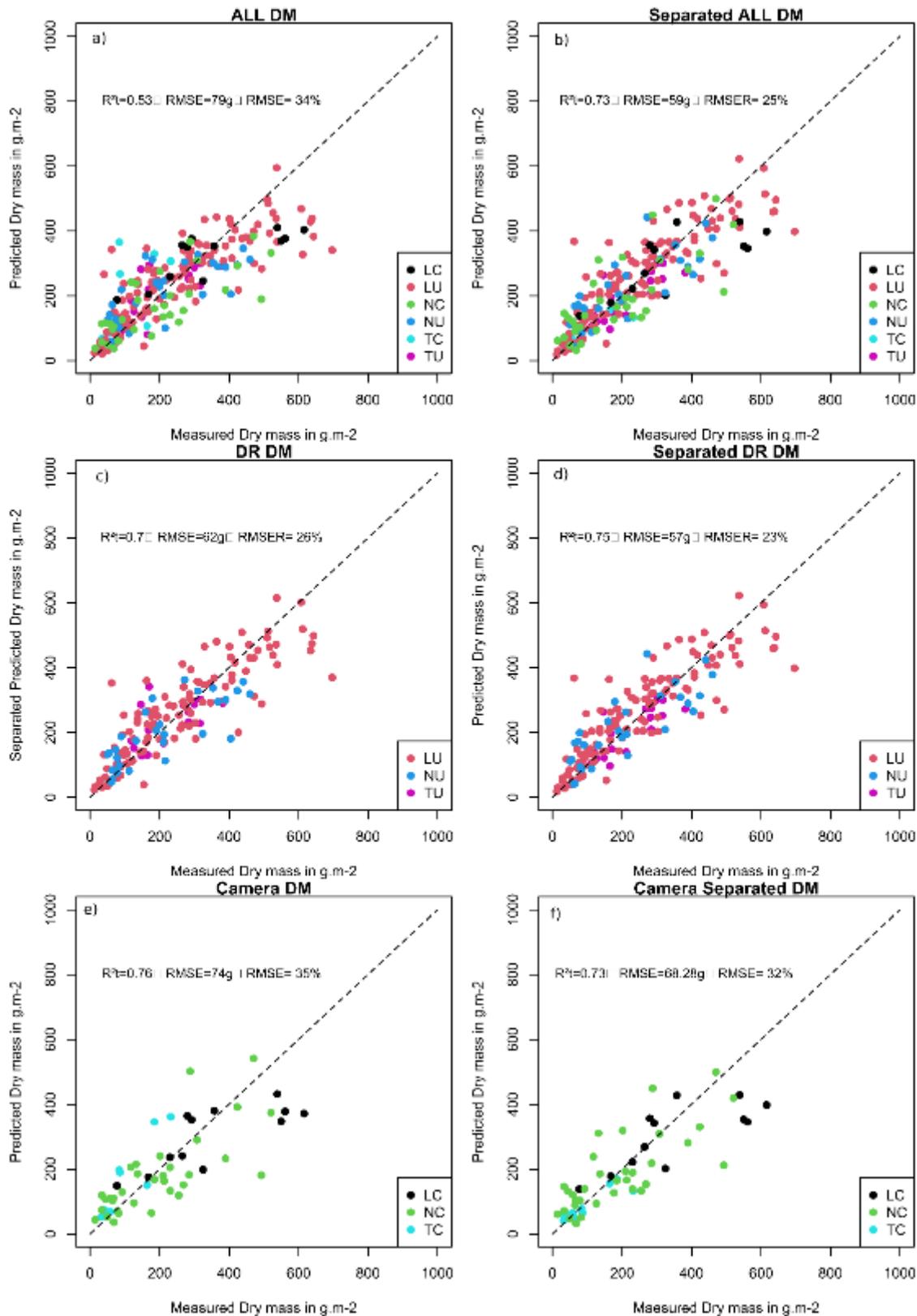


Figure 16: masse sèche prédite et mesurée sur un jeu de données de validation (a) modèle avec tous les jeux de données ensemble (b) modèles créés pour chaque jeu de données. (c) modèle avec tous les jeux de données drone ensemble (d) modèles créés pour chaque jeu de données drone (e) modèle avec tous les jeux de données camera ensemble. (f) modèles créés pour chaque jeu de données camera. Source *Taugourdeau et al. (2022 [Ai13])*.

Ces travaux montrent qu'on peut utiliser les outils comme le drone pour faire du suivi de la végétation des herbacées. Dans cet exemple, pour les sorties de l'appareil photographique, nous avons utilisé uniquement la valeur moyenne par carré (indice de végétation et hauteur). Dans une autre étude (Taugourdeau et al, 2022[AI11]), nous avons aussi estimé la 3D d'un couvert herbacé avec une autre technologie (Appareil Plénoptique appareil multifocale). Dans cette étude, en plus de la moyenne par carré, une approche par segmentation d'image a été utilisée pour séparer les différentes espèces. Nous avons aussi combiné les mesures avec une prise de spectrométrie en proche infrarouge (SPIR). Ces travaux avaient montré l'intérêt de combiner différentes approches et capteurs pour évaluer les différentes métriques de la végétation.

Sur les herbacées, une étudiante (Mélina Turpaud [Em26]) a aussi travaillé sur l'utilisation de Pl@ntnet pour les plantes de pâturage et montré l'intérêt de l'application pour ces pâturages.

Le drone, une étape intermédiaire pour la cartographie de la végétation .

Les écosystèmes pastoraux au Sahel sont souvent très hétérogènes. Ils sont aussi composés de deux couches : herbacées et ligneux. Pour faire des suivis de la végétation par télédétection, il faut réaliser des mesures de terrain représentatives des pixels des images satellitaires. Au début du suivi au Sénégal, les images satellites ont des résolutions spatiales d'1 km². Il était donc nécessaire d'avoir des mesures à la fois des herbacées et des ligneux représentatifs du pixel. Le nombre de mesures doit être important pour couvrir la forte hétérogénéité spatiale. De plus, les ligneux et les herbacées sont mesurés sur des zones et selon des protocoles différents .

Le drone peut permettre de prendre en compte cette hétérogénéité spatiale et de produire des cartes de biomasse à très haute résolution spatiale, qui peuvent être ensuite utilisées pour calculer la biomasse pour chaque pixel de l'image satellite. En utilisant les calibrations pour les ligneux et les herbacées, nous avons créé des cartes de biomasses sur 45 sites de quelques ha à travers le Sénégal (Taugourdeau et al. 2023[AC9]). Nous avons extrait les données Sentinel II (NDVI, MSAVI 2 et MTVI 2) pour chacun des pixels présents sur ces 45 sites . Pour chacun des pixels, nous avons calculé la somme de biomasse herbacée et ligneuses. Une random forest a été appliquée pour lier les indices Sentinel II avec la biomasse(Figure 17). Le R² entre prédiction et biomasse était de 0.91.

Nous avons aussi utilisé ce modèle sur l'ensemble du pays pour produire une carte de biomasse à l'échelle du Sénégal (Figure 18). Ces travaux montrent l'intérêt d'utiliser le drone pour simplifier les mesures de terrain pour la calibration avec les images satellites. Il serait important de comparer les méthodes reposant sur l'usage des drones et les méthodes plus classiques. La comparaison sur l'année 2020 entre les cartes obtenues par le drone ou par la méthodologie du CSE a montré de fortes différences (Nungi-Pambu et al., 2023 [AI23]). En particulier, ces différences étaient plus importantes dans le sud Sénégal qui est une zone avec une très forte hétérogénéité au niveau des paysages (cuirasse ferrallitique, relief, zones de forêt dense). Le CSE ne suivait pas de sites dans le sud avant cette étude mais seulement depuis 2023. Il devrait intégrer le drone dans le suivi de la végétation pour les années futures.

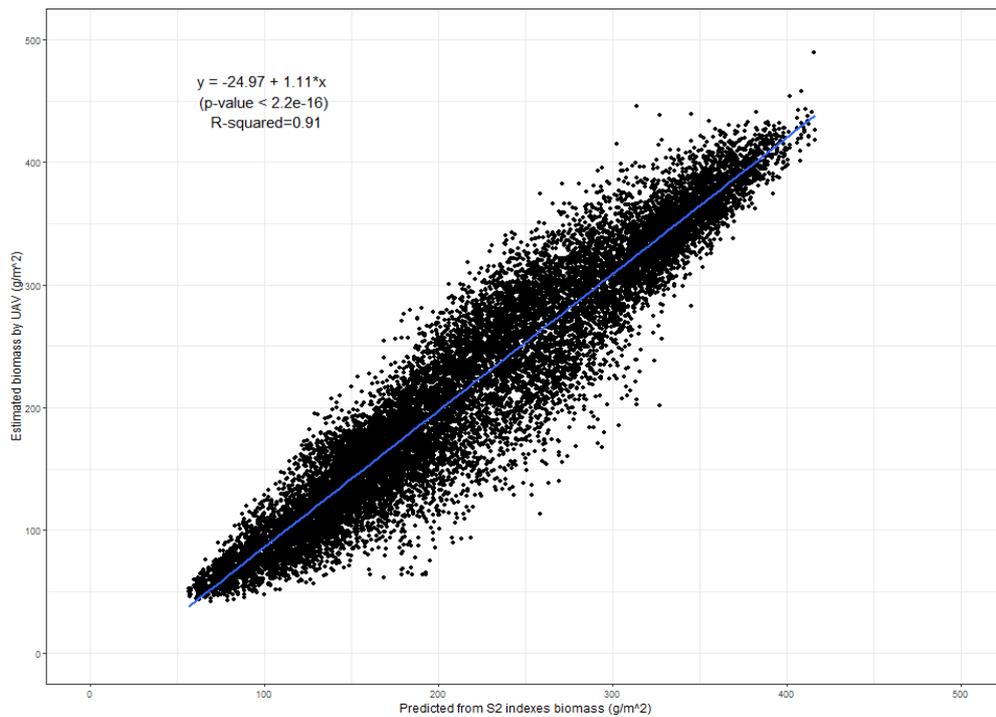


Figure 17: Relation entre les biomasse issus du drones et les prédiction de la biomasse par les images Sentinel II (source Nungi-Pambu et al., 2023 [AI23])

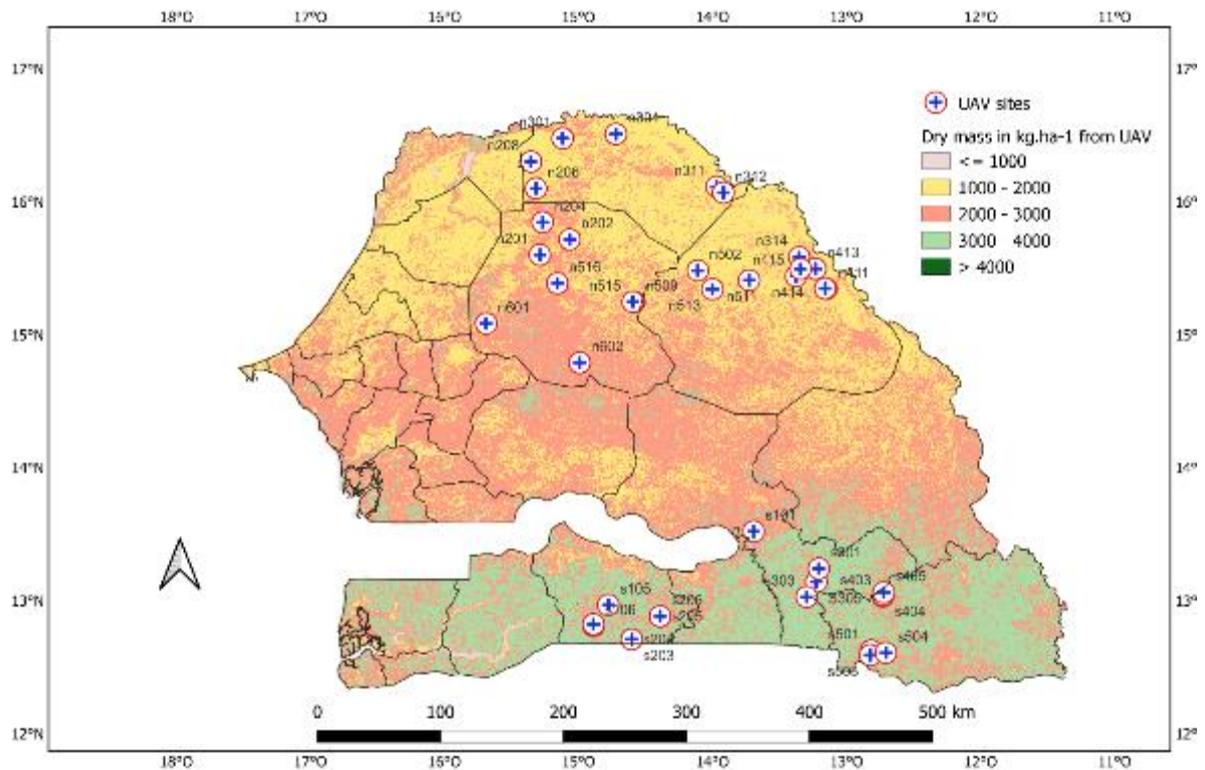


Figure 18. Carte nationale de la biomasse (kg.ha.1) pour le Sénégal obtenue via une random forest sur les images sentinel II entraînée sur des données drone. (source Nungi-Pambu et al., 2023 [AI23]).

