



HAL
open science

Modélisation de la diversité des espèces végétales et des services écosystémiques rendus par les couverts prairiaux

Dehia Hadj Saadi

► To cite this version:

Dehia Hadj Saadi. Modélisation de la diversité des espèces végétales et des services écosystémiques rendus par les couverts prairiaux. Sciences de l'environnement. 2019. hal-04069229

HAL Id: hal-04069229

<https://hal.inrae.fr/hal-04069229>

Submitted on 14 Apr 2023

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

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

2018-2019

MASTER AETPF

Agrosciences, Environnement, Territoire, Paysage, Forêt

Parcours

ECOSAFE

**Modélisation de la diversité des espèces végétales et des services
écosystémiques rendus par les couverts prairiaux**

DEHIA HADJ SAADI

Mémoire de stage, soutenu à Nancy le 03/09/2019

Gianni, BELLOCCHI, Directeur de recherche UREP

Sylvain, PLANTUREUX, Professeur

**UMR 0874 Ecosystème prairial (UREP) – INRA, Site de Crouël
5 chemin de Beaulieu
63000 Clermont- Ferrand**

Remerciements

Je tiens à remercier toute l'équipe d'Italie qui a contribué à la réussite de mon stage : Roberto CONFALONIERI pour m'avoir accueilli dans son laboratoire, Ernes MOVEDI pour la formation au logiciel, son aide dans la démarche de modélisation et de calibration ainsi que l'interprétation des résultats, Sofia TARTARINI pour son aide dans la préparation des fichiers de configuration. Un remerciement très particulier à Gianni BELLOCCHI pour sa disponibilité, son apport précieux par le partage de ses connaissances et surtout son accueil familial et chaleureux. Je remercie aussi l'équipe de l'unité UREP pour son accueil chaleureux, Frédérique LOUAULT, Katja KLUMPP et Olivier DARSONVILLE pour avoir mis à ma disposition toutes les données dont j'avais besoin. Sans oublier mes amis(es) qui m'ont soutenu de près ou de loin durant ce stage, et enfin la cerise sur le gâteau, un remerciement très spécial, plein de reconnaissances à mes parents qui m'ont apporté leur soutien sans limites, du début de mes études à ce jour; que dieu leur prête bonne santé et longue vie.

Sommaire

I. Introduction	1
II. Etat de l'art	2
1- Les prairies : définition et types	2
2- Biodiversité prairiale et services écosystémiques	2
3- La modélisation prairiale	3
4- Choix et description des modèles	3
III. Question de recherche, hypothèse et objectifs de l'étude	4
IV. Matériels et méthodes	5
1- Sites d'étude.....	5
2- Bases de données.....	6
3- Simulations	7
4- Evaluation des sorties des modèles	9
V. Résultats et discussion	10
1- Analyse climatique des sites d'étude.....	10
2- Paramétrage des espèces.....	11
3- Comparaisons entre valeurs simulées et observées.....	15
VI. Conclusions	21
VII. Références bibliographiques	22

Annexes

Résumé

Liste des abréviations

CoSMo : *Community Simulation Model*

WOFOST : *World Food Studies*

CropSyst : *Cropping Systems Simulation Model*

AgMIP : *Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project*

UGB : Unité de Gros Bétail

Obs : Abondances relatives observée

Rec : Abondances relatives recalculés pour les espèces dominantes

R² : Coefficient de détermination

R : Coefficient de corrélation linéaire

AbsEF : Efficience de modélisation absolue

EF : Efficience de modélisation

RRMSE : Racine de l'erreur quadratique moyenne en pourcentage sur la moyenne des observations

RMAE : Erreur moyenne absolue en pourcentage sur la moyenne des observations

CRM : Coefficient de masse résiduelle

BT Dev : Température de base pour le développement

COT : Température d'arrêt du développement

RUE : Efficience d'utilisation du rayonnement solaire

SLA : Surface foliaire spécifique

WSI : Tolérance au stress hydrique

TBASEM : Température de base pour l'émergence

KDIFTB : Coefficient d'extinction pour la lumière visible diffuse

TMPFTB : Facteur de réduction d'assimilation maximale en fonction de la température moyenne

CGN : Susceptibilité au stress hydrique

AL : Préférence animale

LAI : Indice de surface foliaire

MaxH : Hauteur maximale

MaxRD : Profondeur maximale des racines

OpT : Température optimale

AMAX : Assimilation maximale de CO₂ par les feuilles

MEA : *Millenium Ecosystem Assessment*

CICES : Classification Internationale Commune des Services Écosystémiques

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

UREP : Unité Mixte de Recherche sur l'Écosystème Prairial

EFPA : Département Ecologie des Forêts, Prairies et milieux Aquatiques

I. Introduction

La surface occupée par les prairies permanentes (en place depuis cinq ans ou plus) en France est d'environ 9 millions d'hectares, soit environ un tiers de la surface agricole utile (Agreste, 2019). Les dernières décennies ont vu toutefois des changements dans l'utilisation/couverture des sols, avec une réduction des terres allouées aux prairies, qu'il soit en France et en Europe (Peyraud et al., 2012) ou dans différentes régions du monde (ex. Fakarayi et al., 2015 ; Munch et al., 2017 ; Schirpke et al., 2017 ; Gibson et al., 2018), et une diminution dramatique de la biodiversité prairiale. Il est reconnu que ces changements sont importants sur le plan socio-économique (Dunford et al., 2015) car le remplacement des pâturages et l'érosion de la biodiversité ne modifient pas seulement la continuité de la production fourragère qui soutient la production animale. Les prairies permanentes fournissent également un ensemble de services écosystémiques essentiels à nos sociétés (Loreau, 2010 ; Bengtsson et al., 2019) comme le stockage du carbone, la pollinisation et le maintien de l'esthétique générale des paysages (Tribot et al., 2018), réduisant en même temps les émissions anthropiques (Oertel et al., 2016). Les services pouvant être fournis par les prairies dépendent en partie de la diversité de leur composition floristique (Turnbull et al., 2016) et de leur grande biodiversité, composée non seulement de plantes, mais également de mammifères, d'arthropodes et de microorganismes (Plantureux et al., 2005 ; van Klink et al., 2015). Cette biodiversité soutient les services écosystémiques mais elle est également reconnue comme une assurance écologique et évolutive (d'après Yachi et Loreau, 1999) grâce à l'effet stabilisateur de la diversité des espèces sur les propriétés agrégées de l'écosystème à travers les fluctuations des espèces constitutives (changements phénotypiques, Norberg et al., 2001). La biodiversité végétale rendrait les prairies plus résistantes aux aléas et aux phénomènes météorologiques extrêmes (tels que les sécheresses prolongées, ex. Vogel et al., 2014 ; Craven et al., 2016), et serait en mesure de stabiliser la production fourragère et maintenir l'ensemble des services écosystémiques (Cleland, 2011). Il est donc essentiel de préserver ces espaces ouverts afin de préserver leur biodiversité et les services associés, mais également de les étudier pour mieux apprécier leur évolution sous différentes contraintes (Zeller et al., 2017). Les changements dans la diversité végétale reflètent en fait l'évolution de deux facteurs principaux (ex. Isselstein et al. 2005 ; Pontes et al., 2010, 2015) : les conditions environnementales (pédoclimat) et les pratiques de gestion (fauchage, fertilisation, pâturage, etc.). Particulièrement, l'apport d'azote peut diminuer le nombre d'espèces (Plantureux et al., 2005), alors que d'après les résultats d'une méta-analyse récente (Badeau et al., 2018), le réchauffement serait également un facteur important de perte de richesse en espèces, tandis que la fauche favoriserait la richesse en espèces par rapport à l'abandon.

Afin de mieux comprendre l'évolution des écosystèmes prairiaux et de leurs propriétés, il est donc primordial de mettre en relation les dynamiques de la diversité spécifique avec les facteurs du milieu et la gestion. Les modèles incorporant une vision mécaniste de ces processus qui se produisent au sein d'un système prairial, et englobant les interactions du système de façon dynamique (ex. van Oijen et al., 2018), fournissent une base solide pour étudier ces interactions, évaluer leur impact et tester le rôle de la gestion (ce que l'analyse des données empiriques ou une méta-analyse de la littérature ne font que partiellement). Aborder les dynamiques de la diversité végétale en utilisant des approches de modélisation peut donc aider à démêler les relations sous-jacentes à la composition et au fonctionnement des communautés, et ainsi mieux décrire les propriétés liées aux services qui en découlent. Grâce aux simulations réalisées avec des modèles il est possible de faire des prévisions sur le long terme de l'impact des changements environnementaux sur l'écosystème prairial ainsi que sur la contribution des prairies au stockage de carbone (ex. Graux et al, 2012, 2013). Toutefois, bien que des progrès majeurs en modélisation aient été faits au cours des dernières décennies, la simulation des cycles biophysiques et biogéochimiques en prairie reste disjointe de la dynamique des espèces végétales, avec une incertitude considérable dans la qualité des prédictions (van Oijen et al., 2018). Nous entendons ici faire avancer le paradigme de la modélisation systémique qui essaie de représenter la complexité des couverts prairiaux à travers l'introduction de règles d'adaptation des différentes espèces dans

une communauté (composante CoSMo, Confalonieri, 2014), règles qui n'ont été que partiellement évaluées jusqu'à présent (Movedi et al., 2019).

II. Etat de l'art

1- Les prairies : définition et types

De manière courante, le terme « prairie » couvre des assemblages de végétation très divers. En agriculture, la prairie renvoie à un peuplement herbacé majoritairement constituées de graminées et de légumineuses fourragères (Peyraud, 2019). Leur composition floristique est très variée selon différents facteurs (sol, climat, activités humaines). Dans le cadre de la Politique Agricole Commune de l'Union européenne (https://ec.europa.eu/agriculture/newsroom/155_en), une prairie permanente est considérée comme toute surface de production d'herbe, ou d'autres plantes fourragère, qui n'a pas été retournée (labourée) depuis au moins cinq ans. À l'inverse, les prairies temporaires sont représentées par toute surface de production d'herbe, ou d'autres plantes fourragères, qui sont présentes depuis moins de cinq ans. Dans les systèmes de production agricole on distingue trois grands types de prairies : naturelles, semi-naturelles et améliorées (Bullock et al., 2011 ; Lemaire et al., 2011). Les prairies dites naturelles présentent des cortèges floristiques diversifiés et spontanés, créés par des processus liés au climat, au feu et au pâturage de la faune (Parr et al., 2014). Même si elles sont qualifiées de naturelles, c'est le travail de l'homme qui les maintient (fauche, pâturage). Les prairies semi-naturelles sont le produit de la gestion humaine liée à l'exploitation agricole et elles nécessitent le pâturage du bétail ou la fauche pour leur entretien. Les prairies améliorées sont des surfaces d'herbe résultant du labour et du semis de variétés agricoles, ou de graminées non indigènes avec un potentiel de production élevé. Elles sont généralement gérées intensivement et fertilisées artificiellement (Bengtsson et al., 2019).

2- Biodiversité prairiale et services écosystémiques

La biodiversité concerne l'ensemble des êtres vivants, leurs interactions entre eux et avec leur milieu en considérant tous les niveaux d'organisation du vivant. Sa dynamique étant influencée par les pratiques de gestion, elle joue un rôle fondamental dans le fonctionnement des écosystèmes et la fourniture de services écosystémiques (Amiaud et Carrère, 2012). La notion de services écosystémique est détaillée en Annexe 1. Une composition floristique diversifiée à généralement un effet positif dans le maintien et la promotion des services écosystémiques liés aux prairies (ex. Quijas, 2012). Cet effet est souvent étudié en considérant la richesse spécifique des communautés végétales (Zavaleta et al., 2010). La richesse spécifique et la diversité fonctionnelle peuvent améliorer la stabilité et la résilience des écosystèmes prairiaux et ainsi augmenter la performance des processus écosystémiques et le maintien des services rendus (ex. Weiner et al., 2011 ; Bagella et al., 2013). De plus, l'utilisation de couverts végétaux mixtes permet de réduire l'apport en engrais minéraux sans perte de rendement par un effet de complémentarité, en même temps en augmentant la résistance aux espèces invasives (Amiaud et Carrère., 2012).

En général, l'augmentation de la biodiversité est bénéfique pour la fourniture de services écosystémiques (Badeau, 2018). Néanmoins, les mécanismes résultant de cette relation sont souvent méconnus (Marquard et al., 2009). Enfaite, le fonctionnement des écosystèmes et les services qui en découlent dépendent du nombre d'espèces et de leur nature, mais également du lien qu'il ya entre elles (Maire, 2009).