Les données drone produite sur le Sénégal ont aussi servi à la validation d'estimation du taux de couverture arborée sur l'ensemble du continent africain (Reiner et al 2023, [AI17]). Les arbres sont identifiés individuellement par une technique de DeepLearning sur des images de satellites Planet. Les drones permettant d'avoir un jeu de validation important avec des positions très précises. Cet exemple montre l'intérêt de l'utilisation du drone comme étape intermédiaire entre le terrain et le satellite.

Etudes de l'hétérogénéité spatiale impact des arbres sur les herbacées

Les cartes hautes résolutions de la végétation herbacée peuvent être utilisées pour étudier le pattern de l'hétérogénéité spatiale. Dans les savanes, les arbres ont un impact sur les herbacées annuelles, en créant un microclimat favorable. Sous les couronnes des arbres, on note aussi des fertilités plus importantes sous l'arbre (N'Goran et al., 2022[AC7]) liées à l'activité de l'arbre (racine et chute de litière). Cette fertilité est aussi liée au fait que les animaux (oiseaux et animaux d'élevage) restent auprès d'arbres. Des études ont montré les différences dans le couvert herbacé entre la couronne et en dehors de la couronne (Akpo et al. 2003). Le drone a déjà été utilisé dans les parcs *Fadherbia* et leur impact spatial sur la culture de mil (Roupsard et al. 2020). En 2021, nous avons réalisé des vols de drones tous les deux jours combinés avec des mesures de biomasse au sol. Ces mesures étaient effectuées sous la couronne, au bord de la couronne et à une distance supérieure à la hauteur de l'arbre. Ces mesures ont permis de comparer la biomasse entre les deux. On trouve en moyenne des valeurs proches entre les biomasses sous l'arbre et au bord de la couronne (Fassinou et al., soumis[AC12]).

A partir des données au bord de la couronne et loin de l'arbre, une calibration temporelle a été effectuée avec les indices obtenus sur les images drones. Cette calibration appliquée ensuite la série temporelle d'images drones. Sur ces cartes de biomasses ainsi obtenues, des analyses géostatistiques ont été réalisées pour identifier l'impact spatial des arbres tout au cours de la saison. Cet impact spatial varie de 5 m à 15 m du bord de la couronne des arbres (Figure 20).

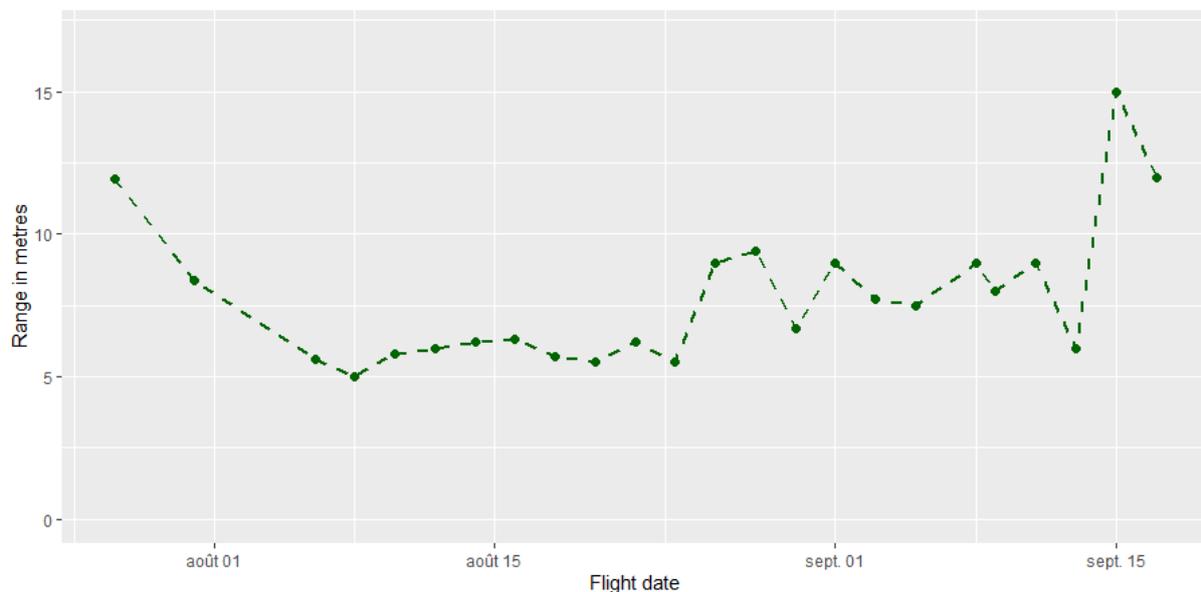


Figure 19: Variation de la distance du bord de la couronne d'influence des arbres sur les herbacées au cours de la saison des pluies

Ces travaux montrent l'intérêt des outils comme le drone pour la spatialisation de la végétation à des échelles permettant une étude des processus comme la facilitation entre arbres et herbacées.

Synthèse sur l'utilisation de la photogrammétrie

Ces travaux ont montré l'intérêt de l'utilisation d'outils de prises d'images pour le suivi de la végétation sur le terrain aussi bien pour les herbacées que pour les ligneux. Tous ces travaux ont porté sur l'utilisation de drones Rouge Vert Bleu . Il existe bien sûr des drones plus spécialisés dans le suivi de la végétation disposant de capteurs dans le proche infrarouge. Il serait intéressant de les tester et de pouvoir comparer les résultats avec les drones low cost pour identifier le coût/bénéfice de ces outils. Un des enjeux forts des calibrations sur le drone est d'arriver à repositionner les objets mesurés sur les images.

Ces travaux initiaux de calibration étaient d'autant plus nécessaires que certaines équipes de recherche, en particulier au Sénégal, avaient une forte réticence sur ces outils ou au contraire un emballement un peu naïf sur ces outils. Des collègues au Sénégal se sont maintenant réapproprié le drone et commencent à l'intégrer dans les différents projets. J'ai aussi donné des formations et donné de nombreux retours d'expériences, que ça soit aux étudiants et collègues chercheurs utilisant le drone mais aussi au chauffeur du PPZS qui est maintenant Télépilote. Sur le drone, j'ai organisé un Webinaire [V11] avec une centaine de participants et un peu plus de milles vues par la suite sur Youtube. Le support de ce webinaire a été utilisé pour donner un cours aux étudiants de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II de Rabat.

Cependant, il est nécessaire en tant que spécialiste en écologie de ne pas se focaliser seulement sur l'aspect développement de méthodologie mais de garder un intérêt pour les nouvelles questions auxquelles le drone peut répondre, comme l'impact des arbres sur les herbacées ou du suivi d'expérimentations.

Conclusion sur les activités de recherches

Mes activités de recherches ont porté principalement sur la compréhension des végétations de pâturage avec des approches numériques différentes (bases de données et outils numériques) et des terrains variés des zones tempérées, boréales et tropicales. Mes travaux ont souvent été à mi-chemin entre des travaux méthodologiques et de la création de connaissances en écologie des pâturages. Une partie importante de ces travaux ont été réalisés grâce à des étudiants aussi bien en stage qu'en thèse.

Contribution aux travaux méthodologiques

On peut résumer mes contributions en plusieurs points.

- Sur la réutilisation des bases de données de végétation (relevés botaniques et traits fonctionnels), j'ai contribué à enrichir les données de végétation disponibles. Mes travaux ont aussi porté sur les biais liés à l'utilisation de base de données (données manquantes, variabilité intraspécifique). Pour finir, proposer des analyses pour valoriser ces bases de données et produire des nouvelles connaissances pour les impacts des pâturages.
- Mon apport principal a porté sur l'utilisation du drone et de la photogrammétrie pour la végétation de savanes. Ces travaux ont permis d'établir de nouveaux protocoles.

Contribution à la création de la connaissance

- Mes travaux ont montré l'importance de la prise en compte de l'interaction entre climat et pratiques. Dans certains types de conditions pédo-climatiques, certaines pratiques n'avaient pas d'effets sur la biodiversité
- Sur la zone du Sahel, j'ai contribué à l'étude des dynamiques de végétation. Pour les herbacées, nos travaux ont porté sur la dynamique des herbacées durant la saison de croissance en particulier en se focalisant sur le lien entre la phénologie et les autres facteurs de la végétation (qualité des fourrages).
- Pour les ligneux, une des questions était de s'intéresser à la régénération des ligneux. Je me suis aussi intéressé aux impacts des arbres sur le reste de l'écosystème.

Formation de jeunes chercheurs

L'encadrement d'étudiants a toujours occupé une part importante de mon travail. Ils ont contribué fortement à mes activités de recherche au cours des années. J'ai encadré 4 étudiants en stage durant ma thèse et 34 étudiants depuis 2015, année de ma prise de poste au CIRAD. 3 de ces étudiants ont ensuite continué en thèse avec moi. J'ai ainsi encadré beaucoup plus de stagiaires que de doctorants sur cette période.

Les sources de financement (petits projets) ne m'ont pas permis d'avoir un nombre de doctorants plus important et souvent ne permettent de ne financer que des stages. Dans plusieurs cas, les stagiaires disposant de bourses /financement, cherchaient des sujets avec un encadrement. Ce qui a permis d'avancer sur des activités en dehors de financement et d'avancer sur des fronts de sciences (Drones, réutilisation des herbiers, ...). Il faut aussi noter que certains financements comme les projets #digitag portaient précisément pour des bourses de stages. Pour finir les projets comme les projets CRESI ou le projet EcoServ par leur durée réduite (1 an et 2 ans) ne pouvaient permettre que de prendre des étudiants en stage. Une des limites des stages pour les étudiants est qu'il est très compliqué pour eux de faire une valorisation de leurs travaux dans le temps de leur stage et même par la suite. J'ai souvent repris la main sur leurs travaux pour en amener certains à la publication en les mettant en 1^{er} auteur.

Une des caractéristiques des étudiants que j'ai encadrés est la diversité de leur origine (9 nationalités différentes) mais aussi leur établissement (13 universités différentes de 5 pays différents). Les universités ayant des modes de fonctionnement différents et les attentes académiques pouvant varier d'un établissement à un autre, il est toujours nécessaire de bien s'adapter et de comprendre les attentes de l'établissement dans son encadrement. Une des différences est que certains diplômes et établissements imposent une date de soutenance et il faut donc adapter le contenu et l'organisation pour pouvoir produire quelque chose à la fin du stage. Pour d'autres diplômes, la soutenance est organisée "à la demande". Ce qui pose plusieurs problèmes, en particulier le fait que certains étudiants mettent du temps à rédiger leur mémoire par manque de pression de deadline. Il faut aussi rajouter que le COVID a fortement impacté les universités africaines dans leur organisation et certains étudiants ont mis plus de 2 ans avant de pouvoir soutenir en raison de problèmes administratifs. Certains étudiants ont donc effectué des stages longs (1 an, voire plus).

Certains étudiants des pays africains ont parfois des lacunes dans leur formation, notamment sur l'analyse de données et sur l'anglais. L'anglais est très limitant pour les synthèses bibliographiques qui ont souvent reposé seulement sur des travaux en français et anciens.

Pour les doctorants, j'ai actuellement deux étudiants qui ont soutenu leur thèse avec des parcours et des contraintes très différentes. Dans le cas d'Ousmane Diatta, nous n'avions du financement principalement que pour son indemnité de bourse et très peu de possibilité de terrain. On a dû organiser un sujet sans beaucoup de moyens pour mettre en place son protocole. Par la suite de sa thèse, il est resté dans l'équipe du PPZS pour continuer la mesure de données. Il a contribué à de très nombreuses campagnes de terrain.

Dans le cas d'Annaël Barnes, la problématique était différente avec un financement suffisant pour les activités mais elle devait être conduite sur des terrains distants sans appui du CIRAD (Kazakhstan) en pleine période du COVID. Elle a dû prendre en compte beaucoup d'aspects administratifs sur place, que ça soit sur l'organisation des missions et la collecte et le transfert des échantillons.

Etant d'une discipline assez peu représentée dans mon unité, il n'y a actuellement que trois personnes qui travaillent sur les questions de végétation : un agro écologue à mi-temps chercheur, une agronome des fourrages et une botaniste gestionnaire d'herbier. Ces deux dernières sont ingénieurs et recrutées après moi et aucun de ces trois collègues n'a l'HDR. Il s'est avéré difficile pour les thèses à l'école doctorale GAIA de trouver une direction de thèse. Paulo Salgado, le directeur de thèse d'Annaël Barnes (Socio écologie de la compensation écologique en Asie centrale) est un zootechnicien spécialiste en alimentation et dans les recyclages des nutriments dans les relations agriculture/ élevage.