3- La modélisation prairiale

L'approche par modélisation a pris place dans les sciences naturelles depuis de longues années. En fait, la modélisation est indispensable pour comprendre, synthétiser, quantifier et prédire les effets cumulatifs de plusieurs facteurs environnementaux et de gestion sur les cultures (soit les cultures annuelles prises individuellement, ou en rotation, où bien les systèmes pérennes comme les prairies permanentes). Les modèles sont fondés sur des bases mathématiques de nature algorithmiques qui visent à représenter différents phénomènes sous des conditions environnementales et de gestion diverses. Dans un contexte de changements globaux, ils sont des outils essentiels pour projeter dans l'avenir l'évolution des écosystèmes. Les premiers modèles prenant en compte les effets de l'environnement et de la gestion sur les systèmes de culture utilisaient peu de paramètres. Cependant ils ne peuvent pas être appliqués facilement dans différentes conditions en raison de leurs limites (Colbach et al., 2005). De ce fait, un modèle qui intègre les effets du climat, le sol et la gestion, ainsi que leurs interactions, est nécessaire mais généralement ces modèles ne considèrent qu'une seule ou quelques espèces dominantes dans un couvert végétale (Gardarin et al., 2012). Au cours des dernières décennies la modélisation de cultures a été utilisée dans le domaine de la production prairiale afin de prédire les réponses des communautés prairiales et leur évolution face aux perturbations (Jette Reeg et al., 2018) et on désigne aujourd'hui deux grandes familles de modèles : les modèles centrés sur l'individu et les modèles qui considèrent le couvert comme une culture moyenne.

Les modèles du premier type coordonnent les processus physiologiques et morphologiques au niveau d'une plante individuelle et d'interactions entre celle-ci et d'autres plantes. Ils utilisent comme paramètres les caractéristiques fonctionnelles des plantes et visent l'acquisition et l'utilisation des ressources (ex. rayonnement solaire, azote), mais également l'effet des facteurs biotiques (diversité des communautés végétales) et abiotiques (climat, conditions de gestion dans les prairies : fauche, pâture, fertilisation) sur les dynamiques de la population végétale ainsi que le fonctionnement des cycles du carbone et de l'azote au sein de la communauté. Un exemple est le modèle GEMINI (Soussana et al., 2012).

Les modèles de culture analysent les interactions entre les plantes et les facteurs de la croissance végétale tels que le climat, le sol et la gestion, afin de représenter les dynamiques d'un couvert végétale moyen (Confalonieri et al., 2012). Ils sont largement utilisés pour simuler la croissance et le développement d'une culture sous conditions climatiques changeantes et pour estimer la réponse des systèmes agricoles aux événements climatiques extrêmes (Droutsas et al., 2019). C'est sur cette famille de modèles que nous portons notre attention. En particulier, WOFOST et CropSyst sont les deux modèles de culture que nous avons retenus dans cette étude.

4- Choix et description des modèles

CropSyst (*Cropping Systems Simulation Model*) est un modèle de simulation de cultures tournant au pas journalier, pouvant s'exécuter sur une large échelle spatio-temporelle (Stöckle et al., 2003). Il est conçu comme un outil analytique permettant d'étudier les effets du climat, des sols et de la gestion sur la productivité et l'environnement des systèmes de culture (Mangani et al., 2018). Le modèle simule le bilan hydrique du sol, le bilan azote sol-plante, la phénologie des cultures, la croissance des racines et le couvert végétal, la production de biomasse et le rendement des cultures, production et décomposition de résidus, érosion du sol par l'eau et salinité. Il fournit une vue globale du mécanisme et des multiples interactions générant les systèmes en développement. CropSyst estime la croissance des plantes à partir du minimum entre les valeurs de la matière sèche et la biomasse, en se basant sur la transpiration de l'eau et le rayonnement solaire intercepté.

WOFOST (*World Food Studies*) est un simulateur générique du potentiel de production d'une vaste gamme de cultures dans un large éventail de conditions météorologiques, de sol et de gestion (irrigation, apport d'engrais). De son premier développement à aujourd'hui, WOFOST a été continuellement modifié et appliqué pour des objectifs différents. Par exemple, van Diepen et al. (1989) ont utilisé le modèle dans le but de déterminer dans quelle mesure la production agricole est limitée par la lumière, l'humidité et les macronutriments. WOFOST modélisant la croissance des

cultures et le partitionnement de la biomasse produite dans les organes de la plante à partir de la différence entre assimilation du carbone et respiration, il a été également utilisé pour reproduire la croissance et le développement de cultures différentes (de Wit et al., 2012 ; Boogaard et al., 2013). Si le choix de WOFOST est motivé par l'intérêt porté à ce modèle dans le système de prévision du rendement des cultures du projet MARS (Monitoring Agricultural Resources, <https://ec.europa.eu/jrc/en/mars>) de la Commission européenne (Boogaard et al., 2013 ; Pagani et al., 2017 ; van der Velde et Nisini, 2019), CropSyst bénéficie d'une notoriété et d'une large gamme d'utilisation pour l'estimation du rendement agricole ou de variables environnementales (ex. Confalonieri et al., 2006 ; Sommer et al., 2008 ; Mangani et al., 2018), ainsi que dans les études d'impact (Tingem and Rivington, 2009 ; Finger et al., 2011 ; Bocchiola et al., 2013 ; Eitzinger et al., 2013 ; Sommer et al., 2013 ; Mangani et al., 2019).

Les deux modèles, CropSyst et WOFOST, ont également participé aux initiatives internationales (ex. AgMIP-*The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project*, Rosenzweig et al., 2013) visant à évaluer plusieurs modèles de cultures de manière comparative (ex. Palosuo et al., 2011; Asseng et al., 2013; Bassu et al., 2014).

III. Question de recherche, hypothèse et objectifs de l'étude

En intégrant les simulateurs de culture avec un modèle plurispécifique on peut parvenir à reproduire les caractéristiques morphologiques et physiologiques des espèces afin de simuler explicitement leur dynamique ainsi que leur productivité. Pour cela il est important de définir la question principale, à savoir : comment et selon quels critères, peut-on agencer un modèle de simulation biophysique avec des règles d'adaptation des différentes espèces dans un couvert prairial, afin de représenter dynamiquement leur présence sous diverses conditions de gestion et de contraintes environnementales ?

La composante informatique CoSMo (*Community Simulation Model*), développée au laboratoire CASSANDRA de l'Université de Milan en Italie pour la modélisation de plusieurs espèces dans un couvert végétal (Confalonieri, 2014), intègre le ré-calcul quotidien de la valeur des paramètres moyens d'une communauté végétale en simulant la dynamique de l'abondance relative des différentes espèces qui la composent en fonction de différents facteurs concernant le sol, le climat et la gestion. L'hypothèse centrale qui fonde cette approche est que la dynamique des espèces végétales dans un couvert prairial peut être explicitement représentée à partir de modèles simulant la prairie comme un couvert végétal moyen, à travers un ensemble de règles formalisant les principaux facteurs physiques, chimiques et biologiques qui contrôlent le fonctionnement des prairies. En traduisant la notion d'adaptabilité de Confalonieri et al. (2013), cette approche vise à proposer des solutions concrètes à la modélisation prairiale plurispécifique grâce au couplage de CoSMo aux modèles de simulation de la croissance et du développement des cultures, dont CropSyst et WOFOST sont la concrétisation courante. Les nouvelles solutions de modélisation CropSyst-CoSMo et WOFOST-CoSMo ont fait l'objet d'une évaluation avec des jeux de données issues de mesures réalisées sur trois communautés dans un système prairial fauché en Italie centrale (Movedi et al., 2019).

L'objectif de ce stage est de tester la même hypothèse qui est sous-jacente aux modèles de culture couplés à CoSMo dans les conditions spécifiques du Massif Central. Cet objectif particulier s'inscrit dans le but général de la recherche, qui est d'obtenir des simulations appropriées de la dynamique des espèces d'un couvert prairial dans une variété de conditions environnementales et de gestion. Après les avoir paramétrées, nous avons évaluées les deux solutions de modélisation avec trois jeux de données issues des cortèges botaniques complexes propres aux prairies permanentes, à la fois fauchés ou pâturés, du Massif Central. Une analyse des services écosystémiques fournis par les prairies permanentes en fonction de la dynamique des espèces végétales simulée par les modèles est un objectif corollaire, que nous n'avons pas développé dans ce stage mais qui est important pour un apport en modélisation à la gestion durable des systèmes prairiaux.

IV. Matériels et méthodes

Ce stage s'inscrit dans le cadre du projet MODIPRAS « Modélisation des relations entre la diversité spécifique, le fonctionnement des systèmes prairiaux et leur capacité à fournir des services écosystémiques » du méta-programme ECOSERV de l'INRA sur les services rendus par les écosystèmes. Les actions du stage visent à comprendre et modéliser le fonctionnement des agroécosystèmes en lien avec les services fournis, en évaluant les fonctions de réponse des espèces face aux conditions environnementales et de gestion changeantes.

1- Sites d'étude

Le travail de modélisation a été conduit sur les parcelles de deux sites prairiaux du Massif Central : Theix et Laqueuille.

Le dispositif de Theix se situe dans la commune de Saint-Genès-Champanelle (45° 43' N, 03° 0' E, 880 m a.s.l.). L'expérience a été mise en place en 2005 sur des prairies permanentes couvrant une surface d'environ 3 ha. Le site est équipé d'une station météorologique qui fournit les valeurs horaires du rayonnement global, de la température et de l'humidité de l'air, des précipitations et de la vitesse du vent. Le climat est semi-continentale avec une température annuelle moyenne de 8,7 °C et des précipitations annuelles moyennes de 770 mm. Le sol est un cambisol (caractérisé par l'absence de couches accumulées d'argile et d'humus) qui s'est développé à partir d'un substrat rocheux granitique. Au sein du site expérimental, le sol présente toutefois des caractéristiques différentes dans sa couche supérieure, de sorte que le dispositif expérimental a été répété sur deux blocs : le bloc 1, implanté sur un cambisol eutrique (fertile et non acide), et le bloc 2, implanté sur un cambisol colluvique (plus acide). Des différences dans les caractéristiques du sol des deux blocs ont également été observées en termes de composition botanique. Au cours des deux années précédant la mise en œuvre de l'expérience (2003-2004), trois coupes annuelles ont été appliquées sans apport de fertilisation. La gestion antérieure avant 2003 consistait en un régime mixte comprenant une à deux coupes d'ensilage ou de foin suivies d'un pâturage en automne, avec des apports d'engrais minéraux et organiques. Depuis 2005, des traitements ont été appliqués, distinguant des gradients de perturbation : trois types de pâturage sans fertilisation et un gradient de disponibilité en éléments nutritifs sous un régime de coupes fixes (Tableau 1). Chaque traitement a été répété deux fois dans chaque bloc, résultant en 28 parcelles au total (14 parcelles par bloc). Les parcelles correspondant aux traitements de fertilisation, de 350 à 400 m² chacune, ont été coupées trois fois par an et l'application d'engrais a été fractionnée au début du printemps, après la première et la deuxième coupe. Les traitements consistent en un ajout annuel d'azote minéral, de phosphore et de potassium (en moyenne, pour le NPK : 264 kg N ha⁻¹, 33 kg P ha⁻¹ et 189 kg K ha⁻¹), une addition annuelle de phosphore minéral et de potassium (en moyenne pour PK : 26 kg P ha⁻¹ et 143 kg K ha⁻¹), et aucune fertilisation (Null). Plus de détails sur le site de Theix sont traités dans Louault et al. (2017). Dans le cadre de notre étude, les données correspondant au traitement NPK ont été utilisées sous forme de moyenne par bloc.

Tableau 1. Traitements appliqués dans le dispositif d'observation de Theix.

Perturbations	Fertilisation		
	Null	NPK	PK
Fauche	Trois par an	Trois par an	Trois par an
Pâturage	Bovin+		
	Bovin-		-
	Mouton-		
Abandon		-	

L'expérience de Laqueuille (45° 38' N, 02° 44' E) est localisée sur une prairie semi-naturelle en altitude (1040 m a.s.l.). Le sol est fertile et implanté sur une roche volcanique (andosol), avec 16% d'argile, 56% de limon et 28% de sable, et avec 11% de carbone (soit 18% de matière organique) dans les 0,10 m supérieurs. Le site est équipé d'une station météorologique qui fournit des valeurs

moyennes sur une demi-heure du rayonnement global, de la température et de l'humidité de l'air, des précipitations et de la vitesse du vent. Au printemps 2002, le champ expérimental (6,65 ha) a été divisé en deux enclos adjacents et a été continuellement pâturé par des génisses chaque année de mai à octobre. L'enclos 1 (2,81 ha), dénommé « intensif », atteint un taux de chargement moyen de 0,98 UGB (Unité Gros Bétail¹) ha⁻¹ an⁻¹ (soit 1,6 animal ha⁻¹ an⁻¹) et est fertilisé avec environ 210 kg de N ha⁻¹ an⁻¹ sous forme de nitrate d'ammonium en trois dates. Le paddock 2 de 3,4 ha, dit « extensif », est maintenu à la moitié du taux de chargement du paddock intensif (0,51 UGB ha⁻¹ an⁻¹) sans fertilisation. Etant donné que le modèle CoSMo, dans sa version actuelle, considère qu'il y a un apport systématique en azote (conditions potentielles de fertilisation azotée) nous avons limité notre analyse aux seules données correspondant au traitement intensif. Plus de détails sur le site de Laqueuille sont traités dans Allard et al. (2007) et Klumpp et al. (2011).

2- Bases de données

Pour les sites de Theix (bloc 1 et bloc 2) et Laqueuille (pâturage intensif), nous nous référons aux données mesurées du rendement annuel (biomasse aérienne coupée à Theix, biomasse aérienne sur pied à Laqueuille) et aux abondances des espèces de plantes car celles-ci sont les deux variables utilisées pour évaluer les sorties du modèle. Nous nous référons également aux différentes données utilisées en entrée des modèles : données du sol sur des profondeurs variables, variables météorologiques et données de la gestion prairiale. Pour le travail de modélisation, nous avons utilisé les données de la période 2005-2017 sur Theix, et de la période 2002-2016 sur Laqueuille. La collecte et l'organisation des données de Theix a été effectuée sous la coordination de Frédérique LOUAULT, Ingénieur de recherche à l'UREP. Pour Laqueuille, les données m'ont été parvenues par Katja KLUMPP, Ingénieur de recherche, et Olivier DARSONVILLE, Technicien de recherche à l'UREP.

La base de données se présente sous un format spécifique de plusieurs feuilles de calcul dans lesquels figures différentes variables auxquelles sont attribuées des valeurs. Le premier onglet consiste en une présentation générale du site (latitude, longitude, altitude, surface). Le deuxième onglet contient, organisées en six couches, les données de sol suivantes : la teneur en eau à saturation, au point de flétrissement et à la capacité au champ, la teneur en argile, sable et limon, le carbone et l'azote organique. La deuxième feuille, c'est la feuille de la gestion annuelle des prairies, où sont organisées les dates de fauche dans le site fauché (deux blocs), et les dates du pâturage ainsi que le chargement animal dans le site pâturé. Les dates et les quantités d'azote (kg NH₄-N ou NO₃-N m⁻²) apportées à la parcelle complètent cet onglet. Pour l'onglet relatif à la biomasse, nous avons classé les quantités de biomasse fauchée (g MS m⁻²) par date de mesure et par année. Enfin, le dernier onglet est attribué à la diversité végétale, où nous avons indiqué pour chaque espèce végétale qui compose notre liste botanique son abondance relative en % pour chaque année. Les fichiers parvenus calculent automatiquement la présence des différentes espèces dans le relevé botanique. À l'intérieur de chaque parcelle, des placettes de 30 m de long sont définies, où on compte les points de relevé botanique à l'aide d'une baguette enfoncée dans le sol. Le nombre de contacts de chaque espèce dans le volume de plantes qui touchent la baguette est rapporté au nombre total de contacts de toutes les espèces du relevé, ce qui donne la contribution spécifique de chaque espèce dans le relevé. Etant donné que la campagne de terrain pour faire les relevés botaniques est effectuée une fois par an (au mois de mai), nous n'avons qu'une seule date d'observation par an pour l'abondance relative des espèces végétales.

Afin d'indiquer au modèle les conditions météorologiques, un fichier dédié a été constitué pour chaque site à partir des fichiers déjà existants et qui contiennent différentes variables mesurées chaque heure (Theix) ou chaque demi-heure (Laqueuille). Les variables utilisées par le paquet de simulation sont : la pluviométrie, les températures maximale et minimale de l'air, le rayonnement

¹L'Unité Gros Bétail est l'unité de mesure standard permettant d'agréger différentes catégories d'animaux (espèces, sexe et âge) afin de les comparer, en fonction des besoins nutritionnels des animaux, en utilisant comme unité de référence (= 1 UGB) une vache laitière produisant 3000 kg de lait par an, sans aliments concentrés supplémentaires (EC, 2008).

global, la vitesse du vent, et les valeurs maximale et minimale de l'humidité relative de l'air. Les données météo mesurées dans les deux sites ont été converties en unités journalières et utilisées pour calculer chaque année deux indices agro-climatiques à l'aide d'un script déjà préparé par des membres de l'unité à l'aide du logiciel RStudio (<https://www.rstudio.com>). Nous avons notamment choisi un indice d'aridité et un indice de la fréquence des vagues de chaleur, car ceux-ci ont été utilisés dans des études récentes afin de caractériser les conditions climatiques des prairies (Sándor et al., 2017, 2018).

L'indice d'aridité (b) de De Martonne-Gottmann (De Martonne, 1942) décrit ci-dessous nous a offert la possibilité de distinguer des conditions thermo-pluviométriques différentes dans les deux sites étudiés, selon les intervalles de valeurs publiées par Diodato et Ceccarelli (2004): $b < 5$: aridité extrême; $5 \leq b < 14$: aridité; $15 \leq b < 19$: semi-aridité; $20 \leq b < 29$: sous-humidité; $30 \leq b < 59$: humidité; $b \geq 59$: forte humidité:

$$b = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{P_y}{T_y + 10} + 12 \cdot \frac{P_a}{T_a + 10} \right)$$

où P_y (mm): total des précipitations annuelles ; T_y (°C) : température annuelle moyenne ; p_a (mm): précipitation totale du mois le plus sec ; T_a (mm): température mensuelle moyenne du mois le plus sec.

La fréquence des vagues de chaleur (hw) a été calculée dans chaque site comme le nombre de jours consécutifs (au moins sept) pendant lesquels la température maximale était supérieure à la moyenne estivale (juin, juillet et août) de la température maximale de toutes les années disponibles (base) +3 ° C (Confalonieri et al., 2010 d'après Barnett et al., 2006). Pour l'analyse des résultats, nous avons retenu les intervalles de référence proposés par Sándor et al.(2018) : $hw \leq 14$: fréquence extrêmement modérée ; $14 < hw \leq 28$: fréquence très modérée ; $28 < hw \leq 42$: fréquence modérée ; $42 < hw \leq 56$: haute fréquence ; $56 < hw \leq 70$: très haute fréquence ; $hw > 70$: fréquence extrêmement élevée.

3- Simulations

Prise en main des modèles : En mars 2019, j'ai été accueillie à l'Université de Milan (Italie) par le professeur Roberto CONFALONIERI, directeur du laboratoire CASSANDRA et développeur principal du modèle CoSMo. Durant mon séjour d'une semaine, j'ai eu une formation de base de la part de Ermes MOVEDI, co-développeur de CoSMo, sur l'utilisation de ce modèle, couplé aux modèles de culture WOFOST et CropSyst dans l'application UNIMI.CropMI (Confalonieri et al., 2012). J'ai également pris connaissance des équations des modèles, de leurs paramètres ainsi que de la démarche de calibration.

Module animal : La gestion animale n'étant pas activée, pendant la période du stage nous avons élaboré des équations pour un module animal dédié. En reliant le poids total des animaux (calculé à partir d'un poids moyen et du nombre d'animaux à chaque passage) avec la quantité d'herbe ingérée (d'après Minson et McDonald, 1987), ce module a été introduit dans CoSMo afin de pouvoir activer le niveau de préférence des animaux pour chaque espèce végétale présente dans le couvert. Ce module a été testé pour la première fois dans cette étude, sur la parcelle intensive (pâturée et fertilisée) de Laqueuille où la quantité de biomasse végétale sur pied est mesurée après chaque pâture. Toutefois, même si le module animal introduit dans CoSMo pendant le stage fonctionne convenablement pour la simulation de l'abondance relative des espèces dans un pâturage, il se révèle encore instable en fournissant des valeurs de biomasse sur pied imprécises en raison de discontinuités dues à l'entrée et à la sortie des animaux dans la parcelle. Nous ne présentons donc ici que les résultats obtenus pour les abondances du pâturage de Laqueuille mais pas les sorties de biomasse relevant du module animal, s'agissant encore pour celui-ci d'une préversion dont le code informatique reste à stabiliser.

Initialisation et paramétrage : Les bases de données décrites précédemment ont été utilisées pour renseigner les modèles. En effet, pour la configuration des modèles il faudrait insérer certaines données telles que la localisation du site, les noms des espèces végétales, la gestion appliquée (ex. dates de fauches ou, en cas de pâturage, dates de pâturage et chargement animal), les données météorologiques ainsi que les propriétés du sol (Annexe 2). Nous décrivons ci-dessous les opérations d'initialisation et de paramétrage qui ont servi à la configuration des modèles.

Initialisation des espèces

Le nombre total d'espèces recensées dans les blocs 1 et 2 de Theix au cours de la période d'étude est de 36 et 41, respectivement, alors qu'à Laqueuille (parcelle intensive) nous avons recensé 64 espèces. Dans cette étude (et d'après Moredi et al., 2019), nous nous sommes basés uniquement sur les abondances relatives des espèces dominantes (Tableau 2).

Tableau 2. Abondances relatives des espèces dominantes à Theix (deux blocs) et Laqueuille. Les valeurs moyennes observées sur les périodes d'étude (Obs) ont été recalculées (Rec) par rapport aux espèces dominantes.

Theix - bloc 1			Theix - bloc 2			Laqueuille		
Espèces	Abondances relatives (%)		Espèces	Abondances relatives (%)		Espèces	Abondances relatives (%)	
	Obs	Rec		Obs	Rec		Obs	Rec
<i>Elymus repens</i>	25.9	31.4	<i>Achillea millefolium</i>	5.4	6.9	<i>Agrostis capillaris</i>	14.0	19.1
<i>Festuca arundinacea</i>	9.1	11.0	<i>Alopecurus pratensis</i>	17.7	22.7	<i>Dactylis glomerata</i>	14.0	19.1
<i>Lolium multiflorum</i>	6.9	8.4	<i>Holcus lanatus</i>	6.6	8.5	<i>Festuca rubra</i>	7.2	9.8
<i>Poa pratensis</i>	14.6	17.7	<i>Lolium perenne</i>	6.9	8.8	<i>Lolium perenne</i>	6.4	8.7
<i>Stellaria media</i>	4.0	4.8	<i>Poa pratensis</i>	15.0	19.2	<i>Poa pratensis</i>	7.3	9.9
<i>Taraxacum officinale</i>	22.0	26.7	<i>Stellaria media</i>	4.0	5.1	<i>Poa trivialis</i>	7.9	10.8
			<i>Trisetum flavescens</i>	7.0	9.0	<i>Trifolium repens</i>	11.2	15.3
			<i>Taraxacum officinale</i>	15.5	19.8	<i>Trisetum flavescens</i>	5.4	7.4
Somme	82.5	100.0	Somme	78.1	100.0	Somme	73.4	100.0

Afin de limiter les incertitudes associées à l'initialisation et au paramétrage des espèces minoritaires, un seuil de 4% d'abondance relative moyenne pendant la période simulée a été fixé afin d'exclure les espèces présentes avec une abondance en-dessous de ce seuil. Par exemple, *Lolium perenne* a été exclu de la liste des espèces dominantes du bloc 1 de Theix, son abondance relative moyenne n'étant que de 2% environ. Il fait partie par ailleurs des espèces simulées dans le bloc 2, où son abondance relative se situe autour de 7%. De façon similaire, *Holcus lanatus* a été exclu du bloc 1 de Theix ou figure à 1% environ, alors que sa présence s'élève à ~7% dans le bloc 2. *Dactylis glomerata* est par contre une espèce dominante à Laqueuille (~14%) mais minoritaire à Theix (~2% dans les deux blocs). Nous soulignons également que *Stellaria media* se situe sur le seuil d'abondance du 4% dans les deux blocs de Theix, alors qu'elle ne figure pas parmi les espèces retenues à Laqueuille. Nous constatons que les espèces retenues montre une abondance totale >70%, voire même >80% dans le bloc 1 de Theix. Pour le but de la modélisation, les abondances relatives des espèces dominantes sont été recalculées en rapportant l'abondance relative de chaque espèce à la somme des abondances. Pour chaque espèce, la première abondance relative mesurée (et recalculée) a été utilisée afin d'initialiser CoSMo au début de la simulation. Nous signalons que *Poa pratensis* est la seule espèce présente dans les trois situations.

Paramétrage du simulateur

L'interface du simulateur se présente sous forme d'une liste de paramètres à renseigner (Annexe 3). Les deux modèles de culture contiennent un nombre important de paramètres (une trentaine dans CropSyst et beaucoup plus dans WOFOST), qui ont été calibrés afin de permettre un usage des modèles dans les sites étudiés. CoSMo comprend par contre un nombre plutôt limités de paramètres afin de renseigner, pour chaque espèce, des fonctions d'adaptabilité liée à la gestion (le nombre de jours nécessaires pour redémarrer après chaque coupe ou la préférence animale), la phénologie (ex. la température de base pour le développement), la contrainte thermique (ex. la température optimale pour la croissance), la contrainte lumineuse (ex. le LAI maximal), la contrainte hydrique (sensibilité à la sécheresse) et la contrainte azotée (demande critique d'azote). Cette dernière n'est pas opérationnelle dans la version actuelle du modèle.

Nous avons calibré les valeurs des paramètres de chaque espèce à partir de valeurs de références tirées des bases de données e-FLORA-sys (<http://eflorasys.univ-lorraine.fr>) et LEDA (<https://uol.de/en/landeco/research/leda/data-files>), ainsi que de la base de données de traits mesurés de l'UREP et de la littérature scientifique (ex. Cruz et al., 2010 sur la typologie fonctionnelle de graminées fourragères pérennes). Nous avons ensuite alimenté la discussion autour du paramétrage obtenu en faisant référence aux valeurs publiées dans d'autres études. Nos valeurs calibrées demeurent dans les intervalles données par nos sources, ou bien elles s'écartent des valeurs de référence à hauteur de $\pm 20-30\%$ ou moins. En fait, c'est dans le but de reproduire les conditions dans lesquelles se développe la végétation, que ces limites n'ont pas été dépassées, ce qui aurait dégradé la calibration à un exercice d'ajustement statistique (d'après Bellocchi et al., 2010). Nous donnons, à titre d'exemple, les profondeurs d'enracinement de *Lolium perenne* et *Trisetum flavescens*, indiquées à 100 et 80 cm dans la base e-FLORA-sys et fixées à 110 et 100 cm respectivement (soit $+10-25\%$) dans le paramétrage de CoSMo (Max RD, profondeur racinaire maximale) à Laqueuille (Tableau 3).