D'une manière générale, je pense qu'il est important de former les étudiants en thèse aux aspects « gestion de la recherche » : montage de projet, gestion du budget, gestion de la partie administrative associée (accueil des stagiaires, etc). En effet, cela permet d'avoir une vision large du métier de chercheur et de leur permettre de se projeter par la suite dans le métier s'ils le souhaitent.

Dans l'encadrement des étudiants, il est important de bien visualiser les attendus pour les soutenances (article, colloque, etc) pour être sûr de pouvoir soutenir. Dans le cadre de la thèse d'Ousmane Diatta, on a rapidement utilisé des données existantes pour faire un article pour lui permettre la soutenance. Dans le cadre de la thèse d'Anaël Barnes, on a identifié un journal réputé pour sa rapidité de relecture pour ne pas pénaliser la suite de la thèse. Lors d'une

construction de sujet de thèse, je pense qu'il est utile de disposer si possible d'un jeu de données pour pouvoir publier un article dès le début de la thèse pour débloquer cette contrainte.

Perspectives de recherche



Crédit Simon Taugourdeau Sénégal et Maroc

Pour le pastoralisme, les études de la végétation reposent sur deux enjeux principaux.

- Informer sur l'état de la végétation pour les politiques de l'élevage et comprendre la dynamique de la végétation des parcours pour pouvoir prédire les impacts des changements globaux.
- Identifier des pratiques de gestion agro-écologique (pâturages, plantations) permettant une gestion durable des parcours des écosystèmes arides

Ma question principale de recherche reste similaire à mes travaux précédents, comprendre les impacts des pratiques et du climat sur la végétation des pâturages des zones arides afin de pouvoir répondre à ces enjeux.

D'une manière plus spécifique, mon projet scientifique s'intéresse à trois questions de recherches qui répondent à ces enjeux (Figure 20).

- 1) Dynamique des communautés annuelles et pérennes avec les changements globaux en utilisant des approches participatives
- 2) Etudes de l'hétérogénéité spatiale de la végétation des zones arides en lien avec les pratiques de gestions des parcours
- 3) Modélisation spatiale des communautés herbacées des écosystèmes arides

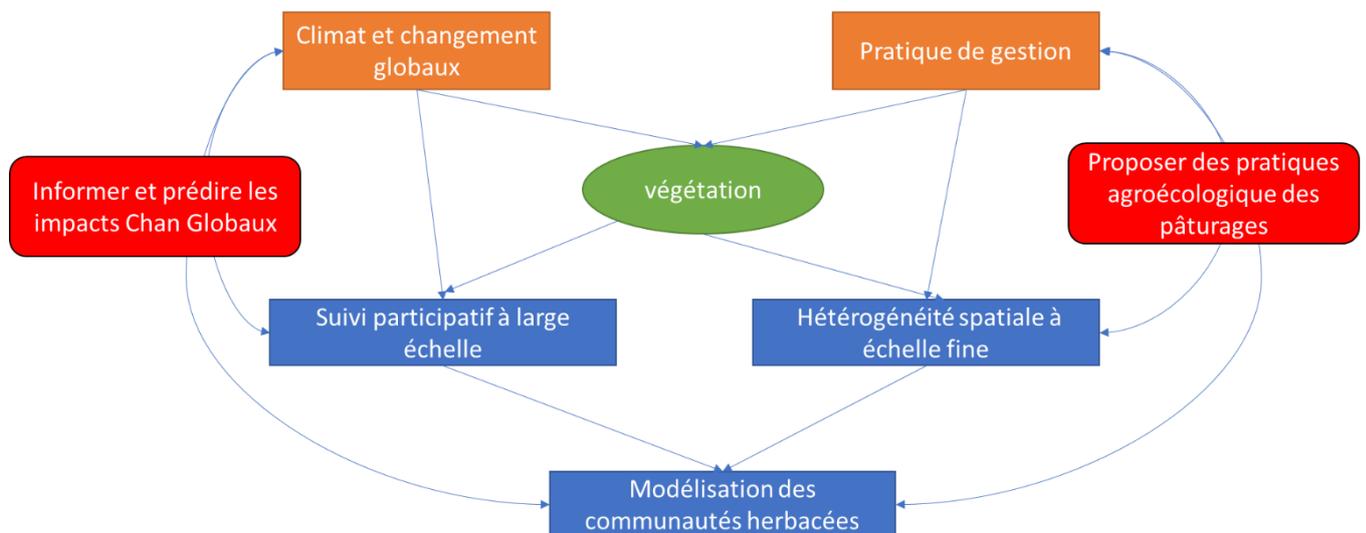


Figure 20: Représentation schématique de mon projet de recherche (En rouge les enjeux, en orange les facteurs impactant la végétation, en bleu les questions de recherche)

I. Dynamique des communautés annuelles et pérennes en lien les changements globaux utilisant par l'utilisation d'approches participatives

A une échelle spatio-temporelle large, l'objectif est de pouvoir évaluer les impacts des changements globaux sur la végétation des zones arides. Le but est d'identifier les dynamiques de la végétation sur le long terme (plusieurs dizaines d'années) en lien avec les données de séries climatiques. Plus précisément: il s'agit de comparer les dynamiques entre les plantes pérennes et les plantes annuelles. Pour les plantes pérennes, l'objectif est de comprendre les impacts de séries de sécheresse. De manière similaire, les annuelles peuvent avoir des réponses rapides aux variations de l'environnement climatique et/ou de pratiques. Quelle est la résilience de ces communautés ? Quelle est leur dynamique sur le long terme ?

Une des questions est aussi d'observer le lien entre les deux communautés végétales : Est ce certains types de communautés de pérennes sont associées à des communautés d'annuelles ? Est-ce que les patterns spatio-temporels de diversité (taxonomiques, fonctionnelles et phylogénétiques) sont similaires ou différents entre les deux types de communautés ?

Pour pouvoir répondre à ces questions il faut cependant disposer de bases de données larges. Les bases de données larges sont cependant des défis.

- Comment continuer à compléter les bases de données existantes ? Ces mesures sont très lourdes pour couvrir de larges zones temporelles. Une des solutions pour obtenir des nouvelles données est d'utiliser des approches participatives pour compléter les données historiques.
- Un des enjeux sur les bases de données larges est que les données sont souvent d'origine hétérogène (protocoles, stratégie d'échantillonnage et date et localisation). Il faut ajouter que les métadonnées (climat et pratique d'élevage) sont très lacunaires pour les pâturages arides et semi-arides.

Ces deux défis sont les deux sous parties pour cette partie de la recherche

Développer des outils pouvant être utilisés par les acteurs locaux pour caractériser la végétation

Il existe de nombreuses approches participatives pour la biodiversité et la végétation. Il existe tout d'abord des outils de partage de données qui sont principalement alimentés par les scientifiques comme TRY (<https://www.try-db.org/>) mais il existe des démarches et bases de données partagées pour les occurrences (GIBF, <https://www.gbif.org/fr/>) voire même des communautés végétales comme le réseau sPlot (Sabatini et al. 2021). Ces approches sont plutôt du regroupement de bases de données issues de regroupements de collectes qu'une approche participative impliquant des non scientifiques.

Il existe des outils qui reposent plus sur une science citoyenne comme le carnet en ligne de télébotanica ou les données de la LPO pour les oiseaux. Ces suivis demandent une compétence d'identification et reposent uniquement sur la bonne volonté des observateurs (observateurs passionnés). Ces données entraînent bien sûr des biais aussi bien sur l'identification que sur le choix des espèces observées (Arazy and Malkinson 2021).

Avec l'avènement des smartphones combiné avec le développement de « l'intelligence artificielle », des applications d'identification ont vu le jour comme pl@ntnet (Goëau et al. 2014, Bonnet et al. 2020) ou INaturalist(<https://www.inaturalist.org/>). Ces outils permettent en partie de simplifier les parties identifications et d'implémenter de très nombreuses données dans les bases de données (65 millions d'occurrence pour i Naturalist dont 25 millions de plantes et 12 millions pour Pl@ntnet). Le seul intérêt pour les utilisateurs est d'avoir une identification botanique des espèces présentes. L'identification automatique a bien sûr des biais (Campbell et

al. 2023) mais cela permet d'augmenter le nombre d'observations en ne se reposant pas que sur des spécialistes. La prise d'information par les utilisateurs n'est pas aléatoire. Un des enjeux actuels est de pouvoir faire des prédictions via Pl@ntnet sur des mélanges d'espèces directement sur des quadrats. Cette identification à l'échelle "communauté" permettrait d'ouvrir de nouvelles perspectives en particulier en agronomie (suivi des adventices, végétation des prairies). Les images peuvent aussi servir à produire d'autres métriques de la végétation, par exemple la phénologie (Klinger et al. 2023)

En agronomie, il existe de nombreux outils qui sont développés pour aider les agriculteurs/ les éleveurs à évaluer leur végétation (cultivée ou spontanée). On parle d'agriculture/élevage digitale ou agriculture/élevage de précisions (Bocquier et al. 2014). Certains outils permettent de partager des informations et des bases de données partagées. En Irlande, des données issues d'herbo-mètres sont enregistrées dans une base de données partagée (PastureBase) (Hanrahan et al. 2015, Hanrahan et al. 2017). Ces données sont ensuite utilisées pour faire une « météorologie » de la croissance des pâturages à l'échelle nationale. Des outils peuvent être directement utilisés par des institutions comme les ministères ou des ONG. Par exemple, en Mongolie, un dispositif de suivi des pâturages repose sur du photo monitoring des pâturages à l'échelle nationale. Des espèces-clés sont identifiées et permettent d'identifier différents types de pâturages (Densambuu et al. 2018). De plus, les usages sont souvent uniques avec juste une ou quelques variables de prédites alors que de nombreuses variables peuvent être estimées par l'utilisation d'images.

A notre connaissance, les outils basés sur la photogrammétrie, en particulier à partir d'imageries prises au sol ne sont pas encore développées et proposées pour l'évaluation des pâturages.

La première partie de mon projet de recherche est d'identifier les activités qui pourraient permettre la mise en place d'un réseau participatif de suivi de la végétation des pâturages.

Tout d'abord, il s'agirait de co-identifier les indicateurs et les outils que les différents usagers des pâturages pourraient utiliser. Il s'agit de voir la généralité ou non des indicateurs entre les différents usagers (éleveurs, forestiers, gestionnaires de la biodiversité, touristes) et aussi la généralité entre plusieurs terrains (outil spécifique à une région ou générique à plusieurs zones). L'hypothèse est que le nombre d'observations effectuées sera d'autant plus grand que les indicateurs sont d'intérêt pour les acteurs de terrain.

L'objectif est de pouvoir faire de multiples analyses d'images et produire de très nombreux indicateurs (aussi bien pour les usagers que pour les scientifiques). Cela permettrait d'utiliser à la fois les informations 3D issues de la photogrammétrie et des approches indices de végétations avec des approches de segmentation et identification des objets. Cela pourrait permettre d'étudier la complémentarité entre les approches. Par exemple, les données de hauteur issue de la 3D peuvent être utiles pour la segmentation. Il est aussi intéressant de voir l'intérêt d'avoir plusieurs images avec des angles différents nécessaires pour la photogrammétrie pour permettre une meilleure prédiction des espèces via Pl@ntnet.

Les utilisations de ces types d'outils pourraient permettre la constitution de très larges jeux de données pouvant couvrir des grands gradients spatio-temporels.

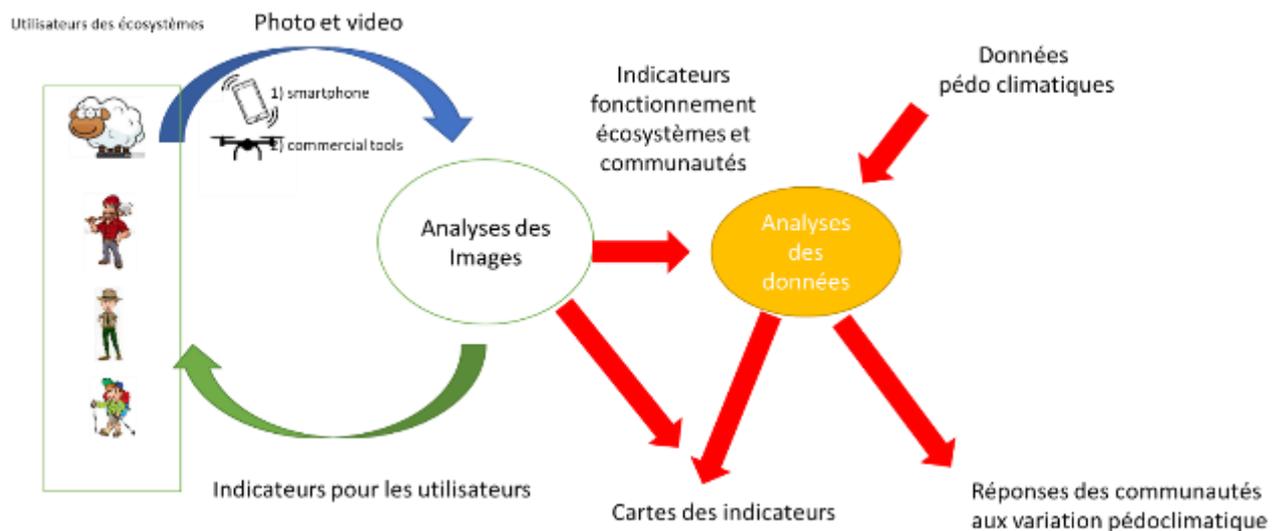


Figure 21 : Représentation d'un potentiel projet de recherche pour mettre en place un observatoire participatif reposant sur l'analyse d'images.