4- Evaluation des sorties des modèles

Nous avons comparé les valeurs mesurées des abondances relatives et de biomasse aérienne avec celles simulées par les modèles CropSyst et WOFOST couplés avec CoSMo. Pour les valeurs de biomasse aérienne, nous avons également comparé aux observations les valeurs estimées par les deux modèles CropSyst et WOFOST sans couplage à CoSMo. Cela nous a permis de vérifier si l'introduction d'une représentation explicite de la dynamique de diversité végétale (modèles de culture couplés à CoSMo) entraîne une dégradation de la simulation de la biomasse que l'on obtient avec les modèles de culture non couplés). Pour les valeurs de biomasse, dont nous disposons de trois mesures chaque année (et donc d'une base conséquente de données), nous avons réalisé des régressions linéaires entre les simulations et les observations, dont le coefficient de détermination (R^2) offre une mesure de la proportion de la variabilité des observations expliquée par les valeurs simulées. Pour les abondances relatives, nous avons évalué la qualité de nos simulations avec cinq indices permettant de comparer les valeurs simulées et les valeurs observées. Nous avons considéré deux indices aux différences carrées ($0 \leq \text{RRMSE} < +\infty$, $-\infty < \text{EF} \leq 1$), deux indices aux différences absolues ($0 \leq \text{RMAE} < +\infty$, $-\infty < \text{AbsEF} \leq 1$) et un indice aux différences simples ($-\infty < \text{CRM} < +\infty$). La racine de l'erreur quadratique moyenne (RRMSE) et l'erreur moyenne absolue (RMAE), exprimées en pourcentage de la valeur moyenne des observations, quantifient l'erreur de simulation, alors que EF et AbsEF sont deux mesures d'efficacité qui indiquent si un modèle décrit mieux les données observées par rapport à la moyenne des observations. Les indices aux différences simples, par contre, ne quantifient pas l'erreur de simulation car en additionnant ou en soustrayant des différences simples (telles que CRM : [somme des observations - somme des simulations] / somme des observations), des valeurs proches ou égales à la valeur optimale de 0 peuvent être obtenues même sans la bonne proximité entre simulations et observations mais uniquement en raison de compensations réciproques dues à des différences de signe opposé. L'indice CRM est positif ou négatif selon que le modèle, en moyenne, sous-estime ou surestime les observations. Il n'y a pas d'indices généralement acceptés sur la façon d'évaluer la performance des modèles mais les

différences au carré ou absolues sont généralement utilisées pour quantifier les erreurs de simulation (Sanna et al., 2015), avec une préférence pour les statistiques carrées (soit quadratiques), alors que les écarts en valeur absolue sont moins élevés que les erreurs quadratiques (Yang et al., 2000). L'indice EF est informatif car il permet l'identification de modèles inefficaces : borné par sa valeur optimale de 1, il peut avoir des valeurs négatives qui indiquent que la moyenne des observations est un meilleur prédicteur que le modèle (Nash and Sutcliffe, 1970). Les fonctions quadratiques sont toutefois particulièrement sensibles aux erreurs de simulation les plus importantes (Klepper et Rouse, 1991). On observe souvent que très peu d'écarts importants tirent les indicateurs quadratiques vers des valeurs qui sont beaucoup éloignées de l'optimum, jusqu'au point d'amener à rejeter un modèle même s'il reproduit bien la fluctuation des observations (Donatelli et al., 2002). Pour cette raison, des statistiques robustes basées sur des différences absolues peuvent être préférées pour tirer des conclusions sur la qualité des simulations.

V. Résultats et discussion

Cette section est organisée en trois sous-sections. Nous présentons d'abord une caractérisation climatique des sites d'étude. La deuxième sous-section reporte, pour certains paramètres importants de la végétation, les valeurs utilisées pour renseigner les modèles de simulation. La troisième section représente les résultats des simulations obtenues avec CropSyst-CoSMo et WOFOST-CoSMo pour la dynamique des espèces dominantes et de la biomasse aérienne. Pour cette dernière, nous présentons également une évaluation comparative avec les versions autonomes (sans couplage à CoSMo) des deux modèles de culture.

1- Analyse climatique des sites d'étude

Nous présentons graphiquement les indicateurs d'aridité et fréquence des vagues de chaleur au fil des années pour les deux sites étudiés (Figure 1).

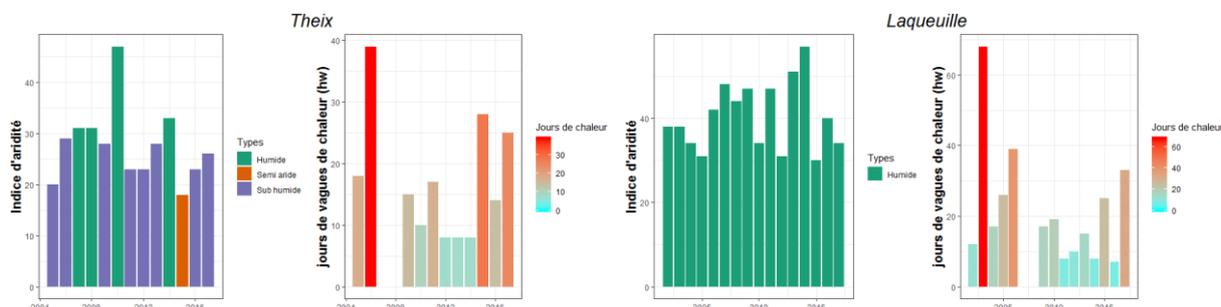


Figure 1. Indice d'aridité et nombre de jours de vagues de chaleurs au cours des années étudiées pour les sites de Theix et Laqueuille.

Le climat de Theix est essentiellement humide ou subhumide. La valeur maximale de l'indice d'aridité, 47, a été observée en 2010, où on a eu le plus de précipitations. Exceptionnellement, l'année 2015 a été marquée par un caractère semi-aride, avec peu de précipitations et un indice d'aridité égale à 18. Le plus grand nombre de jours de vagues de chaleur (*hw*) a été enregistré dans les années 2006, 2015 et 2017, avec respectivement 39 (fréquence modérée), 28 et 25 jours (fréquences très modérées). Nous remarquons également l'absence de vagues de chaleur (et donc de stress thermique) dans les années 2007 et 2008.

Le site de Laqueuille est pratiquement humide, avec une variabilité des valeurs de l'indice d'aridité entre 30 en 2015 et 57 en 2014. Nous avons atteint le nombre maximal de 68 jours de vagues de chaleur (très haute fréquence) en 2003, l'année durant laquelle l'Europe occidentale a connu un grand épisode caniculaire (https://fr.wikipedia.org/wiki/Canicule_europ%C3%A9enne_d%27ao%C3%BBt_2003). Les valeurs enregistrées en 2005, 2006, 2015 et 2017, et qui sont 26, 39, 25 et 33 jours respectivement

(fréquences modérées ou très modérées), ne sont également pas négligeable. Néanmoins nous n'avons pas enregistré des jours de vagues de chaleur en 2007 et 2008.

2- Paramétrage des espèces

À titre d'exemple, Tableau 3 décrit brièvement quelques paramètres auxquels les trois modèles utilisés sont particulièrement sensibles, avec les valeurs attribuées à quatre espèces végétales dominantes (une dicotylédone, *Taraxacum officinale*, et trois graminées) en indiquant la source d'où nous avons tiré les valeurs de référence sur lesquelles nous avons basé la calibration dans les deux sites (sachant que pour le site de Theix, nous avons utilisé le même paramétrage pour les deux blocs étudiés).

Tableau 3. Une sélection des paramètres des trois modèles pour quatre espèces dominantes (la notation utilisée pour désigner les paramètres est celle de Movedi et al., 2019).

Paramètres	Theix		Laqueuille		Références	Descriptif
	Espèces					
	<i>Taraxacum officinale</i>	<i>Lolium perenne</i>	<i>Poa pratensis</i>	<i>Trisetum flavescens</i>		
CropSyst						
BT Dev (°C)	-2	2	0	2	http://eflorasys.univ-lorraine.fr	Température de base pour le développement
COT (°C)	32	34	32	30	http://eflorasys.univ-lorraine.fr	Température d'arrêt du développement
RUE (g MJ ⁻¹)	2.1	2.1	2.2	1.6	Movedi et al. (2019)	Efficacité d'utilisation du rayonnement solaire
SLA (m ² kg ⁻¹)	30	23	28	18	Base de données INRA UREP (Frédérique Louault, communication personnelle)	Surface foliaire spécifique
WSI (-)	0.7	0.6	0.7	0.7	http://eflorasys.univ-lorraine.fr	Susceptibilité au stress hydrique : 0 (max), 1 (min)
WOFOST						
TBASEM (°C)	-2	2	0	2	http://eflorasys.univ-lorraine.fr	Température de base pour l'émergence
KDIFTB (-)	0.70	0.50	0.45	0.45	Movedi et al. (2019)	Coefficient d'extinction pour la lumière visible diffuse
TMPFTB[1] (°C)	15	17	15	16	Sándor et al. (2018)	Facteur de réduction d'assimilation maximale en fonction de la température moyenne (au stade de floraison, DVS=1)
CGN (-)	1.0	2.0	1.0	1.0	http://eflorasys.univ-lorraine.fr	Susceptibilité au stress hydrique : 1 (min), 5 (max)
CoSMo						
AL (-)	-	-	0.86	0.92	http://eflorasys.univ-lorraine.fr	Préférence de l'animale (entre 0, haute et 1,

LAI _{max} (m ² m ⁻²)	6.0	5.5	5.5	5.0	Monteith (1965)	basse) Indice de surface foliaire maximum
MaxH (m)	0.35	0.70	1	0.70	Cruz et al. (2010)	Hauteur maximale de la plante
OptT (°C)	15	17	15	16	Sándor et al. (2018)	Température optimale de croissance
MaxRD (cm)	80	110	80	110	http://eflorasys.univ-lorraine.fr	Profondeur maximale des racines

Pour CropSyst, les deux premiers paramètres sont les températures de base (BT Dev) et d'arrêt (COT) du développement, dont les valeurs estimées sont comprises entre -2 et 2 °C, et entre 30 et 34 °C, respectivement. La relation entre la durée du développement et la température utilise le système des sommes de températures entre les deux seuils fixés. Le calcul se fait sous l'hypothèse que la vitesse de développement d'une plante varie linéairement avec la température. Sous cette hypothèse, la somme des températures moyennes journalières, diminuées d'une température de base, est constante au cours d'une même phase de développement (ex. nous avons fixé à 50 °C-j le temps thermique nécessaire pour l'émergence de *Lolium multiflorum* à Theix). La température de base négative que nous avons déterminée pour *Taraxacum officinale* (-2 °C) peut s'expliquer par la prise en compte de la température aérienne et non de la température de la feuille. Des températures de base négatives ont été rapportées (Wielgolaski, 1999), sachant que dans le système des sommes de températures, la température de base a surtout une valeur statistique et non physiologique (Arnold, 1959; Yang et al., 1995; Bonhomme, 2000). L'efficacité d'utilisation du rayonnement (RUE) représente la production de biomasse aérienne par unité de lumière interceptée par le couvert végétal, dont les valeurs obtenues, de 1.6 à 2.2 g MJ⁻¹, se trouvent dans l'intervalle de référence de 1-5 g MJ⁻¹ indiqué pour CropSyst (http://modeling.bsyse.wsu.edu/CS_Suite_4/CropSyst/crop_editor/manual/attainable_growth.htm#RUE). La surface foliaire spécifique (SLA) est un trait morphologique de la plante représentant la taille de la feuille en fonction de sa masse (estimée en conditions de température optimale), utilisé pour déterminer la quantité d'indice de surface foliaire (LAI) produit. Les valeurs de SLA sont généralement comprises entre 15 et 25 m² kg⁻¹ (http://modeling.bsyse.wsu.edu/CS_Suite/cropsyst/crop_editor/manual/canopy_growth.htm), et tel est le cas de nos estimations pour *Lolium perenne* (SLA=23) et *Trisetum flavescens* (SLA=18). Toutefois, les valeurs de SLA peuvent même dépasser 30 m² kg⁻¹ (e.g. Osone et al., 2008), soit la valeur que nous avons estimée pour *Taraxacum officinale*, qui se rapproche des déterminations de ~28 m² kg⁻¹ de Brock et Galen (2005) et de ~37 m² kg⁻¹ de Poorter et Jong (1999) pour cette espèce. On constate, par ailleurs, que notre estimation du SLA de *Poa pratensis*, 28 m² kg⁻¹, rentre dans la gamme de valeurs observées pour cette espèce (<29 m² kg⁻¹) par Meziane et Shipley (2001). Le dernier paramètre de CropSyst, la sensibilité au stress hydrique (WSI), varie entre 0, indiquant la sensibilité maximale, et 1, qui est l'absence de sensibilité aux régimes hydriques sous-optimaux. Dans notre cas les espèces affichent une bonne résistance à la contrainte hydrique. Sous stress hydrique sévère, les racines profondes (>50 cm, voir paramètre MaxRD de CoSMo) jouent un rôle clé pour augmenter la résistance à la sécheresse des espèces ainsi que leur récupération (Picon-Cochard et Hernandez, 2015).