Sur cette partie, une demande de financement Biodiversa(Pia MED [Ppn24]) a été déposée en 2022 avec un consortium Maroc Espagne Portugal et France. Ces activités vont être intégrées dans un projet sur le numérique en élevage Méditerranée. Ce travail pourrait se faire en lien avec l'UMR AMAP pour la partie Pl@ntnet.

Utilisation de méthodes pour analyser des données hétérogènes pour comprendre l'impact du climat sur la biodiversité des parcours

De nombreuses recherches ont porté sur comment analyser des données de sciences citoyennes. En effet, en plus de l'hétérogénéité des données, les données de sciences citoyennes ont des biais dans la collecte (espèces rares/jolies plus souvent remarquées et/ou collectées que des espèces communes). Il existe des biais de collecte similaires sur les collectes d'herbiers qui ne sont pas forcément représentatives de la flore locale et de la distribution de l'espèce.

D'une manière plus générale, il y a un enjeu à réutiliser des données de végétation issues de base de données hétérogènes combinant des données issues de recherches multiples. Par exemple pour le moment, la Base FLOTROP sur le Sahel est peu utilisée pour comprendre les dynamiques de végétation.

Une approche sur ces données est d'utiliser des modèles de distribution d'espèces qui permettent de voir la biogéographie de ces espèces. Certains de ces modèles intègrent les variations temporelles. Ce qui s'implique bien aux dynamiques d'espèces invasives et pourrait être utilisé sur les espèces « indésirable » des pâturages comme *Diodia scandens* Sw au Sénégal. Dans les zones comme le Sahel avec des données historiques, il est possible de voir les modifications des zones biogéographiques avec les variations entre les périodes de sécheresse (1970-1980) avant et après les périodes de sécheresse en utilisant des données historiques comme les données FLOTROP combinées à d'autres jeux de données. Des études ont aussi montré la possibilité d'utiliser les données issues d'outils d'identifications automatiques pour paramétrer des modèles de distributions d'espèces (Botella et al. 2018).

Les approches « IA » (machine learning ou deep learning) peuvent aussi être utilisées sur des objets comme les indices de biodiversité (Bayat et al. 2021) de manière similaire à mes travaux de thèse. L'intérêt de ces approches « boîtes noires » est de trouver des relations un peu cachées

entre l'environnement et la biodiversité. L'idée est de pouvoir utiliser ces liens « boîtes noires » pour créer des séries temporelles de cartes. Et ensuite, l'idée est de pouvoir analyser les variations spatio-temporelles des différents indicateurs de végétation..

Les approches en IA ne permettent pas de comprendre les mécanismes des relations entre la biodiversité et l'environnement. Cependant, lorsque les métadonnées environnementales sont très indirectes, le lien mécanistique n'est pas forcément recherché. En effet, très peu de métadonnées sont disponibles pour les données historiques sur les zones arides. Par exemple pour le Sahel, les données climatiques sont très peu disponibles (valeur moyenne par pays voire un indice moyen pour le Sahel). Pour les périodes plus récentes, les données satellites sont de plus en plus utilisées et permettent d'avoir des données plus spatialisées (Dembélé and Zwart 2016). Pour les données pratiques, c'est encore plus indirect, les descriptifs du pâturage et des autres actions humaines (élagage, fauche) ne sont jamais disponibles pour des pâturages collectifs. Pour les zones arides, la distance au point d'eau est généralement utilisée comme un gradient d'intensité de pâturages (Maestre et al. 2022). Cette approche peut être contestée avec des pratiques d'élevage pas forcément liées à la distance au point d'eau (en particulier en saisons des pluies avec la création des points d'eau temporaires). Cependant, il est aussi compliqué d'avoir la position de l'ensemble des ouvrages hydrauliques du fait de la multiplicité des projets de constructions. Il faut aussi rajouter le fait que les dates de construction ne sont pas forcément connues et c'est donc un peu plus difficile d'avoir une idée de pression dans le passé. Pour les points d'eau naturels, il n'existe pas de cartes sur de larges zones. Il serait intéressant de voir les possibilités d'utiliser des approches d'analyse d'images pour cartographier ces points d'eau et de pouvoir utiliser la densité de ces points comme indicateurs de pressions.

L'objectif est donc d'utiliser des outils de Machine learning/Deep learning pour identifier des liens entre les méta-données indirectes et les variables de végétation.

Cette approche permettrait de voir les grands changements de la végétation pastorale et de voir les tendances. Cependant cette approche est peu prédictive et ne permet pas forcément de proposer des solutions pour modifier cette dynamique.

Il est important de pouvoir redescendre à des échelles plus fines pour appréhender les possibilités d'actions sur la végétation et de mise en place de pratiques agroécologiques.

Cette partie du projet de recherche pourra se réaliser avec l'unité Forêt et société du CIRAD et l'UMR AMAP. Un stage est prévu sur ces thématiques dans le cadre du projet ACCEPT [Pco3]).

Etude de l'hétérogénéité spatiale de la végétation des zones arides en lien avec les pratiques de gestions des parcours

Les pâturages avec de la végétation spontanée sont le plus souvent très hétérogènes. On parle ici de l'hétérogénéité dans 1m² (voir en dessous) jusqu'à de l'hétérogénéité dans une dizaine d'hectares.

En effet, de nombreux filtres écologiques qui modèlent la végétation comme proposés par Keddy (1992) ont une forte hétérogénéité spatiale (et temporelle).

- Le climat n'est sans doute pas variable sur ces échelles mais il ne faut pas négliger les impacts du micro-climat. Par exemple, en savane, un des impacts des arbres sur la végétation herbacée est dû à la modification du climat. Ces impacts sont spatialisés (fort impact sous l'arbre et diffusion de l'impact avec la distance de l'arbre).

- Le sol est d'abord hétérogène en particulier car le sol des pâturages est peu travaillé voir jamais travaillé et donc homogénéisé. L'hétérogénéité du sol est aussi impactée par la végétation et du pâturage (piétinement, déjections) (Bloor et al. 2020).
- La défoliation et le comportement animal impactent l'hétérogénéité (Adler et al. 2001, Parsons and Dumont 2003) soit en augmentant l'hétérogénéité en sélectionnant certaines plantes (en fonction de l'espèce ou du stade phénologique) vis à vis d'autres mais à des niveaux de chargement plus élevés les animaux ont une défoliation assez uniforme et donc réduisant l'hétérogénéité.
- Les déjections des animaux sont aussi un facteur d'hétérogénéité qui crée des patches d'apport de nutriments importants dans les pâturages non fertilisés ou les retours des animaux sont une des sources importantes de nutriments. Il faut aussi rajouter que les déjections comme fèces modifient souvent le comportement des animaux (Scheile et al. 2018). Les animaux évitent généralement les zones avec des déjections ce qui crée des patches de végétations non mangées qui ensuite ont des stades phénologiques trop avancés.
- Les pâturages contiennent souvent une flore très diversifiée, créant de fait une hétérogénéité. Bien sûr, l'hétérogénéité en espèces résulte en partie d'autres facteurs mais résulte aussi de processus d'interactions entre les plantes. En zone aride, les interactions entre pérennes et annuelles sont structurantes.
- L'hétérogénéité et la diversité des espèces sont aussi liées à des processus aléatoires comme la germination des plantes et les processus de la dispersion. Pour les espèces annuelles les processus de germination et de dispersion sont importants. Les interactions entre ces plantes sont sans doute un peu moins structurantes que pour les plantes pérennes. Il serait aussi intéressant de réfléchir à l'intérêt d'utiliser la théorie neutre proposée par Hubbell (2001). Les processus stochastiques liés au recrutement des plantes sont un facteur structurant expliquant la présence et la répartition des espèces.

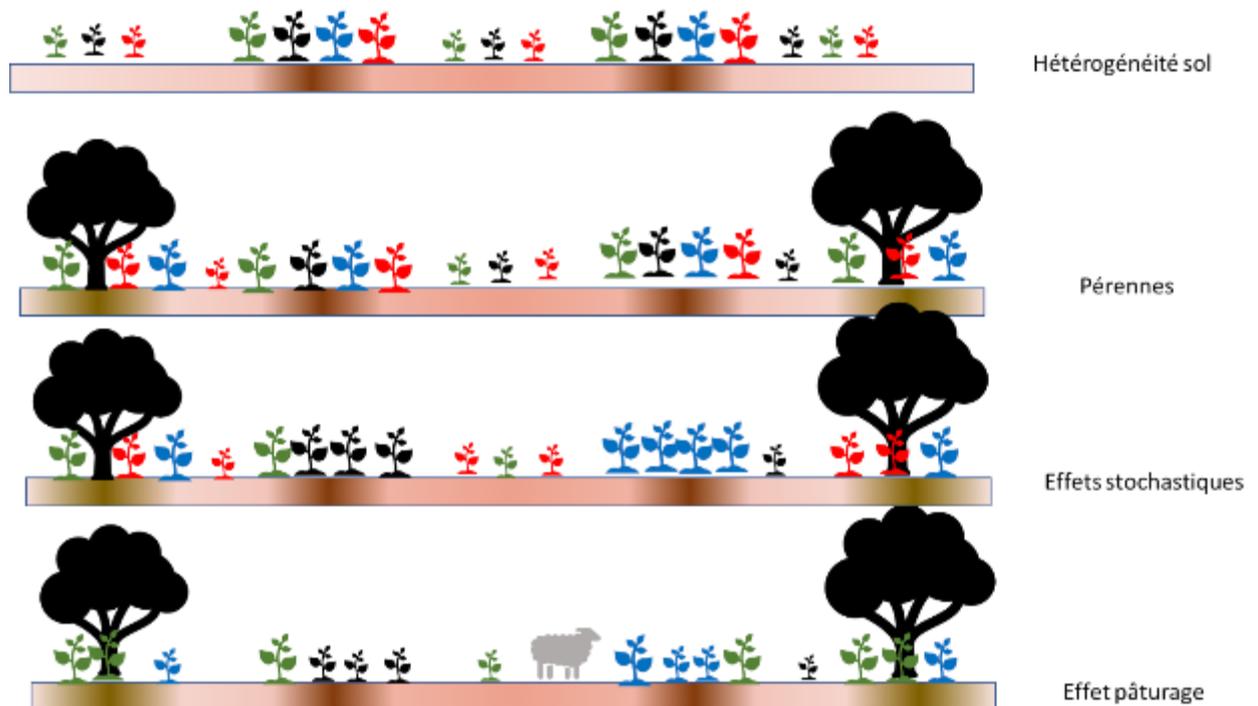


Figure 22: Représentation des facteurs influençant l'hétérogénéité. Tout d'abord, l'impact du sol. Par exemple, les espèces bleues ne poussent pas sur les sols pauvres. Les plantes sont plus grandes sur les sols riches que les sols pauvres. Ensuite les pérennes qui ont un impact sur le sol et favorisent les grandes plantes. Par contre certaines espèces comme les noirs ne peuvent pas survivre en dessous des arbres. La présence d'espèces dépend des processus démographiques et de dispersion qui peuvent être stochastiques. On peut donc se retrouver avec des patchs d'une seule et même espèce. Pour finir le pâturage influence sur les espèces, les espèces rouges ne supportent pas le pâturage, les verts par contre ne sont pas influencés, les noirs et les bleus sont consommés.

Cette hétérogénéité est centrale pour comprendre les dynamiques des communautés végétales et l'impact des pratiques. Cette hétérogénéité impacte fortement les services rendus par les pâturages. L'hétérogénéité spatiale est fortement liée au comportement des animaux. Le comportement d'ingestion est en effet dépendant de l'offre et de la diversité de l'offre (Bailey et al. 1998).Après, une forte hétérogénéité peut aussi résulter en patchs non consommés et donc créer une différence entre la quantité de biomasse disponible et la biomasse consommable. L'hétérogénéité crée aussi une diversité d'habitats pour la faune (Jerrentrup et al. 2014) et la flore (Bonari et al. 2017) donc contribue à la conservation de la biodiversité et aux services liés (pollinisation, contrôle des ravageurs). Les autres services comme les service liés au sol sont aussi liés à l'hétérogénéité

Il existe de nombreuses études sur l'impact des pratiques liées à l'élevage sur les zones arides mais ces études prennent peu en compte l'hétérogénéité spatiale alors que les zones arides sont des écosystèmes très hétérogènes. Cependant l'étude de l'hétérogénéité est lourde et l'utilisation des outils comme le drone est un élément pouvant permettre de produire des cartographies fines permettant d'étudier cette hétérogénéité spatiale

Utilisation des outils numériques pour spatialiser les caractéristiques des couverts végétaux.