Pour WOFOST, le premier paramètre que nous considérons est la température de base pour l'émergence, TBASEM, à laquelle nous avons attribué les mêmes valeurs qu'au paramètre BT Dev de CropSyst. Le coefficient d'extinction pour la lumière dépend de la structure du feuillage et détermine sa capacité à intercepter le rayonnement solaire. Sa valeur est d'environ 0.44 pour les couverts à tendance verticale jusqu'à environ 1 pour les feuillages horizontaux (Boogard et al., 2011). La valeur de ce paramètre que nous avons estimée pour *Taraxacum officinale*, égale à 0.7, reflète la tendance des dicotylédones à avoir des feuilles plus horizontales que les graminées (e.g.

Hirose et al., 1989). En fait, cette estimation se détache des valeurs de 0.45-0.50 attribuées aux trois espèces graminées reportées (Tableau 3), correspondant aux caractéristiques d'un feuillage plus vertical. Le facteur de réduction d'assimilation maximale de CO₂ (TMPFTB) indique une valeur optimale de température (°C), au-delà ou en-deçà de laquelle une réduction s'applique à la capacité photosynthétique de la plante (voir également paramètre OptT de CoSMo). Ce facteur de réduction est déduit d'une interpolation à partir de la dépendance de certains facteurs de WOFOST à la température et au stade du développement de la plante (DVS=0, émergence ; =1, floraison ; =2, maturité ; Confalonieri, 2010). Nous reportons ici la valeur optimale de température attribuée au DVS=1, soit au stade de floraison. La notion repose sur le concept des tableaux AFGEN (*Arbitrary Function GENERator*) de van Keulen et Wolf (1986). Le paramètre de susceptibilité au stress hydrique CGN varie entre 1 et 5, dont 5 est la sensibilité maximale au stress hydrique. Les valeurs attribuées à ce paramètre correspondent à celles que nous avons obtenues avec CropSyst pour le paramètre WSI. En fait, les deux paramètres, CGN de WOFOST et WSI de CropSyst, se rapportent à la même notion de stress hydrique bien que leurs valeurs respectives soient attribuées de manière inverse sur les deux échelles.

Enfin, nous avons des paramètres particuliers propres CoSMo, comme le facteur AL (*animal liking*). Exprimant un degré de préférence de l'animal pour une espèce donnée, ce paramètre permet d'identifier les espèces préférées des animaux au pâturage. Les valeurs de AL varient de 0, qui est la préférence la plus haute, à 1, la préférence la plus basse, ce qui résume les caractéristiques morphologiques et physiologiques clés permettant à une espèce d'être plus attrayante pour les animaux lorsqu'on leur donne l'occasion de la consommer. Dans le site de Laqueuille, qui est pâturé, nous avons activé le module animal de CoSMo, et pour cela nous avons attribué une valeur de préférence à chacune des espèces dominantes (Tableau 3). Les valeurs attribuées à ce paramètre reflètent la basse préférence animale pour *Trisetum flavescens*, dont la valeur de 0,92 correspond également à celle attribuée à *Festuca arundinacea* (une autre espèce connue pour sa faible palatabilité pour les herbivores à cause de ses feuilles rugueuses et de la présence d'alcaloïdes, ex. Caslet et Undersander, 2019) alors que *Poa pratensis* est plus appréciée (ex. Meisser et al., 2014 ; Chabuz et al., 2019). En effet, *Poa pratensis* (AL=0,86) est une espèce robuste mais également une graminée agréable pour les ruminants en raison de ses feuilles vertes et succulentes, digestible et à la valeur alimentaire importante (ex. Hamet, 1985). *Dactylis glomerata* (AL=0,85) et *Lolium perenne* (AL=0,86) sont également des herbes au goût agréable que la plupart des animaux d'élevage consomment facilement (ex. Hanson, 1972 ; Landefeld et Penrose, 2016) en raison de leur richesse en carbohydrates solubles (Moorby et al., 2006). *Trifolium repens* (la seule espèce légumineuse dominante dans le couvert de Laqueuille) a également une palatabilité élevée (AL=0,85), associée à une teneur importante en protéines (ex. Cosgrove et al., 1996). LAI max (m² m⁻²) est la surface foliaire spécifique par unité de surface de sol lorsque le couvert est fermé. Les valeurs de 5-6 que nous avons estimées sont compatibles avec un feuillage au port dressé, d'après par exemple Monteith (1965), qui signale pour ce type de feuillage des valeurs de LAI max >5. Les valeurs estimées de hauteurs maximales (MaxH, cm) nous indiquent que nos espèces peuvent atteindre des hauteurs jusqu'à 100 cm, soit la valeur déterminée pour *Poa pratensis*. Pour cette espèce, une hauteur jusqu'à 80 cm est reportée par Ayan et al. (2012), qui signalent toutefois des valeurs jusqu'à 120 cm déterminées dans d'autres études. Par contre, les plantes de pissenlit (*Taraxacum officinale*) poussent jusqu'à 35 cm de hauteur (soit la valeur que nous avons attribuée à cette espèce), ou même 40 cm (<http://www.avxgestrend.be/Sites/1avx/jh1be/plantes/phyto/Herbier/P/Pissenlit/Pissenlit.htm>), formant une rosette de feuilles au niveau du sol. Les températures optimales autour de 16 °C, relativement basses, reflètent l'acclimatation des espèces prairiales aux conditions thermiques de montagne (Sándor et al., 2018). Pour finir, la profondeur d'enracinement (MaxRD) jusqu'à 80-110 cm indique la capacité de ces espèces pérennes à faire face aux stress environnementaux (hydriques - voir les paramètres WSI et CGN de CropSyst et WOFOST - mais également en nutriments). Nie et al. (2008) reportent des profondeurs d'enracinement d'espèces graminées de 87 à 130 cm. En général, les graminées et les astéracées (dont *Taraxacum officinale* fait partie), ainsi

que les légumineuses, figurent parmi les espèces plus profondément enracinées, avec une moyenne de 85 cm de profondeur (d'après les déterminations de Schenk et Jackson, 2002).

Suivi interannuel des paramètres de la communauté

Grâce à CoSMo, les paramètres (ou traits de la végétation) sont calculés dynamiquement. Nous retenons les changements au fil du temps des valeurs moyennes de la communauté alors que les valeurs attribuées aux paramètres des espèces qui la composent restent constantes. La Figure 2 présente, à titre d'exemple les changements interannuels de deux paramètres de la communauté. Pour des raisons de lisibilité de la figure, nous n'avons choisi que trois espèces pour illustrer l'évolution des traits moyens de la communauté.

Les valeurs du SLA (CropSyst) de la communauté, calculées comme moyenne pondérée des valeurs de ce paramètre attribuées aux espèces individuelles (soit les valeurs de *Lolium perenne*, *Festuca arundinacea* et *Poa pratensis* reportées en Figure 2 et des autres espèces non reportées), varient dans le temps en fonction des variations de l'abondance relative de ces mêmes espèces. Les facteurs de pondération appliqués sont donc les abondances relatives de chacune des espèces de la communauté, telles qu'estimées par CoSMo au pas de temps quotidien. Les valeurs du paramètre moyen se situant autour de $23 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$, soit la valeur attribuée à *Poa pratensis*, cela veut dire que les facteurs environnementaux et de gestion à l'œuvre dans la communauté favorisent la dominance de cette espèce. Autrement dit, cette dominance tire la valeur du paramètre moyen de la communauté vers la valeur du même trait de l'espèce dominante. Avec WOFOST, les valeurs constantes du taux maximum de CO_2 assimilé par les feuilles pour *Taraxacum officinale*, *Elymus repens* et *Stellaria media*, attribuées à l'émergence (DVS=0), s'accompagnent de valeurs moyennes de la communauté changeants, révélant ainsi une dynamique autour de la valeur $30 \text{ kg ha}^{-1} \text{ hr}^{-1}$. Ici, il faut considérer que ces valeurs moyennes enregistrées autour de la floraison (aux dates des relevés botaniques annuels), sont obtenues par interpolation de manière à assurer une continuité entre les différents stades du développement des espèces (depuis l'émergence jusqu'à la maturité).

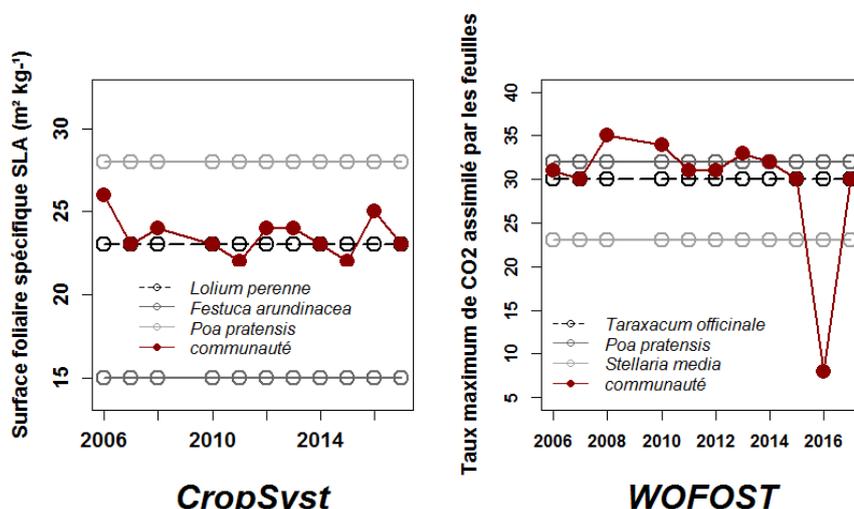


Figure 2. Changements interannuels des paramètres de la communauté SLA (CropSyst) et AMAX[1] (WOFOST) par rapport aux valeurs fixes attribuées à trois espèces de la communauté (gauche : Theix, bloc 1 ; droite : Theix, bloc 2). Le paramètre AMAX de WOFOST est le taux maximum de CO_2 assimilé par les feuilles, dont nous reportons pour chaque espèce la valeur attribuée au stade d'émergence (DVS=0).

En raison de cet ajustement dû au stade de développement, les valeurs de la communauté ne correspondent pas à la valeur moyenne pondérée des valeurs des paramètres des espèces de la communauté. Pour ce paramètre, on remarque d'ailleurs un extrême vers le bas en 2016, signalant que la sécheresse enregistrée à Theix en 2015 pourrait avoir impacté la structure de la communauté au point d'entraîner, l'année suivante, une baisse conséquente du taux de carbone assimilé par le processus de photosynthèse. Bien que cela se soit traduit pour les minimums de production fourragère enregistrés en 2015 ($6820 \text{ kg MS ha}^{-1}$) et 2016 ($8195 \text{ kg MS ha}^{-1}$) dans le bloc 2 de Theix

(alors que la moyenne des années est de 9747kg MS ha⁻¹, voir les anomalies de production en Figure 3), il s'agit là d'une hypothèse prudente :celle d'un « effet mémoire » de la sécheresse d'une année sur la production de l'année suivante (d'après Sándor et al., 2018) dont le paramètre AMAX de WOFOST en serait un indicateur. Cet effet se manifeste également dans le bloc 1 (Figure 3), pour lequel la tendance du paramètre AMAX est proche de celle du bloc 2 (données non affichées). Le bloc 1 se montre pourtant plus résilient en termes de production fourragère. En effet, la composition botanique des deux blocs est différente. Dans le bloc 1, une présence abondante d'*Elymus repens* (en moyenne, plus d'un quart de l'abondance totale de la communauté végétale) ainsi que de *Festuca arundinacea* (présente à hauteur de ~10%), qui résistent bien à la sécheresse (Peeters et al., 1991 ; Volaire et Lelièvre, 2001), expliquerait la meilleure production fourragère de ce bloc (9112 et 10172 kg MS ha⁻¹, respectivement en 2015 et 2016,face à une moyenne pluriannuelle de 11377 kg MS ha⁻¹).Ces deux espèces sont absentes dans le bloc 2.

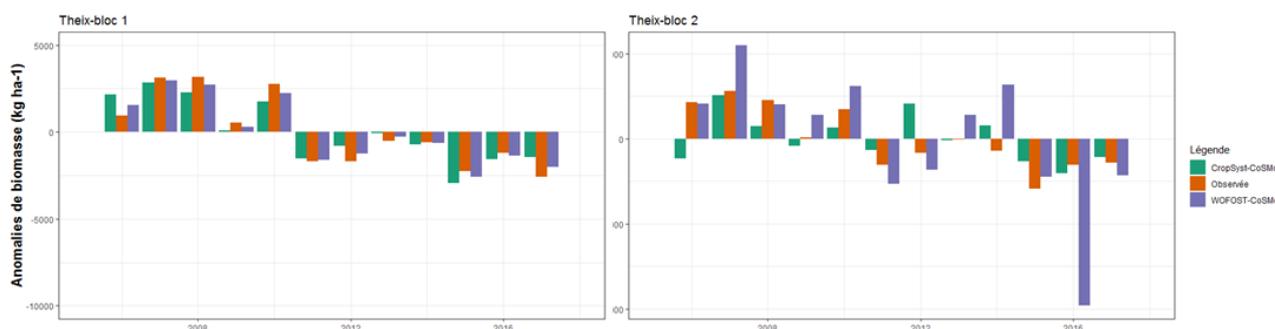


Figure 3. Anomalies des biomasses aériennes annuelles, mesurées et simulées (deux modèles) à Theix (deux blocs).