Mes travaux ont permis de montrer l'intérêt des drones low-cost. Pour le moment, nous avons surtout testé leur utilisation sur la biomasse (poids sec). L'idée est de pouvoir élargir la liste et le type de variables évaluées pour couvrir des aspects comme la qualité des fourrages ou des indicateurs de biodiversité. En effet, des travaux ont montré l'usage possible du drone pour évaluer la qualité des fourrages (Geipel et al. 2021), les traits fonctionnels de la végétation (Capolupo et al. 2015, Zhang et al. 2022) voire le mapping des espèces clés ou du nombre de fleurs (Gallmann et al. 2022).

L'idée est de coupler différents types de capteurs et les approches au sol et les approches drones pour obtenir des cartographies de l'hétérogénéité à des échelles de quelques mm sur quelque m² et de quelques cm sur quelque ha. L'hypothèse est que les capteurs sont complémentaires et leur complémentarité permet d'évaluer la végétation dans une diversité de variables.

L'autre hypothèse que nous allons tester, c'est la complémentarité entre les capteurs au sol et les capteurs sur drones pour avoir des mesures d'hétérogénéités avec des résolutions et des échelles différentes. En effet l'idée est d'observer l'hétérogénéité entre les individus des herbacées mais aussi l'hétérogénéité des patches.

Etudes des interactions spatiales entre plantes dans les écosystèmes arides en utilisant les outils numériques

Les interactions entre plantes sont fortement structurantes dans les zones arides. La compétition est forte en particulier pour les ressources en eau (Barbier 2006, Diouf et al. 2010). Cette compétition explique entre autres les patterns spatiaux des arbres et arbustes. En effet, les systèmes racinaires sont souvent très étalés plus que les couronnes.. Le drone peut permettre de voir la distribution spatiale des pérennes et d'étudier la répartition spatiale. Les interactions sont aussi positives (facilitation) en particulier entre pérennes et annuelles. En savane, l'impact des arbres sur les herbacées a été étudié. Au Sahel, les arbres ont plutôt un effet positif sur les herbacées (Akpo et al. 2003). Différents processus peuvent expliquer cet effet positif.

- Le microclimat créé par les arbres peut tempérer les effets de la sécheresse. L'utilisation des caméras thermique pourrait permettre de voir les micro climats et les flux hydriques de la végétation (Gómez-Candón et al. 2016).
- Des apports en fertilité qui sont liés aux chutes de litière et des apports de nutriments par les racines des arbres. De plus, la végétation herbacée étant plus importante, les retours via la litière aérienne et souterraine sont plus importants. Les buissons en zone arides permettent aussi d'agrèger du sol et de la litière apportée par le vent. En savane les arbres servent aussi d'abris aux animaux (domestiqués ou sauvages). Ces animaux apportent par leur déjection des nutriments.

Les impacts des pérennes ne se font pas uniquement sous la couronne des arbres mais aussi à distance. Une carte à très haute précision peut être utilisée ensuite pour quantifier la distance d'impact des pérennes sur les annuels (Roupsard et al. 2020). Le drone par sa très haute résolution peut aussi permettre d'identifier les germinations et les jeunes plants des pérennes (Fromm et al. 2019). On peut aussi étudier les interactions entre ces juvéniles et les herbacées annuelles.

Sur l'impact des pérennes, différentes questions de recherches peuvent être utilisées en se reposant sur des outils numériques.

- Comparer l'impact des pérennes en fonction des espèces de pérennes et des paramètres dendrométriques.
- Étudier l'effet de la densité des pérennes sur l'impact et comparer pour des densités équivalentes zones naturelles et zones avec replantation.
- Identifier les variations de ces impacts au cours de la saison et le long de gradient de pluviométrie.
- Essayer de comprendre les mécanismes des interactions en combinant avec des mesures de sol pour voir les gradients d'humidité et de fertilité. Le drone peut aussi fournir des informations sur les paramètres du sol (Zhang et al. 2021) .
- Regarder le lien entre la présence et la survie des juvéniles et les paramètres liés aux herbacées annuelles.

Etudes de l'impact spatial du pâturage sur la végétation des écosystèmes arides en utilisant les outils numériques

Un autre facteur qui influence l'hétérogénéité spatiale des plantes, c'est le pâturage. En effet, les animaux d'élevage au pâturage ont un pâturage sélectif (Fuls 1992, Hodgson et al. 1994). Les différentes espèces animales ont des comportements différents. Le choix est basé sur l'espèce végétale mais aussi sur les stades phénologiques (qualité des plantes). Les plantes ont différentes stratégies de réponses au pâturages (Diaz et al. 2001). La réponse des plantes annuelles en cours de saison au pâturage est moins étudiée. Est-ce que les plantes pâturées meurent et sont remplacées par une nouvelle génération de germination ou peuvent-elles repousser ? Cette réponse peut dépendre de la phénologie au moment du pâturage. On peut supposer que les plantes au stade germination ou fructification ne repoussent pas au contraire des plantes au stade végétatif qui pourraient repousser. La question du pâturage sur la végétation des herbacées est un point important.

Les animaux ont aussi un impact via le piétinement et les déjections qui impactent le sol et donc la végétation. Les déjections ont un rôle sur le comportement alimentaire créant indirectement des patchs (Scheile et al. 2018). Pour les annuelles, en particulier dans les zones arides, les annuelles sont mangées en intégralité ou presque, que ça soit durant la saison des pluies ou après sous forme de paille .

Des vols de drones avant et après le pâturage pourraient permettre de qualifier les impacts spatiaux du pâturage. La différence entre la quantité de biomasse avant et après les pâturages pourrait permettre d'évaluer l'ingestion des animaux. Cette mesure pourrait être comparée avec des mesures d'ingestions comme l'utilisation de la spectrométrie en proche infrarouge (Dixon and Coates 2005) ou des alcanes (Berry et al. 2000). La comparaison pourrait aussi permettre de voir le lien entre le comportement alimentaire et l'état de la végétation. Le suivi par drone pourrait être combiné avec des colliers GPS à haute précision (Keshavarzi et al. 2021) sur les animaux pour appréhender les déplacements des animaux en lien avec la végétation. On peut émettre l'hypothèse que les animaux consomment de manière préférentielle les plantes avec la meilleure qualité fourragère. Ces travaux de suivi pourraient être effectués à différents moments de la saison pour voir les changements de comportement en fonction de l'état de la végétation. De plus, il serait intéressant de suivre la dynamique de la végétation après le pâturage. Pour les pâturages annuels, on peut émettre l'hypothèse que les endroits pâturés intensément ont des nouvelles germinations et donc une croissance ralentie par le temps de nouvelles installations ; par contre les endroits pâturés moins intensément ont directement des repousses .

Pour finir, il serait intéressant de regarder les croisements entre les impacts du pâturage et des pérennes. En plus du fait que les plantes pérennes créent une hétérogénéité qui peut impacter le

pâturage, les pérennes sont aussi consommées par les animaux et leur comportement alimentaire est influencé par leur présence et disponibilité. Globalement, les ovins et les bovins ont une consommation de pérennes (arbres) qui augmente avec la saison sèche alors que les chèvres et les dromadaires ont une consommation des feuilles de pérennes assez constante entre les saisons (Assouma et al. 2018a). Il est intéressant de voir aussi que l'interaction entre les herbacées et les juvéniles peut être modulée par le pâturage. On peut émettre l'hypothèse qu'un pâturage en cours de saison des pluies peut favoriser les plantules d'arbres. En effet, les animaux mangent de manière préférentielle les herbacées annuelles. Ceci diminuerait la compétition entre les plantules de pérennes et les herbacées. A l'opposé, un pâturage en saison sèche, les animaux pourraient se concentrer sur les feuilles des pérennes en particulier les plantules.

L'hétérogénéité spatiale est un paramètre important à prendre en compte en particulier lors de l'étude des pratiques du pâturage et aussi pour les pratiques liées aux pérennes (plantations, déforestation, régénération des terres). Cependant ces travaux à l'échelle d'une placette ont du mal à être mis en place dans un contexte pastoral avec une gestion de communs à une échelle territoriale. De plus, pour ces travaux, il est compliqué de faire ces mesures sur de nombreuses années pour voir les impacts de la variabilité interannuelle.

Une approche par modélisation pourrait permettre de tester ces interactions et de faire le lien entre un modèle biologique et un modèle de gestion.

Sur l'hétérogénéité spatiale, une ANR a été déposée en 2022 puis de nouveau en 2023 pour avancer sur ces questions GSH-images [Ppa3]. Dans cette ANR, les unités impliquées sont les unités SELMET AMAP, UREP et EVA.

Modélisation spatiale des couverts herbacés

Il existe de nombreuses approches de modélisation : modélisations statistiques se basant sur des données empiriques ou une modélisation mécanistique pour laquelle les processus sont décrits par des équations et les paramètres de ces équations sont ajustés aux données (Van Oijen et al. 2018)

Dans cette partie on évoquera surtout les modèles mécanistiques. En fonction des objectifs, différents modèles peuvent être implémentés. On peut les séparer en deux grands types de modèles:

- Modèle « écosystèmes » /Biogeochemical ou encore Soil Plant Atmosphere model.

Le but de ces modèles est d'évaluer les flux entre le sol, les plantes et l'atmosphère. On peut modéliser à la fois les flux de carbone, d'azote et d'eau. Ces modèles sont souvent utilisés pour prédire la quantité de biomasse disponible pour les animaux. Des nombreuses autres variables sont liées aux services et cycles biogéochimiques (émission de GES, carbone séquestration, flux d'eau). Dans ces modèles, la végétation est souvent considérée comme uniforme sans prendre en compte la diversité. De plus en plus, de travaux essayent de prendre en compte la diversité (Van Oijen et al. 2020). Des modèles existent pour les zones arides avec différents types d'approches, certains se focalisent sur une strate sur les herbacées (Lo Seen et al. 1995, Mougin et al. 1995) ou les pérennes (Gong et al. 2016). L'interaction entre les deux strates est un des enjeux forts de la modélisation en particulier dans le cadre d'agroforesterie ou syvlopastoralisme (Vezy et al. 2020). Ces modèles intègrent parfois une modélisation de l'activité humaine comme le pâturage (Diawara et al. 2018, Lohmann et al. 2018).

- Modèle « communautés »

Ces modèles aident à comprendre les assemblages d'espèces dans les communautés. Ces modèles peuvent reposer sur des modèles de démographie des différentes espèces de plantes (Wu and Levin 1994). Dans certains modèles, les différentes espèces ont des paramètres différents et leur présence est liée à la présence potentielle de différentes niches écologiques qui permettrait la coexistence des espèces (Loreau 2010).

Certains modèles reposent sur la théorie neutre (Hubbell 2001). Dans cette théorie neutre, les espèces ont des caractéristiques écologiques similaires et ne sont en concurrence que pour l'espace avec une prise en compte des processus stochastiques dans l'installation des individus. Pour finir, certains modèles réutilisent le concept de filtres écologiques de Keddy (1992) et les traits fonctionnels des espèces pour modéliser les communautés d'annuelles en fonction de l'environnement (Metcalfé et al. 2020).

Il existe une multitude de modèles pour les pâturages avec des objectifs très différents.

Modélisation spatialisée des communautés herbacées annuelles des zones arides.

Dans le cadre de mon projet de recherche, j'aimerais explorer différents aspects que la modélisation peut apporter. L'objectif global sera de pouvoir modéliser les interactions entre les pâturages et les pratiques de gestions selon différents climats.

On peut émettre différentes hypothèses pour faire ce modèle.

Il existe une variation de la réponse des communautés herbacées en fonction du régime des pluies au cours de l'année et de la saison. Bien sûr, la quantité de pluie sur la saison est un facteur important pour la croissance de la végétation mais aussi la première partie de mon projet de recherche sur les suivis participatifs de la végétation des parcours pourrait fournir des données permettant de comprendre les réponses des plantes à ces variations de climat.

Dans la partie précédente, nous avons fait l'hypothèse que l'hétérogénéité spatiale est un point central pour étudier les impacts des pratiques que ce soient les pâturages ou la plantation. Il serait intéressant d'utiliser/développer un modèle spatialisé avec des résolutions similaires ou proches des images drones. On pourrait utiliser l'imagerie drone pour valider/ paramétrer les modèles. Il ne serait pas forcément nécessaire de faire une validation pixel par pixel mais de comparer les patterns spatiaux observés et modélisés.

Une des hypothèses qui pourrait être testée par la modélisation est de voir l'importance des processus aléatoires dans les patterns spatiaux de la végétation liée à la germination et la dispersion. Les espèces annuelles ayant un cycle court, on peut supposer que les interactions de compétitions entre elles sont moins importantes que dans les prairies de pérennes. De plus, l'intégralité des communautés annuelles partent de graines au début des pluies. Les communautés d'espèces annuelles sont donc un objet d'étude intéressant pour étudier les processus démographiques.

Pour finir on pourrait supposer que les espèces annuelles des pâturages arides sont en compétition principalement pour l'espace. Ceci pourrait se modéliser par le fait que lorsqu'une zone est déjà occupée par une espèce, les nouvelles germinations ne sont plus possibles en dessous.

La zone d'étude peut être sous divisée en de nombreuses petites zones élémentaires (par exemple 1 cm²). L'hypothèse de base est qu'un seul individu herbacé peut pousser dans une zone. De la banque de graines, la germination induit une plantule qui se développe en fonction

du climat, du sol et éventuellement de la présence des pérennes. Cette plantule passe dans une phase de croissance avec un taux de croissance dépendant aussi du climat, du sol et de l'impact d'une pérenne. Si les conditions sont réunies, la plante commence sa floraison jusqu'à la fructification et sa sénescence. L'individu mort se décompose jusqu'à ce que la case soit de nouveau inoccupée et qu'une germination, si les conditions sont encore favorables, puisse se déclencher.

Il faut coupler ce modèle avec un modèle de comportement animal (Baumont et al. 2004) au pâturage qui permettrait de modéliser les prélèvements sur les plantes.

D'une manière similaire, ce modèle pourrait être couplé à un modèle de croissance et de fonctionnement des pérennes (prélèvement en eau, transfert de fertilité) pour notamment bien moduler les interactions pérennes-herbacées. Dans notre modèle de communauté herbacée, nous pourrions rajouter les plantules des pérennes et essayer de modéliser la régénération des pérennes.

Ce modèle avec une échelle spatiale fine a pour but de bien comprendre les dynamiques des communautés herbacées annuelles et de voir l'impact des pratiques de pâturage et des pérennes.

Cette partie pourra se faire avec collaboration avec l'UMR UREP et l'UMR AMAP. Sur la modélisation des pâturages, 4 projets ont été soumis (PAM AgroAfrique [PCa3], MOD-SPAH [Ppa1], Save Water [Pca1] et GSH -image [Ppa2]).

Intégration des modèles des écosystèmes dans les territoires pastoraux.

A la différence de la gestion d'élevage en ranching (parcelle privée gérée), le pastoralisme repose sur la mobilité de troupeaux dans des espaces communs pour exploiter les ressources pastorales. Les pratiques de gestion sont surtout décidées à des échelles des troupeaux et non à l'échelle des parcelles des pâturages. Il est donc nécessaire d'avoir une échelle territoriale pour pouvoir tester des pratiques alternatives.

Des modèles à l'échelle des territoires sont proposés pour les espaces pastoraux pour comprendre leur mobilité (Jahel et al. 2019), évaluer la multifonctionnalité des espaces pastoraux (Ickowicz et al. 2022) et les possibilités d'organisation sociale et les services écosystémiques des plantations au niveau de la grande muraille verte (Cesaro et al. 2022).

Ces modèles sont le plus souvent des modèles de territoires avec de la modélisation multi-agents. Dans ces modèles le plus souvent spatialisés, on a des propriétés dans chaque zone de l'espace (par exemple des ressources pastorales) et des agents mobiles qui interagissent entre eux et avec les différentes zones de l'espace (typiquement les troupeaux et les éleveurs) (Jahel et al. 2019). Dans les modèles territoires pastoraux, la croissance de la végétation pastorale n'est généralement pas modélisée.

Ces modèles territoires pourraient être intégrés avec un modèle d'écosystèmes pour voir les interactions entre les pratiques de gestion au niveau des troupeaux et du territoire.

Parmi les acteurs qui pourraient être modélisés, on aurait les différents éleveurs (sédentaires mais mobiles) et les éleveurs transhumants qui viennent d'autres territoires et qui s'installent temporairement dans le territoire. Dans le territoire il y a d'autres acteurs comme les gestionnaires des points d'eau et les potentielles plantations /zones de régénération et leurs gérants. Il y a aussi d'autres acteurs potentiels comme les cueilleurs ou les personnes impliquées dans les filières issues des produits animaux.

Différents options et stratégies de ces différents acteurs :

- Pour les éleveurs, les questions des stratégies de pâturages :
 - o Pâturages collectifs versus pâturages privatifs .
 - o avec un berger ou pâturage libre .
 - o Durant les pluies, concentrer les animaux sur des zones ou au contraire essayer de pâturer légèrement des surfaces plus importantes .
 - o La fauche de l'herbe pour faire des réserves de fourrage..
 - o L'interactions entre éleveurs sédentaires et éleveurs transhumants et les choix des zones de pâturages entre ces deux types d'éleveurs.
- Les questions autour de systèmes d'élevage
 - o La stratégie d'alimentation avec l'utilisation ou non de complémentation . On peut émettre l'hypothèse qu'une complémentation plus importante pourrait diminuer la pression de pâturage.
 - o L'équilibre entre grands ruminants et petits ruminants et la gestion de la démographie animale (limitation du cheptel avec intensification individuelle)
- La gestion des points d'eau avec la question de la multiplication des points d'eau ou au contraire une concentration des points d'eau.
- La gestion des zones de régénération / plantations.
 - o En plus des pratiques de plantations, il faut aussi s'intéresser à la gouvernance de ces espaces en particulier en interactions avec les éleveurs. Est-ce que les éleveurs ont accès aux ressources dans les zones de plantations ? Uniquement via une fauche ou via du pâturage ? On peut émettre l'hypothèse que le pâturage

durant la saison avec des pluies pourrait consommer uniquement les annuelles et réduire la compétition avec les plantes pérennes.

Ce modèle territorial pourrait permettre ainsi de tester les différentes pratiques possibles pour une gestion agro écologique des territoires.

Un des intérêts de ces types de modèles est aussi de faire de la modélisation d'accompagnement(ComMod 2005). Les modèles et leurs résultats sont utilisés pour échanger avec les acteurs locaux et leur permettre de tester des scénarios.

Des collaborations avec l'UMR TETIS et l'UMR SENS pourraient se faire sur cette partie tout en travaillant en lien avec les géographes de SELMET..
Une partie de ces travaux avait été soumise dans le cadre de l'ANR GR²D² [Ppn12] et [Ppn13]

Conclusions

Mes travaux ont porté sur l'analyse des communautés végétales des pâturages sous différentes latitudes et types de végétation. Une des caractéristiques de mes travaux est de souvent mobiliser des nouveaux outils et approches pour permettre de répondre à mes questions. Ces différents outils peuvent être regroupés sous l'appellation d'outils numériques. J'ai commencé à travailler sur la réutilisation de données historiques en utilisant différents outils d'analyse de données. En parallèle, je me suis intéressé aux outils de la télédétection, en particulier au drone et à la photogrammétrie

Mon projet de recherche se porte dans la continuité de mes travaux de recherches passés mais en essayant de remobiliser ces outils pour répondre à des questions d'écologie. Par exemple, utiliser les données historiques pour comprendre la réponse des espèces au changement climatique. Autre exemple, l'usage du drone pouvant permettre d'évaluer l'hétérogénéité spatiale des herbacées et de mieux appréhender les patterns spatiaux.

Mon activité de recherche a reposé sur les travaux de très nombreux étudiants, en particulier des étudiants de niveau master. Le passage de cette HDR me permettra de proposer à davantage de ces étudiants une poursuite en thèse en ayant la possibilité de la diriger et de m'autonomiser sur l'encadrement de ces étudiants. Des demandes de financement ont été déjà déposées pour nourrir mon projet de recherche et le passage de cette HDR pourrait faciliter l'obtention de ces financements.

Références

- Adler, P., D. Raff, and W. Lauenroth. 2001. The effect of grazing on the spatial heterogeneity of vegetation. *Oecologia* **128**:465-479.
- Akiyama, T., and K. Kawamura. 2007. Grassland degradation in China: methods of monitoring, management and restoration. *Grassland science* **53**:1-17.
- Akpo, L., M. Banoin, and M. Grouzis. 2003. Effet de l'arbre sur la production et la qualité fourragères de la végétation herbacée: bilan pastoral en milieu sahélien. *Revue de médecine vétérinaire* **154**:619-628.
- Allen, V. G., C. Batello, E. Berretta, J. Hodgson, M. Kothmann, X. Li, J. McIvor, J. Milne, C. Morris, and A. Peeters. 2011. An international terminology for grazing lands and grazing animals. *Grass and forage science* **66**:2-28.
- Arazy, O., and D. Malkinson. 2021. A framework of observer-based biases in citizen science biodiversity monitoring: semi-structuring unstructured biodiversity monitoring protocols. *Frontiers in Ecology and Evolution* **9**:693602.
- Assouma, M., P. Lecomte, P. Hiernaux, A. Ickowicz, C. Corniaux, V. Decruyenaere, A. Diarra, and J. Vayssières. 2018a. How to better account for livestock diversity and fodder seasonality in assessing the fodder intake of livestock grazing semi-arid sub-Saharan Africa rangelands. *Livestock Science* **216**:16-23.
- Assouma, M. H., P. Hiernaux, P. Lecomte, A. Ickowicz, M. Bernoux, and J. Vayssières. 2018b. Contrasted seasonal balances in a Sahelian pastoral ecosystem result in a neutral annual carbon balance. *Journal of Arid Environments*.
- Bailey, D. W., B. Dumont, and M. F. Wallisdevries. 1998. Utilization of heterogeneous grasslands by domestic herbivores: theory to management. Pages 321-333 *in* *Annales de Zootechnie*.
- Barbier, N. S. 2006. Interactions spatiales et auto-organisation des végétations semi-arides.
- Barbosa, B., G. Ferraz, L. Gonçalves, D. Marin, D. Maciel, P. Ferraz, and G. Rossi. 2019. RGB vegetation indices applied to grass monitoring: a qualitative analysis. *Agronomy Research* **17**:349-357.
- Baumont, R., D. Cohen-Salmon, S. Prache, and D. Sauvant. 2004. A mechanistic model of intake and grazing behaviour in sheep integrating sward architecture and animal decisions. *Animal Feed Science and Technology* **112**:5-28.
- Bayat, M., H. Burkhart, M. Namiranian, S. K. Hamidi, S. Heidari, and M. Hassani. 2021. Assessing biotic and abiotic effects on biodiversity index using machine learning. *Forests* **12**:461.
- Bengtsson, J., J. Bullock, B. Egoh, C. Everson, T. Everson, T. O'Connor, P. O'Farrell, H. Smith, and R. Lindborg. 2019. Grasslands—more important for ecosystem services than you might think. *Ecosphere* **10**:e02582.
- Berry, N. R., M. R. Scheeder, F. Sutter, T. F. Kröber, and M. Kreuzer. 2000. The accuracy of intake estimation based on the use of alkane controlled-release capsules and faeces grab sampling in cows. Pages 1-3 *in* *Annales de Zootechnie*. EDP Sciences.
- Bloor, J. M., A. Tardif, and J. Pottier. 2020. Spatial heterogeneity of vegetation structure, plant N pools and soil N content in relation to grassland management. *Agronomy* **10**:716.
- Bocquier, F., N. Debus, A. Lurette, C. Maton, G. Viudes, C. Moulin, and M. Jouven. 2014. Elevage de précision en systèmes d'élevage peu intensifiés. *INRAE Productions Animales* **27**:101-112.
- Bonari, G., K. Fajmon, I. Malenovský, D. Zelený, J. Holuša, I. Jongepierová, P. Kočárek, O. Konvička, J. Uříčář, and M. Chytrý. 2017. Management of semi-natural grasslands benefiting both plant and insect diversity: the importance of heterogeneity and tradition. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **246**:243-252.