Avec les anomalies de biomasse observées à Theix, ainsi que les anomalies simulées avec les deux modèles de culture couplés à CoSMo (Figure 3), nous faisons la transition à la section suivante, celle des comparaisons entre simulations et observations.

3- Comparaisons entre valeurs simulées et observées

Nous avons calculé des indicateurs de performance afin de représenter la capacité des modèles à simuler la composition botanique (Tableau 4) et la biomasse végétale (Tableau 5).En complément des indices de performance, nous comparons également les simulations aux observations sous forme graphique en présentant soit des fluctuations temporelles ou des interpolations linéaires entre les valeurs simulées et observées. En analysant les simulations des abondances relatives, il est sous-entendu que nous nous référons aux modèles CropSyst et WOFOST pour indiquer leurs versions respectives couplées à CoSMo. Pour les simulations de biomasse, au contraire, nous précisons si les versions couplées (CropSyst-CoSMo, WOFOST-CoSMo) ou autonomes (CropSyst, WOFOST) sont utilisées.

Abondance relative

En considérant la totalité des espèces dans les deux sites et, pour le site de Theix, dans les deux blocs, les différents indices réunis dans le Tableau 4 permettent d'évaluer la performance des deux modèles sous différents angles.

Tableau 4. Performance des modèles pour l'abondance relative des espèces dans la communauté, évaluée dans chaque site à travers différents indices d'évaluation, pour chaque espèce et pour l'ensemble de la communauté (pour ce dernier résultat, CRM=0 est toujours obtenu car la surestimation de certaines espèces de la communauté est compensée par la sous-estimation d'autres espèces).

Modèle	Site	Espèces	Erreurs carrées		Erreurs absolues		Erreur simple
			RRMSE	EF	RMAE	AbsEF	CRM
CropSyst	Theix- bloc 1	<i>Elymus repens</i>	25.7	-1.700	16.9	0.030	-0.14

	<i>Festuca arundinacea</i>	42.2	-1.900	35.1	0.300	0.11
	<i>Poa pratensis</i>	19.3	-0.500	16.9	0.400	0.02
	<i>Taraxacum officinale</i>	30.4	-0.400	26.5	-0.300	0.07
	<i>Lolium multiflorum</i>	55.1	-0.100	44.2	0.080	-0.05
	<i>Stellaria media</i>	112.2	-0.200	73.6	0.200	0.31
	<i>Achillea millefolium</i>	43.5	0.200	35.5	0.400	0.07
	<i>Alopecurus pratensis</i>	25.6	-0.400	20.8	0.004	0.09
	<i>Lolium perenne</i>	71.4	0.100	64.3	-0.100	-0.26
	<i>Taraxacum officinale</i>	43.8	-1.200	35.5	-0.300	-0.16
Theix - bloc 2	<i>Poa pratensis</i>	26.2	0.200	19.7	-0.030	0.01
	<i>Stellaria media</i>	105.8	-0.600	67.1	0.300	0.30
	<i>Holcus lanatus</i>	44.2	-0.600	36.4	0.400	-0.04
	<i>Trisetum flavescens</i>	58.5	-0.200	46.8	0.030	-0.05
	<i>Agrostis capillaris</i>	23.9	0.400	19.5	-0.100	-0.02
	<i>Dactylis glomerata</i>	33.2	-8.030	29.2	0.030	0.02
	<i>Poa trivialis</i>	60.2	0.080	39.4	-0.100	-0.02
	<i>Trifolium repens</i>	67.6	-1.500	54.7	-0.700	-0.16
Laqueuille	<i>Trisetum flavescens</i>	73.2	-0.600	58.2	-0.020	0.50
	<i>Festuca rubra</i>	54.7	-1.200	45.6	-0.050	0.17
	<i>Poa pratensis</i>	70.8	-1.600	41.04	-0.006	-0.10
	<i>Lolium perenne</i>	83.4	-1.090	60.7	-0.060	-0.27
	<i>Elymus repens</i>	22.4	-1.050	16.3	0.060	0.03
	<i>Festuca arundinacea</i>	39.1	-1.500	31.6	0.400	0.10
	<i>Poa pratensis</i>	15.8	-0.040	10.3	0.500	-0.04
Theix- bloc 1	<i>Taraxacum officinale</i>	44.0	-2.100	30.3	-0.400	-0.06
	<i>Lolium multiflorum</i>	51.1	0.040	40.3	0.100	0.18
WOFOST	<i>Stellaria media</i>	97.1	0.070	74.8	0.200	-0.37
	<i>Achillea millefolium</i>	66.1	-0.700	54	0.200	0.18
	<i>Alopecurus pratensis</i>	31.7	-1.100	27.08	-0.100	0.20
Theix - bloc 2	<i>Lolium perenne</i>	69.9	0.100	57.4	-0.100	0.20
	<i>Taraxacum officinale</i>	68.7	-4.500	52.2	-0.600	-0.40

		<i>Poa pratensis</i>	31.2	-0.006	26.2	-0.100	0.09
		<i>Stellaria media</i>	96.9	-0.400	79.8	0.200	-0.10
		<i>Holcus lanatus</i>	56.4	-1.600	47.4	0.300	-0.35
		<i>Trisetum flavescens</i>	57.1	-0.100	48.1	0.010	0.08
		<i>Agrostis capillaris</i>	48.8	-1.400	44.7	-0.700	-0.39
		<i>Dactylis glomerata</i>	51.1	-20.300	44.9	-0.300	0.44
		<i>Poa trivialis</i>	97.6	-1.300	82.1	-0.700	-0.57
		<i>Trifolium repens</i>	95.8	-4.100	81.8	-1.200	-0.42
	Laqueuille	<i>Trisetum flavescens</i>	102.7	-2.200	88.9	-0.300	0.88
		<i>Festuca rubra</i>	92.7	-5.300	84.8	-0.500	0.80
		<i>Poa pratensis</i>	87.7	-3.080	106.4	-0.800	-1.05
		<i>Lolium perenne</i>	55.9	0.050	94.3	-0.300	0.80
CropSyst	Theix - bloc 1		35.6	0.69	26.4	0.51	
	Theix - bloc 2		44.5	0.55	33.9	0.42	0
	Laqueuille		53.0	0.07	39.4	0.13	
		Communauté					
WOFOST	Theix - bloc 1		38.6	0.63	25.3	0.53	
	Theix - bloc 2		56.7	0.78	42.3	0.57	0
	Laqueuille		77.1	0.42	71.3	0.19	

Toutes espèces confondues (évaluation des modèles au niveau de la communauté), nous signalons notamment que les valeurs de EF et AbsEF sont toujours positives, et que les valeurs de RRMSE et RMAE ne dépassent 70% qu'une seule fois (à Laqueuille avec WOFOST). Toutefois, la performance des modèles est dépendante des espèces et demande à être évaluée séparément pour chaque espèce dans les différentes conditions simulées.

Par rapport aux erreurs carrées, nous soulignons que les espèces *Elymus repens*, *Poa pratensis* (dans les deux blocs de Theix), *Taraxacum officinale* (avec CropSyst dans le bloc 1), *Alopecurus pratensis*, *Agrostis capillaris* (avec CropSyst à Laqueuille) et *Dactylis glomerata* (avec CropSyst à Laqueuille) sont plutôt bien simulées par les modèles, les valeurs de RRMSE étant <40%. Par contre, les valeurs de EF sont majoritairement négatives, sauf quelques exceptions, à noter *Achillea millefolium* (avec CropSyst dans le bloc 2 de Theix), *Lolium perenne* (dans le bloc 2 de Theix et, avec WOFOST, à Laqueuille) et *Stellaria media* (avec WOFOST dans le bloc 1 de Theix). Cette dernière est par ailleurs simulée avec des erreurs importantes à la fois avec CropSyst (RRMSE=112.2%) et avec WOFOST (RRMSE=97.05%).

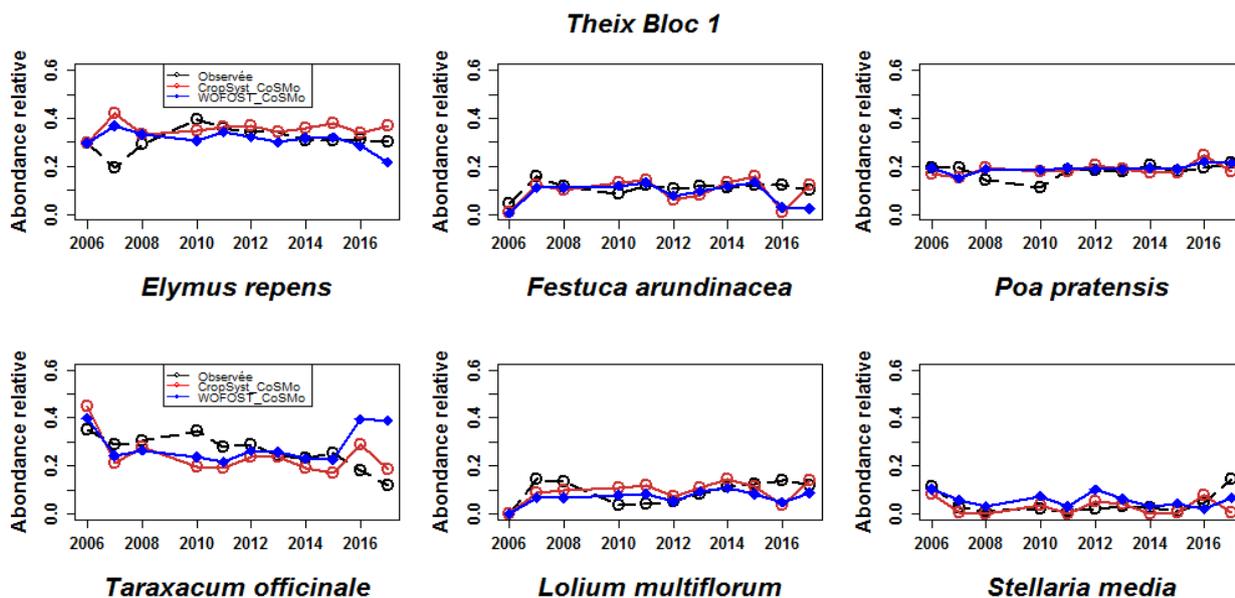
Concernant les erreurs absolues, qui atténuent l'impact des écarts les plus marquées, nous retenons une performance plus satisfaisante. Les meilleures valeurs de RMAE (<40%) ont été observées avec CropSyst pour *Elymus repens* (16.9%) et *Poa pratensis* (16.9%) dans le bloc 1 de Theix, *Poa pratensis* (19.7%) dans le bloc 2 de Theix et *Agrostis capillaris* (19.5%) dans le site de Laqueuille et, avec WOFOST, pour *Elymus repens* (16.3%) et *Poa pratensis* (10.3%) dans le bloc 1 de Theix. Sur le site pâturé de Laqueuille, nous n'avons observé aucune valeur de RMAE en dessous de 40%. Les valeurs d'AbsEF, par contre, sont autant positives que négatives et sont proches de 0. Cependant, des valeurs positives de cet indice ont été majoritairement observées avec CropSyst : *Elymus repens* (0.030) dans le bloc 1 de Theix, *Alopecurus pratensis* (0.004) dans le bloc 2 de Theix et *Dactylis glomerata* (0.030) à Laqueuille.

Les valeurs de CRM s'écartent peu de 0, et elles sont presque également réparties entre valeurs positives (23 sous-estimations) et négatives (21 surestimations).

Globalement, les meilleures simulations sont celles de *Poa pratensis* à Theix. Dans les deux blocs et avec les deux modèles : $15.8\% \leq \text{RRMSE} \leq 31.2\%$, $10.3\% \leq \text{RMAE} \leq 26.2\%$, $0.500 \leq \text{EF} \leq 0.200$, $-0.100 \leq \text{AbsEF} \leq 0.500$, $-0.04 \leq \text{CRM} \leq 0.09$. À Laqueuille, *Agrostis capillaris* est l'espèce la mieux simulée avec les deux modèles. CropSyst est pourtant plus performant (RMSE=23.9%, RMAE=19.5%, EF=0.400, AbsEF=-0.100, CRM=-0.02) que WOFOST (RMSE=48.8%, RMAE=44.7%, EF=-1.400, AbsEF=-0.700, CRM=-0.39), non seulement par rapport à cette espèce particulière mais en général à Laqueuille.

Au niveau des espèces considérées individuellement, les indices de performance mettent en évidence un certain nombre d'écarts à idéal. Par exemple, il peut être tentant d'interpréter les valeurs de $\text{RRMSE} > 100\%$, que nous avons obtenues notamment avec CropSyst pour *Stellaria media* dans les deux blocs de Theix et avec WOFOST pour *Trisetum flavescens* à Laqueuille, comme une indication de l'incapacité des modèles à simuler ces espèces. Cependant, ce constat mérite d'être nuancé. Les écarts, souvent importants, que l'on constate entre RMAE et RRMSE (ex. $\text{RMAE}/\text{RRMSE} = 0.63-0.66$ avec *Stellaria media* à Theix) s'expliquent par la présence de quelques estimations atypiques qui s'écartent de la tendance des autres estimations.

En fait, bien que les mesures de performance ne soient pas entièrement satisfaisantes (ce qui peut être dû à l'amplitude de quelques écarts), la visualisation de la dynamique simulée des espèces qui ressort des graphes temporels ci-dessous semble être conforme (dans la plupart des situations) à celle des observations. Dans le bloc 1 de Theix, les deux modèles donnent des résultats similaires bien qu'on observe plus de fluctuations dans les simulations de WOFOST que dans celles de CropSyst (Figure 4).



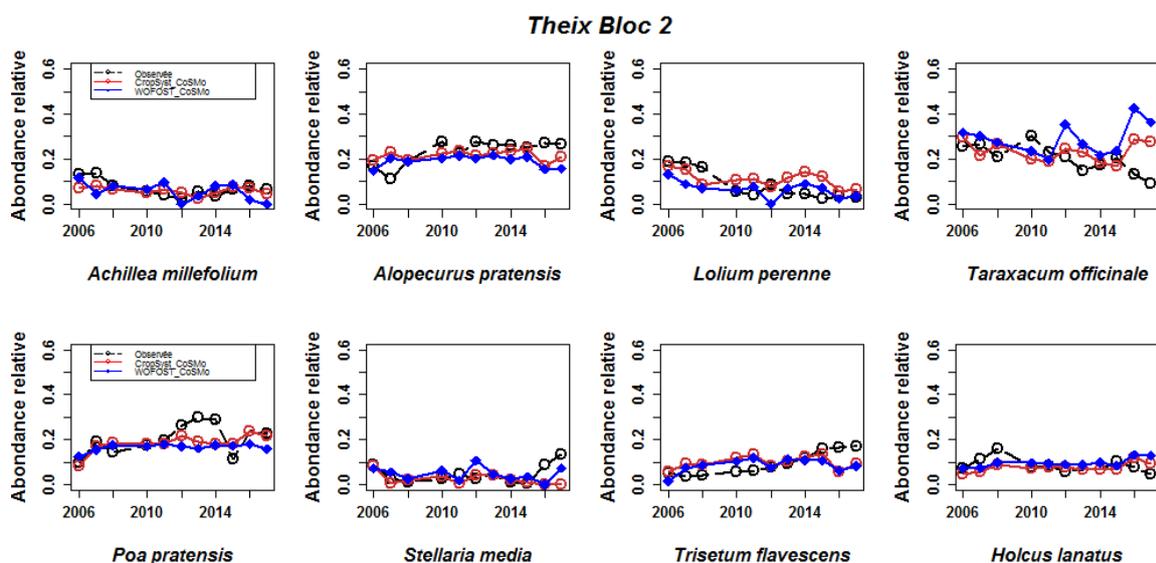


Figure 4. Comparaison entre valeurs observées et simulées des abondances relatives obtenues avec CropSyst et WOFOST pour six espèces dominantes à de Theix (deux blocs).

Comme indiqué précédemment (Tableau 4), les meilleures simulations ont été obtenues avec *Poa pratensis* et *Elymus repens*, les courbes des simulations suivant presque la même tendance que celles des observations. Ces deux espèces sont les plus dominantes, avec des moyennes d'abondances relatives de 17% et 31%, respectivement, contrairement à *Stellaria media* qui, avec une moyenne d'abondance relative de 4%, est l'espèce moins dominante et celle qui est moins bien simulée d'après les indices de performance (Tableau 4). On observe donc que les erreurs s'atténuent ou s'élargissent pour les valeurs d'abondance élevées ou faibles, respectivement. Nous obtenons ainsi le même résultat de Movedi et al. (2019) qui, dans leur étude, ont obtenu pour l'espèce la plus dominante, *Festuca arundinacea* (36%), des valeurs de RRMSE de 21% (CropSyst) et 23% (WOFOST), alors que pour l'espèce minoritaire, *Medicago sativa* (7%), les valeurs calculées de RRMSE dépassé largement 100% (jusqu'à 185% et 193% avec WOFOST et CropSyst, respectivement).

Nous constatons par ailleurs que *Taraxacum officinale* a diminué sa présence relative à la fin de la période étudiée (de >30% en 2006 à ~15% en 2017), cette astéracée ayant été partiellement remplacée par *Festuca arundinacea* et *Lolium multiflorum*, deux graminées presque absentes au début de la période d'étude et s'élevant en 2017 à ~10% d'abondance relative chacune. CropSyst a suivi ces tendances avec peu d'écarts des observations, alors que WOFOST a surestimé l'abondance de *Taraxacum officinale* en fin de période. Le rebondissement de l'abondance de cette espèce, tel que simulé par WOFOST après l'épisode de sécheresse de 2015, nous indique qu'une difficulté majeure dans le paramétrage du modèle réside dans la nécessité d'interpréter le comportement des différentes espèces dans des conditions thermo-pluviométriques défavorables.

Pour le bloc 2 de Theix (Figure 4), les simulations semblent être aussi satisfaisantes que dans le bloc 1. Dans l'ensemble, on note que les tendances simulées par les deux modèles et celles observées sont concordantes, bien que certaines espèces soient mieux représentées que d'autres. On retrouve ici la même difficulté que dans le bloc 1 à simuler *Taraxacum officinale* avec WOFOST dans les dernières années de la période étudiée. Cette difficulté de WOFOST s'amplifie dans le bloc 2, où CropSyst ne capture pas également la tendance à la baisse d'abondance relevée pour le pissenlit au fil des années. Cette surestimation de l'abondance de *Taraxacum officinale* se traduit, en même temps, par certaines sous-estimations d'autres espèces (ex. *Alopecurus pratensis*, *Stellaria media*, *Trisetum flavescens*) alors que la tendance à la baisse de *Lolium perenne* est bien représentée par les deux modèles. *Poa pratensis* montre par ailleurs une tendance initiale à la hausse, avec une flexion en 2015 (en cause, selon toute vraisemblance, l'épisode de sécheresse de cette année), suivie par une reprise importante. Les deux modèles ont des difficultés à simuler ces fluctuations même si CropSyst (contrairement à WOFOST) parvient à rattraper les valeurs finales observées.

Alors que nous observons une certaine concordance entre CropSyst et WOFOST dans les deux blocs de Theix, les résultats obtenus nous montrent que les deux modèles ont plutôt tendance à diverger à Laqueuille (Figure 5).

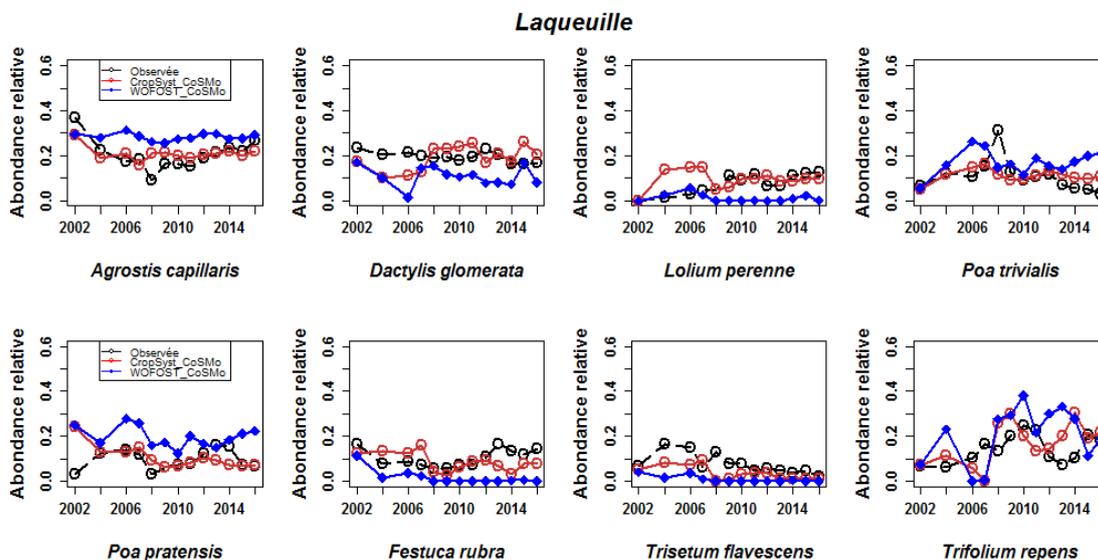


Figure 5. Comparaison entre valeurs observées et simulées des abondances relatives obtenues avec CropSyst et WOFOST pour six espèces dominantes à Laqueuille (pâturage intensif).

En général, CropSyst se révèle plus approprié que WOFOST pour la simulation de ce site pâturé. En fait, si les estimations effectuées avec WOFOST s'écartent souvent de manière significative des observations, les tendances simulées par CropSyst sont cohérentes avec les tendances observées pour la majorité des espèces.

On constate juste que, pour certaines espèces, les niveaux d'abondance simulés sont soit moins soit plus fluctuant que les niveaux observés. Tel est le cas de *Poa trivialis*, dont le pic d'abondance relevé en 2008 (dont l'absence de vagues de chaleur en 2007-2008 pourrait en être un facteur explicatif) n'est pas reproduit par CropSyst, ou de *Dactylis glomerata*, qui ne montre pas de variations importantes au fil du temps contrairement aux résultats du modèle. Nous signalons également les valeurs initiales peu élevées de *Lolium perenne*, surestimées par CropSyst. Le modèle montre par ailleurs une bonne capacité à rattraper la hausse observée, au fil des années, de cette espèce dont le caractère rudéral est garant d'une présence continue dans un milieu peu stressé mais perturbé par le pâturage intensif (Pontes, 2006 d'après les critères de Grime et al., 1988). Ces mêmes principes d'écologie fonctionnelle, sur lesquels reposent les différentes stratégies d'adaptation des espèces végétales à leurs milieux, suggèrent également que le caractère compétiteur de *Dactylis glomerata* ne bénéficie pas à sa montée en termes d'abondance relative dans le milieu peu stressé du pâturage intensif de Laqueuille.

Toutes situations confondues, c'est une performance satisfaisante (surtout avec CropSyst) celle qui ressort de la simulation de *Poa pratensis*, soit la seule espèce présente dans les trois situations simulées : RRMSE=35.1% (CropSyst), 41.3% (WOFOST) ; RMAE=23.6% (CropSyst), 38.8% (WOFOST), EF=0.31 (CropSyst), 0.05 (WOFOST), AbsEF=0.32 (CropSyst), WOFOST (-0.11), CRM=-0.008 (CropSyst), -0.218 (WOFOST).

Biomasse aérienne

Pour la biomasse aérienne, nous évaluons les deux modèles couplés, ainsi que leurs versions autonomes (non couplées à CoSMo), dans les deux blocs de Theix. Globalement, les simulations obtenues nous indiquent que les modèles parviennent à simuler de manière satisfaisante la biomasse aérienne dans les deux blocs (Tableau 5). Les valeurs de RRMSE sont comprises entre 37% (CropSyst-CoSMo, bloc 1) et 50% (WOFOST, bloc 2), et celles de EF entre 0.26 (WOFOST, bloc 1) et 0.50 (CropSyst-CoSMo, bloc 1). Les valeurs de AbsEF sont également positives. Une majeure

fréquence des sous-estimations est par ailleurs signalée par les valeurs dominantes de CRM>1. À titre d'exemple, nous signalons que les valeurs de RRMSE de 16% à 39% obtenues par Movedi et al. (2019) font référence à une prairie fauchée une seule fois dans l'année, alors que nous avons évalué le rendement des trois coupes effectuées à Theix.

Tableau 5. Performance des modèles pour la biomasse aérienne (kg ha⁻¹), évaluée dans les deux blocs de Theix à travers différents indices d'évaluation.

Modèle	Site	Erreurs carrées		Erreurs absolues		Erreur simple
		RRMSE (%)	EF	RMAE (%)	AbsEF	CRM (kg ha ⁻¹)
CropSyst-CoSMo	Theix- bloc 1	37.0	0.52	31.0	0.29	-0.08
WOFOST-CoSMo		40.2	0.43	26.5	0.39	0.12
CropSyst		37.5	0.50	31.9	0.27	-0.02
WOFOST		45.5	0.26	34.0	0.22	0.05
CropSyst-CoSMo	Theix- bloc 2	45.9	0.41	39.5	0.21	0.02
WOFOST-CoSMo		47.0	0.38	37.0	0.26	-0.14
CropSyst		47.3	0.37	38.5	0.23	0.15
WOFOST		50.0	0.29	36.1	0.27	0.27

Les diagrammes de dispersion (et les régressions linéaires correspondantes) de Figure 6 complètent l'évaluation graphique anticipée en Figure 3 pour les modèles couplés à CoSMo. Nous remarquons que seule les versions couplées des deux modèles interprètent plus que la moitié de la variabilité des données observées ($R^2 > 0.50$), à l'exception de CropSyst-CoSMo dans le bloc 2 ($R^2 = 0.47$). Avec les valeurs correspondantes du coefficient de corrélation ($R = \sqrt{R^2}$), se situant entre 0.67 (WOFOST, bloc 1) et 0.77 (WOFOST-CoSMo, bloc 2), nous montrons qu'une corrélation de modérée et forte (d'après les critères de Hinkle, 1994) existe entre les valeurs simulées et observées de la biomasse récoltée à Theix. Globalement, en comparant les valeurs de R^2 (Figure 6) et les autres indices de performance (Tableau 5), on constate d'une part de meilleurs résultats avec les versions couplées des modèles et, d'autre part, une meilleure performance de WOFOST par rapport à CropSyst pour les deux versions couplées et autonomes.