- Bonnet, P., A. Joly, J. M. Faton, S. Brown, D. Kimiti, B. Deneu, M. Servajean, A. Affouard, J. C. Lombardo, and L. Mary. 2020. How citizen scientists contribute to monitor protected areas thanks to automatic plant identification tools. *Ecological Solutions and Evidence* **1**:e12023.
- Botella, C., A. Joly, P. Bonnet, P. Monestiez, and F. Munoz. 2018. Species distribution modeling based on the automated identification of citizen observations. *Applications in plant sciences* **6**:e1029.
- Breiman, L. 2001. Random Forests. *Machine Learning* **45**:5-32.
- Breiman, L., J. Friedman, C. J. Stone, and R. A. Olshen. 1984. *Classification and Regression Trees*. Wadsworth.
- Campbell, N., J. Peacock, and K. L. Bacon. 2023. A repeatable scoring system for assessing Smartphone applications ability to identify herbaceous plants. *PLoS ONE* **18**:e0283386.
- Capolupo, A., L. Kooistra, C. Berendonk, L. Boccia, and J. Suomalainen. 2015. Estimating plant traits of grasslands from UAV-acquired hyperspectral images: a comparison of statistical approaches. *ISPRS International Journal of Geo-Information* **4**:2792-2820.
- Cesaro, J.-D., E. Delay, T. Mbaye, and S. Taugourdeau. 2022. Modélisation territoriale de la Grande Muraille verte: un enjeu d'évaluation et de prospective.
- ComMod, C. 2005. La modélisation comme outil d'accompagnement. *Natures sciences sociétés* **13**:165-168.
- Cornelissen, J. H. C., S. Lavorel, E. Garnier, S. Diaz, N. Buchmann, D. E. Gurvich, P. B. Reich, H. Ter Steege, H. D. Morgan, M. G. A. Van Der Heijden, J. G. Pausas, and H. Poorter. 2003. A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany* **51**:335-380.
- de Bello, F., S. Lavorel, S. Diaz, R. Harrington, J. H. C. Cornelissen, R. D. Bardgett, M. P. Berg, P. Cipriotti, C. K. Feld, D. Hering, P. M. da Silva, S. G. Potts, L. Sandin, J. P. Sousa, J. Storkey, D. A. Wardle, and P. A. Harrison. 2010. Towards an assessment of multiple ecosystem processes and services via functional traits. *Biodiversity and Conservation* **19**:2873-2893.
- Dembélé, M., and S. J. Zwart. 2016. Evaluation and comparison of satellite-based rainfall products in Burkina Faso, West Africa. *International Journal of Remote Sensing* **37**:3995-4014.
- Densambuu, B., T. Indree, A. Battur, and S. Sainnemekh. 2018. State and transition models of Mongolian rangelands. MNF o. PU Groups, editor. TEPE, Ulaanbaatar, Mongolia.
- Diawara, M. O., P. Hiernaux, E. Mougin, M. Grippa, C. Delon, and H. S. Diakit. 2018. Effets de la pâture sur la dynamique de la végétation herbacée au Sahel (Gourma, Mali): une approche par modélisation. *Cahiers Agricultures* **27**:15010.
- Diaz, S., I. Noy-Meir, and M. Cabido. 2001. Can grazing response of herbaceous plants be predicted from simple vegetative traits? *Journal of Applied Ecology* **38**:497-508.
- Diouf, A., N. Barbier, A. Mahamane, J. Lejoly, M. Saadou, and J. Bogaert. 2010. Caractérisation de la structure spatiale des individus ligneux dans une «brousse tachetée» au sud-ouest du Niger. *Canadian journal of Forest research* **40**:827-835.
- Dixon, R., and D. Coates. 2005. The use of faecal NIRS to improve nutritional management of cattle in northern Australia. *Recent Advances in Animal Nutrition in Australia* **15**:65-75.
- Fromm, M., M. Schubert, G. Castilla, J. Linke, and G. McDermid. 2019. Automated detection of conifer seedlings in drone imagery using convolutional neural networks. *Remote Sensing* **11**:2585.
- Fuls, E. 1992. Semi-arid and arid rangelands: a resource under siege due to patch-selective grazing. *Journal of Arid Environments* **22**:191-193.

- Gallmann, J., B. Schüpbach, K. Jacot, M. Albrecht, J. Winizki, N. Kirchgessner, and H. Aasen. 2022. Flower mapping in grasslands with drones and deep learning. *Frontiers in plant science* **12**:774965.
- Garnier, E., J. Cortez, G. Billas, M. L. Navas, C. Roumet, M. Debussche, G. Laurent, A. Blanchard, D. Aubry, A. Bellmann, C. Neill, and J. P. Toussaint. 2004. Plant functional markers capture ecosystem properties during secondary succession. *Ecology* **85**:2630-2637.
- Gaujour, E., B. Amiaud, C. Mignolet, and S. Plantureux. 2012. Factors and processes affecting plant biodiversity in permanent grasslands. A review. *Agronomy for Sustainable Development* **32**:133-160.
- Geipel, J., A. K. Bakken, M. Jørgensen, and A. Korsæth. 2021. Forage yield and quality estimation by means of UAV and hyperspectral imaging. *Precision Agriculture* **22**:1437-1463.
- Goëau, H., P. Bonnet, A. Joly, A. Affouard, V. Bakic, J. Barbe, S. Dufour, S. Selmi, I. Yahiaoui, and C. Vignau. 2014. PI@ ntnet mobile 2014: Android port and new features. Page 527 *in* Proceedings of international conference on multimedia retrieval. ACM.
- Gómez-Candón, D., N. Virlet, S. Labbé, A. Jolivot, and J.-L. Regnard. 2016. Field phenotyping of water stress at tree scale by UAV-sensed imagery: new insights for thermal acquisition and calibration. *Precision Agriculture* **17**:786-800.
- Gong, J., X. Jia, T. Zha, B. Wang, S. Kellomäki, and H. Peltola. 2016. Modeling the effects of plant-interspace heterogeneity on water-energy balances in a semiarid ecosystem. *Agricultural and forest meteorology* **221**:189-206.
- Grenzdörffer, G., A. Engel, and B. Teichert. 2008. The photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **31**:1207-1214.
- Hanrahan, L., A. Geoghegan, M. O'Donovan, V. Griffith, E. Ruelle, M. Wallace, and L. Shalloo. 2017. PastureBase Ireland: A grassland decision support system and national database. *Computers and electronics in agriculture* **136**:193-201.
- Hanrahan, L., A. Geoghegan, M. O'Donovan, V. Griffith, M. Wallace, and L. Shalloo. 2015. PastureBase Ireland—a National Grassland database for Ireland. *Grassland and forages in high output dairy farming systems*:227.
- Hector, A., B. Schmid, C. Beierkuhnlein, M. C. Caldeira, M. Diemer, P. G. Dimitrakopoulos, J. A. Finn, H. Freitas, P. S. Giller, J. Good, R. Harris, P. Hogberg, K. Huss-Danell, J. Joshi, A. Jumpponen, C. Körner, P. W. Leadley, M. Loreau, A. Minns, C. P. H. Mulder, G. O'Donovan, S. J. Otway, J. S. Pereira, A. Prinz, D. J. Read, M. Scherer-Lorenzen, E. D. Schulze, A. S. D. Siamantziouras, E. M. Spehn, A. C. Terry, A. Y. Troumbis, F. I. Woodward, S. Yachi, and J. H. Lawton. 1999. Plant diversity and productivity experiments in European grasslands. *Science* **286**:1123-1127.
- Hodgson, J., D. Clark, and R. Mitchell. 1994. Foraging behavior in grazing animals and its impact on plant communities. Forage quality, evaluation and utilization. *Lincoln: American Society of Agronomy*:796-827.
- Hooper, D. U., F. S. Chapin, J. J. Ewel, A. Hector, P. Inchausti, S. Lavorel, J. H. Lawton, D. M. Lodge, M. Loreau, S. Naeem, B. Schmid, H. Setälä, A. J. Symstad, J. Vandermeer, and D. A. Wardle. 2005. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: A consensus of current knowledge. *Ecological monographs* **75**:3-35.
- Hubbell, S. P. 2001. *A Unified Neutral Theory of Biodiversity and Biogeography*. Princeton University Press., Princeton, NJ.
- Ickowicz, A., B. Hubert, M. Blanchard, V. Blanfort, J. D. Cesaro, A. Diaw, J. Lasseur, L. Thi Thanh Huyen, L. Li, and R. M. Mauricio. 2022. Multifunctionality and diversity of

- livestock grazing systems for sustainable food systems throughout the world: Are there learning opportunities for Europe? *Grass and forage science* **77**:282-294.
- Jahel, C., M. H. Assouma, S. Taugourdeau, P. degenne, M. castets, D. Lo Seen, R. Sy, D. Diop, J. Bourgoïn , and A. D. Camara. 2019. How to model moving farming systems? The case of transhumant breeders in northern Senegal. Page about 2019 Farming system design, Montevideo.
- Jerrentrup, J. S., N. Wrage-Mönnig, K. U. Röver, and J. Isselstein. 2014. Grazing intensity affects insect diversity via sward structure and heterogeneity in a long-term experiment. *Journal of Applied Ecology* **51**:968-977.
- Kattge, J., G. Bönisch, S. Díaz, S. Lavorel, I. C. Prentice, P. Leadley, S. Tautenhahn, G. D. Werner, T. Aakala, and M. Abedi. 2020. TRY plant trait database–enhanced coverage and open access. *Global change biology*.
- Kattge, J., S. Diaz, S. Lavorel, C. Prentice, P. Leadley, G. Bonisch, E. Garnier, M. Westoby, P. B. Reich, I. J. Wright, J. H. C. Cornelissen, C. Violle, S. P. Harrison, P. M. van Bodegom, M. Reichstein, B. J. Enquist, N. A. Soudzilovskaia, D. D. Ackerly, M. Anand, O. Atkin, M. Bahn, T. R. Baker, D. Baldocchi, R. Bekker, C. C. Blanco, B. Blonder, W. J. Bond, R. Bradstock, D. E. Bunker, F. Casanoves, J. Cavender-Bares, J. Q. Chambers, F. S. Chapin, J. Chave, D. Coomes, W. K. Cornwell, J. M. Craine, B. H. Dobrin, L. Duarte, W. Durka, J. Elser, G. Esser, M. Estiarte, W. F. Fagan, J. Fang, F. Fernandez-Mendez, A. Fidelis, B. Finegan, O. Flores, H. Ford, D. Frank, G. T. Freschet, N. M. Fyllas, R. V. Gallagher, W. A. Green, A. G. Gutierrez, T. Hickler, S. I. Higgins, J. G. Hodgson, A. Jalili, S. Jansen, C. A. Joly, A. J. Kerkhoff, D. Kirkup, K. Kitajima, M. Kleyer, S. Klotz, J. M. H. Knops, K. Kramer, I. Kuhn, H. Kurokawa, D. Laughlin, T. D. Lee, M. Leishman, F. Lens, T. Lenz, S. L. Lewis, J. Lloyd, J. Llusia, F. Louault, S. Ma, M. D. Mahecha, P. Manning, T. Massad, B. E. Medlyn, J. Messier, A. T. Moles, S. C. Muller, K. Nadrowski, S. Naeem, U. Niinemets, S. Nollert, A. Nuske, R. Ogaya, J. Oleksyn, V. G. Onipchenko, Y. Onoda, J. Ordonez, G. Overbeck, W. A. Ozinga, S. Patino, S. Paula, J. G. Pausas, J. Penuelas, O. L. Phillips, V. Pillar, H. Poorter, L. Poorter, P. Poschlod, A. Prinzing, R. Proulx, A. Rammig, S. Reinsch, B. Reu, L. Sack, B. Salgado-Negre, J. Sardans, S. Shiodera, B. Shipley, A. Siefert, E. Sosinski, J. F. Soussana, E. Swaine, N. Swenson, K. Thompson, P. Thornton, M. Waldram, E. Weiher, M. White, S. White, S. J. Wright, B. Yguel, S. Zaehle, A. E. Zanne, and C. Wirth. 2011. TRY - a global database of plant traits. *Global change biology* **17**:2905-2935.
- Keddy, P. A. 1992. Assembly and response rules: two goals for predictive community ecology. *Journal of Vegetation Science* **3**:157-164.
- Keshavarzi, H., C. Lee, M. Johnson, D. Abbott, W. Ni, and D. L. Campbell. 2021. Validation of real-time kinematic (RTK) devices on sheep to detect grazing movement leaders and social networks in merino ewes. *Sensors* **21**:924.
- Klinger, Y. P., R. L. Eckstein, and T. Kleinebecker. 2023. iPhenology: Using open-access citizen science photos to track phenology at continental scale. *Methods in Ecology and Evolution*.
- Laliberté, E., L. P., and B. Shipley. 2014. FD: measuring functional diversity from multiple traits, and other tools for functional ecology. Page R package
- Le Houerou, H. N. 1980. The rangelands of the Sahel. *Journal of Range Management*:41-46.
- Lo Seen, D., E. Mougin, S. Rambal, A. Gaston, and P. Hiernaux. 1995. A regional Sahelian grassland model to be coupled with multispectral satellite data. II: Toward the control of its simulations by remotely sensed indices. *Remote Sensing of Environment* **52**:194-206.

- Lohmann, D., T. Guo, and B. Tietjen. 2018. Zooming in on coarse plant functional types—simulated response of savanna vegetation composition in response to aridity and grazing. *Theoretical Ecology* **11**:161-173.
- Loreau, M. 2010. From populations to ecosystems: Theoretical foundations for a new ecological synthesis (MPB-46). Princeton University Press.
- Lussem, U., A. Bolten, J. Menne, M. L. Gnyp, J. Schellberg, and G. Bareth. 2019. Estimating biomass in temperate grassland with high resolution canopy surface models from UAV-based RGB images and vegetation indices. *Journal of Applied Remote Sensing* **13**:034525.
- Maestre, F. T., Y. Le Bagousse-Pinguet, M. Delgado-Baquerizo, D. J. Eldridge, H. Saiz, M. Berdugo, B. Gozalo, V. Ochoa, E. Guirado, and M. García-Gómez. 2022. Grazing and ecosystem service delivery in global drylands. *Science* **378**:915-920.
- Mason, N. W. H., D. Mouillot, W. G. Lee, and J. B. Wilson. 2005. Functional richness, functional evenness and functional divergence: the primary components of functional diversity. *Oikos* **111**:112-118.
- McGill, B. J., B. J. Enquist, E. Weiher, and M. Westoby. 2006. Rebuilding community ecology from functional traits. *Trends in ecology & evolution* **21**:178-185.
- McKinnon, T., and P. Hoff. 2017. Comparing RGB-based vegetation indices with NDVI for drone based agricultural sensing. *Agribotix. Com*:1-8.
- Mesbahi, G., C. Bayeur, A. Michelot-Antalik, and S. Plantureux. 2019. Quelles typologies pour la prédiction des propriétés des prairies permanentes? *Fourrages*:57-65.
- Metcalf, H., A. E. Milne, F. Deledalle, and J. Storkey. 2020. Using functional traits to model annual plant community dynamics. *Ecology* **101**:e03167.
- Michaud, A., S. Plantureux, B. Amiaud, P. Carrère, P. Cruz, M. Duru, B. Dury, A. Farruggia, J. L. Fiorelli, E. Kerneis, and R. Baumont. 2012. Identification of the environmental factors which drive the botanical and functional composition of permanent grasslands. *The Journal of Agricultural Science* **150**:219-236.
- Miehe, S., J. Kluge, H. Von Wehrden, and V. Retzer. 2010. Long-term degradation of Sahelian rangeland detected by 27 years of field study in Senegal. *Journal of Applied Ecology* **47**:692-700.
- Mougin, E., D. Lo Seen, S. Rambal, A. Gaston, and P. Hiernaux. 1995. A regional Sahelian grassland model to be coupled with multispectral satellite data. I: Model description and validation. *Remote Sensing of Environment* **52**:181-193.
- Parsons, A. J., and B. Dumont. 2003. Spatial heterogeneity and grazing processes. *Animal research* **52**:161-179.
- Pérez-Harguindeguy, N., S. Díaz, E. Garnier, S. Lavorel, H. Poorter, P. Jaureguiberry, M. S. Bret-Harte, W. K. Cornwell, J. M. Craine, D. E. Gurvich, C. Urcelay, E. J. Veneklaas, P. B. Reich, L. Poorter, I. J. Wright, P. Ray, L. Enrico, J. G. Pausas, A. C. de Vos, N. Buchmann, G. Funes, F. Quétier, J. G. Hodgson, K. Thompson, H. D. Morgan, H. ter Steege, M. G. A. van der Heijden, L. Sack, B. Blonder, P. Poschlod, M. V. Vaieretti, G. Conti, A. C. Staver, S. Aquino, and J. H. C. Cornelissen. 2013. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany* **61**:167-234.
- Peter, M., P. J. Edwards, P. Jeanneret, D. Kampmann, and A. Lüscher. 2008. Changes over three decades in the floristic composition of fertile permanent grasslands in the Swiss Alps. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **125**:204-212.
- Peter, M., A. Gigon, P. J. Edwards, and A. Lüscher. 2009. Changes over three decades in the floristic composition of nutrient-poor grasslands in the Swiss Alps. *Biodiversity and Conservation* **18**:547-567.

- Plantureux, S., Carrère, P., Pottier, E. 2012. La prairie permanente : définitions et cadre réglementaire. . Journées de l'AFPF, Prairies permanentes: de nouveaux atouts pour demain., Paris.
- Plantureux, S., G. Thirion, R. Georgel, M.-J. Bellicam, J.-L. Parthonneau, and J.-M. Henry. 2012. La typologie des prairies du massif vosgien : un outil pour évaluer l'autonomie fourragère. . Journées de l'AFPF, Prairies permanentes : de nouveaux atouts pour demain.
- Reiner, F., M. Brandt, X. Tong, D. Skole, A. Kariryaa, P. Ciaï, A. Davies, P. Hiernaux, J. Chave, and M. Mugabowindekwe. 2023. More than one quarter of Africa's tree cover found outside areas previously classified as forest. *nature communication* **14**.
- Roupsard, O., A. Audebert, A. Ndour, C. Clermont-Dauphin, Y. F. U. Agbohessou, J. Sanou, J. Koala, E. Faye, L. Leroux, D. Sambakhe, C. Jourdan, G. le Maire, D. Sanogo, J. Seghieri, and L. Cournac. 2020. How far does the tree affect the crop in agroforestry? New spatial analysis methods in a *Faidherbia* parkland. *Agriculture, Ecosystem and Environment*.
- Sabatini, F. M., J. Lenoir, T. Hattab, E. A. Arnst, M. Chytrý, J. Dengler, P. De Ruffray, S. M. Hennekens, U. Jandt, and F. Jansen. 2021. sPlotOpen—An environmentally balanced, open-access, global dataset of vegetation plots. *Global Ecology and Biogeography* **30**:1740-1764.
- Scheile, T., J. Isselstein, and B. Tonn. 2018. Herbage biomass and uptake under low-input grazing as affected by cattle and sheep excrement patches. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **112**:277-289.
- Sorensen, L. 2007. A spatial analysis approach to the global delineation of dryland areas of relevance to the CBD Programme of work on dry and sub-humid lands. UNEP-WCMC: Cambridge, UK.
- Tagesson, T., R. Fensholt, F. Cropley, I. Guiro, S. Horion, A. Ehammer, and J. Ardö. 2015. Dynamics in carbon exchange fluxes for a grazed semi-arid savanna ecosystem in West Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **205**:15-24.
- Tilman, D. 2001. Functional Diversity. Pages 109-120 *in* Levin, editor. *Encyclopedia of biodiversity*. academic press, San Diego ,Ca.
- Van Oijen, M., Z. Barcza, R. Confalonieri, P. Korhonen, G. Kröel-Dulay, E. Lellei-Kovács, G. Louarn, F. Louault, R. Martin, and T. Moulin. 2020. Incorporating biodiversity into biogeochemistry models to improve prediction of ecosystem services in temperate grasslands: Review and roadmap. *Agronomy* **10**:259.
- Van Oijen, M., G. Bellocchi, and M. Höglind. 2018. Effects of climate change on grassland biodiversity and productivity: The need for a diversity of models. *Agronomy* **8**:14.
- Vezy, R., G. Le Maire, M. Christina, S. Georgiou, P. Imbach, H. G. Hidalgo, E. J. Alfaro, C. Blitz-Frayret, F. Charbonnier, and P. Lehner. 2020. DynACof: A process-based model to study growth, yield and ecosystem services of coffee agroforestry systems. *Environmental Modelling & Software* **124**:104609.
- Violle, C., M.-L. Navas, D. Vile, E. Kazakou, C. Fortunel, I. Hummel, and E. Garnier. 2007. Let the concept of trait be functional! *Oikos* **116**:882-892.
- Wright, I. J., P. B. Reich, M. Westoby, D. D. Ackerly, Z. Baruch, F. Bongers, J. Cavender-Bares, T. Chapin, J. H. C. Cornelissen, M. Diemer, J. Flexas, E. Garnier, P. K. Groom, J. Gulias, K. Hikosaka, B. B. Lamont, T. Lee, W. Lee, C. Lusk, J. J. Midgley, M. L. Navas, U. Niinemets, J. Oleksyn, N. Osada, H. Poorter, P. Poot, L. Prior, V. I. Pyankov, C. Roumet, S. C. Thomas, M. G. Tjoelker, E. J. Veneklaas, and R. Villar. 2004. The worldwide leaf economics spectrum. *Nature* **428**:821-827.
- Wu, J., and S. A. Levin. 1994. A spatial patch dynamic modeling approach to pattern and process in an annual grassland. *Ecological monographs* **64**:447-464.

- Zhang, H., P. Shi, G. Crucil, B. van Wesemael, Q. Limbourg, and K. Van Oost. 2021. Evaluating the capability of a UAV-borne spectrometer for soil organic carbon mapping in bare croplands. *Land Degradation & Development* **32**:4375-4389.
- Zhang, Y.-W., T. Wang, Y. Guo, A. Skidmore, Z. Zhang, R. Tang, S. Song, and Z. Tang. 2022. Estimating community-level plant functional traits in a species-rich alpine meadow using UAV image spectroscopy. *Remote Sensing* **14**:3399.
- Zhou, Y., B. Bomfim, W. J. Bond, T. W. Boutton, M. F. Case, C. Coetsee, A. B. Davies, E. C. February, E. F. Gray, L. C. R. Silva, J. L. Wright, and A. C. Staver. 2023. Soil carbon in tropical savannas mostly derived from grasses. *Nature Geoscience*.

Annexes

Liste des 9 publications jointes au dossier

1. [AI3]Taugourdeau Simon, Villerd Jean, Plantureux Sylvain, Huguenin-Elie Olivier, Amiaud Bernard. (2014). Filling the gap in functional trait databases: Use of ecological hypotheses to replace missing data. *Ecology and Evolution*, 4 (7): 944-958. <https://doi.org/10.1002/ece3.989>
2. [AI6]Taugourdeau Simon, Daget Philippe, Chatelain Cyrille, Mathieu Daniel, Juanès Xavier, Huguenin Johann, Ickowicz Alexandre. (2019.) FLOTROP, a massive contribution to plant diversity data for open ecosystems in northern tropical Africa. *Scientific Data*, 6:118, 8 p. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0120-8>
3. [AI10] Bossoukpe Marina, Faye Emile, Ndiaye Ousmane, Diatta S., Diatta Ousmane, Diouf A., Dendoncker Morgane, Assouma Mohamed Habibou, Taugourdeau Simon. (2021). Low-cost drones help measure tree characteristics in the Sahelian savanna. *Journal of Arid Environments*, 187:104449, 8 p.<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104449>
4. [AI13] Taugourdeau Simon, Diédhiou Antoine, Fassinou Cofélas, Bossoukpe Marina, Diatta Ousmane, N’Goran Ange, Audebert Alain, Ndiaye Ousmane, Diouf Abdoul Aziz, Tagesson Torbern, Fensholt Rasmus, Faye Emile. (2022). Estimating herbaceous aboveground biomass in Sahelian rangelands using Structure from Motion data collected on the ground and by UAV. *Ecology and Evolution*, 12 (5):e8867, 17 p.<https://doi.org/10.1002/ece3.8867>
5. [AI15] Dendoncker Morgane, Vincke Caroline, Bazan Samantha, Madingou Mady Parfait Noé, Taugourdeau Simon. (2023). The size of topographic depressions in a Sahelian savanna is a driver of woody vegetation diversity *Journal of Arid Environments* Volume 210, 104923 <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104923>
6. [AI16] Barnes Annaël, Ickowicz Alexandre, Cesaro, Jean-Daniel, Salgado Paulo, Rayot Véronique, Koldasbekova Sholpan, Taugourdeau Simon 2023 Improving biodiversity offset schemes through the identification of ecosystem services at a landscape level *Land* Volume 12 Issue 1 10.3390/land12010202
7. [AI17] Reiner Florian, Brandt Martin, Tong Xiaoye, Skole David, Ankit Kariryaa Philippe Ciais4, Andrew Davies5, Pierre Hiernaux, Jérôme Chave, Maurice Mugabowindekwe, Christian Igel, Stefan Oehmcke, Fabian Gieseke Sizhuo Li, Siyu Liu, Sassan Saatchi, Peter Boucher, Jenia Singh, Simon Taugourdeau, Morgane Dendoncker, Xiao-Peng Song, Ole Mertz, Compton J. Tucker, Rasmus Fensholt (2023) More than one quarter of Africa’s tree cover found outside areas previously classified as forest *Nature communications* 14, Article number: 2258 (2023) <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37880-4>
8. [AC6] Diatta Ousmane, Ndiaye Ousmane, Ngom Daouda, Diatta S., Fensholt Rasmus, Tagesson Torbern, Taugourdeau Simon. 2021. Réponses de la phytomasse herbacée aux fluctuations de la pluviométrie en milieu pâturé sahélien du Ferlo. *Fourrages* (246) : 97-105. <https://afpf-asso.fr/revue/non-thematique-263?a=2304>
9. [AC7]N’Goran Adjoua Ange-Jokébed, Diouf Abdoul Aziz, Diatta Sekouna, Assouma Mohamed Habibou, Djagoun Afolabi Juste, Assogba Gildas Geraud Comlan, Cournac Laurent, Chapuis-Lardy Lydie, Blanfort Vincent, Taugourdeau Simon. 2022. Variabilité des stocks de carbone du sol sous et hors houppier dans la zone sylvopastorale du Sénégal. *Revue d’Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux*, 75 (3) : 67-75. <https://doi.org/10.19182/remvt.36984>