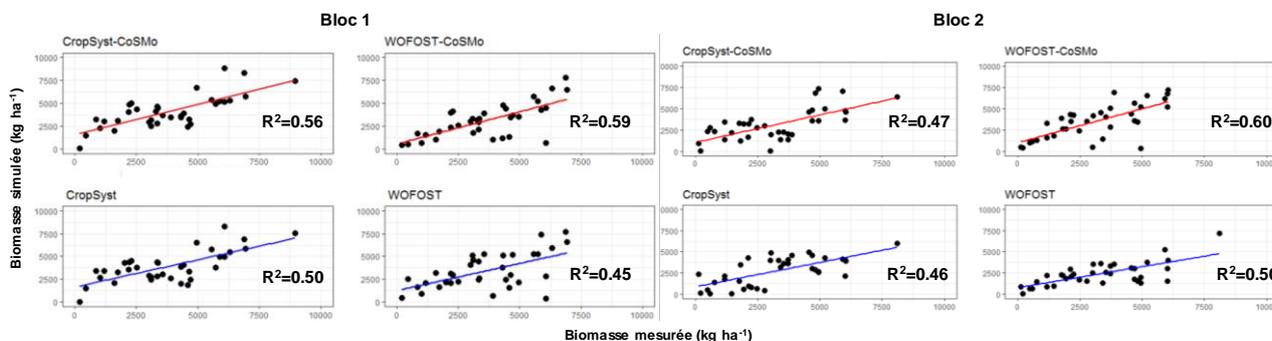


Figure 6. Comparaison entre biomasse simulée et biomasse mesurée dans les deux blocs de Theix avec les deux modèles de culture (CropSyst, WOFOST), à la fois couplés à CoSMo et autonomes.

VI. Conclusions

En s'appuyant sur les observations botaniques et les mesures de biomasse pluriannuelles de deux sites prairiaux (Theix, Laqueuille), mon stage en modélisation apporte un éclairage sur la modélisation dynamique de la diversité végétale dans des prairies fertilisées (à la fois fauchées et pâturées) du Massif Central, une tâche dans laquelle interviennent les fonctions d'adaptabilité des espèces prairiales aux conditions pédoclimatiques et de gestion changeantes. En effet, la question de recherche sous-jacente vise à cerner les facteurs de régulation à la fois internes et externes au système (ici, les interventions de l'homme dues aux régimes imposés de fauche ou de pâturage) susceptibles d'orienter l'évolution différenciée des espèces présentes dans un couvert. Dans ce

cadre, l'expérience que nous avons faite avec un outil dédié (CoSMo) et deux simulateurs génériques de culture (CropSyst, WOFOST) nous a permis de mettre en évidence les potentialités ainsi que les limites de nos outils de modélisation prairiale. De plus nous avons montré (dans la mesure du possible) que grâce à l'application de bonnes pratiques de modélisation (notamment une calibration raisonnée des paramètres clé de la végétation), les résultats qui en découlent rejoignent certaines notions de l'écologie végétale, notamment celles de l'écologie fonctionnelle, et permettent de réaliser une analyse approfondie des mécanismes à l'œuvre dans les couverts prairiaux plurispécifiques. En vu des résultats obtenus à l'issue de notre étude, qui confirment dans les systèmes à flore complexe du Massif Central les résultats satisfaisants d'une étude précédente, nous concluons au caractère flexible de l'approche de CoSMo et à la possibilité d'élargir son application à plusieurs systèmes et espèces. Si cette étude exploratoire (qu'une étape d'une recherche en cours) offre des pistes intéressantes, il convient également d'en pointer les limites et la nécessité de continuer à approfondir le comportement de CoSMo (et des modèles de culture auxquels il est couplé) dans des situations biogéographiques différentes qui permettront de réaliser un bilan plus complet de son fonctionnement et d'avancer des propositions d'amélioration.

Il nous semble bon de rappeler que le succès d'un travail de modélisation dépend de la disponibilité d'un logiciel donnant accès à un outil de simulation stable qui intègre les dernières fonctions du modèle. En effet, une partie importante du stage a été consacrée à la stabilisation d'un outil opérationnel afin de mener à bien notre modélisation prairiale. Grâce aux tests réalisés, l'équipe de développement de l'Université de Milan en Italie a pu régler l'intégration de nouvelles fonctionnalités et configurer une interface pour gérer efficacement le paramétrage et la réalisation des simulations. L'utilisation de bases de données complètes et fiables pour la calibration et l'évaluation de modèles est également un élément déterminant, ce qui a requis un traitement des relevés de terrain disponibles à l'UREP, préalable à la constitution d'une base de données structurée permettant d'organiser le travail de modélisation. En fait, les banques de données disponibles à l'UREP permettraient d'alimenter un travail de modélisation plus poussé que celui engagé pendant le stage. Si nous n'avons pas pu modéliser les dynamiques de la diversité végétale en absence d'engrais azoté, ce n'est pas pour manque de données mais à cause du travail nécessaire à produire un logiciel de simulation opérationnel, adapté à la caractérisation de ces systèmes (un travail que nous avons amorcé mais qui n'est pas terminé).

Pour autant, nous savons que le travail engagé sera poursuivi afin d'améliorer la précision des paramètres et des variables estimées dans des conditions que nous n'avons pas pu explorer à cause de la contrainte temporelle du stage. En définitive, malgré ses limitations, cette démarche de modélisation se révèle importante pour une lecture mécaniste des processus du fonctionnement des couverts prairiaux et permet d'ouvrir à de nouvelles perspectives dans les études s'intéressant aux liens biodiversité-fonctionnement (et services écosystémiques) de ces mêmes couverts.

VII. Références bibliographiques

- Agreste, 2019. Statistique agricole annuelle 2017-2018 - Données provisoires. Agreste Chiffres et Données Agriculture 4, Juin 2019. <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/cd2019-4saavprovisoire.pdf>
- Amiaud, B., Carrère, P., 2012. La multifonctionnalité de la prairie pour la fourniture de services écosystémiques. Fourrages 211, 229-238.
- Arnold, C.Y., 1959. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. Proceedings of the American Society for Horticultural Science 74, 430-445.
- Asseng, S., Ewert, F., Rosenzweig, C., Jones, J.W., Hatfield, J.L., Ruane, A.C., Boote, K.J., Thorburn, P.J., Rötter, R.P., Cammarano, D., Brisson, N., 2013. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. Nature Climate Change 3, 827-832.
- Ayan, I., Acar, Z., Gulumser, E., Arslan, S., Can, M., Tongel, O., 2012. Agricultural traits of bluegrass accessions in Black Sea Region of Turkey. In: Acar, Z., López-Francos, A., Porqueddu, C. (eds.) New approaches for grassland research in a context of climate and socio-economic changes. Options Méditerranéennes : Série A 102, 165-168)
- Badeau, J., 2018. Effets de la fauche et du réchauffement climatique sur la diversité végétale dans les prairies plurispécifiques : approche par méta-analyse. Mémoire de stage, Master FAGE-Biologie et Ecologie pour la Forêt, l'Agronomie et l'Environnement, Nancy, France.
- Bagella, S., Salis, L., Marrosu, G.M., Rossetti, I., Fanni, S., Caria, M.C., Roggero, P.P., 2013. Effects of long-term management practices on grassland plant assemblages in

- Mediterranean cork oak silvo-pastoral systems. *Plant Ecology* 214, 621-631.
- Barnett, C., Hossel, J., Perry, M., Procter, C., Hughes, G., 2006. A handbook of climate trends across Scotland. Scotland and Northern Ireland Forum for Environmental Research, SNIFFER Project CC03, Edinburgh, United Kingdom.
 - Bassu, S., Brisson, N., Durand, J.L., Boote, K., Lizaso, J., Jones, J.W., Rosenzweig, C., Ruane, A.C., Adam, M., Baron, C., Basso, B., 2014. How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors? *Global Change Biology* 20, 2301-2320.
 - Bechini, L., Bocchi, S., Maggiore, T., Confalonieri, R., 2006. Parameterization of a crop growth and development simulation model at sub-model components level. An example for winter wheat (*Triticum aestivum* L.) *Environmental Modelling & Software* 21, 1042-1054.
 - Bengtsson, J., Bullock, M., Egoh, B., Everson, C., Everson, T., O'Connor, T., O'Farrell, P.J., Smith, H.G., Lindborg, R., 2019. Grasslands - more important for ecosystem services than you might think. *Ecosphere* 10: e02582.
 - Bocchiola, D., Nana, E., Soncini, A., 2013 Impact of climate change scenarios on crop yield and water footprint of maize in the Po valley of Italy. *Agricultural Water Management* 116, 50-61.
 - Bonhomme, R., 2000. Bases and limits to using 'degree.day' units. *European Journal of Agronomy* 13, 1-10.
 - Boogaard, A.J.W., de Wit, te Roller, J.A., van Diepen, C.A., 2011. User's guide for the WOFOST Control Center 1.8 and WOFOST 7.1.3 crop growth simulation model. Alterra, Wageningen University & Research Centre, Wageningen, The Netherlands.
http://content.alterra.wur.nl/webdocs/WOFOST/User_manual_WOFOST_CONTROL_CENTRE_1_8.pdf
 - Boogaard, H., Wolf, J., Supit, I., Niemeier, S., van Ittersum, M., 2013. A regional implementation of WOFOST for calculating yield gaps of autumn-sown wheat across the European Union. *Field Crops Research* 143, 130-142.
 - Brock, M.T., Galen, C., 2005. Drought tolerance in the alpine dandelion, *Taraxacum ceratophorum* (Asteraceae), its exotic congener *T. officinale*, and interspecific hybrids under natural and experimental conditions. *American Journal of Botany* 92, 1311-1321.
 - Bullock, J.M., Aronson, J., Newton, A.C., Pywell, R.F., Rey-Benayas, J.M., 2011. Restoration of ecosystem services and biodiversity: conflicts and opportunities. *Trends in Ecology and Evolution* 26, 541-549.
 - Chabuz, W., Kulik, M., Sawicka-Zugaj, W., Żółkiewski, P., Warda, M., Pluta, M., Lipiec, A., Bochniak, A., Zdulski, J., 2019. Impact of the type of use of permanent grasslands areas in mountainous regions on the floristic diversity of habitats and animal welfare. *Global Ecology and Conservation* 19, e00629.
 - Cleland, E.E., 2011. Biodiversity and ecosystem stability. *Nature Education Knowledge* 3: 14.
 - Colbach, N., Dürr, C., Roger-Estrade, J., Caneill, J., 2005. How to model the effects of farming practices on weed emergence. *Weed Research* 45, 2-17.
 - Confalonieri, R., 2010. Monte Carlo based sensitivity analysis of two crop simulators and considerations on model balance. *European Journal of Agronomy* 33, 89-93.
 - Confalonieri, R., 2014. CoSMo: A simple approach for reproducing plant community dynamics using a single instance of generic crop simulators. *Ecological Modelling* 286, 1-10.
 - Confalonieri, R., Bechini, L., 2004. A preliminary evaluation of the simulation model CropSyst for alfalfa. *European Journal of Agronomy* 21, 223-237.
 - Confalonieri, R., Francone, C., Cappelli, G., Stella, T., Frasso, N., Carpani, M., Bregaglio, S., Acutis, M., Tubiello, F.N., Fernandes, E., 2013. A multi-approach software library for estimating crop suitability to environment. *Computers and Electronics in Agriculture* 90, 170-175.
 - Craven, D., Isbell, F., Manning, P., Connolly, J., Bruelheide, H., Ebeling, A., Roscher, C., van Ruijven, J., Weigelt, A., Wilsey, B., Beierkuhnlein, C., de Luca, E., Griffin, J.N., Hautier, Y., Hector, A., Jentsch, A., Kreyling, J., Lanta, V., Loreau, M., Meyer, S.T., Mori, A.S., Naeem, S., Palmberg, C., Polley, H.W., Reich, P.B., Schmid, Siebenkäs, A., Seabloom, E., Thakur, M.P., Tilman, D., Vogel, A., Eisenhauer, N., 2016. Plant diversity effects on grassland productivity are robust to both nutrient enrichment and drought. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 371, <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0277>.
 - Cruz, P., Theau, J. P., Lecloux, E., Jouany, C., Duru, M., 2010. Typologie fonctionnelle de graminées fourragères pérennes: une classification multitraits. *Fourrages* 201, 11-17.
 - De Martonne, E., 1942. Nouvelle carte mondiale de l'indice d'aridité. *Annales de Géographie* 51, 242-250.
 - de Wit, A., Duveiller, G., Defourny, P., 2012. Estimating regional winter wheat yield with WOFOST through the assimilation of green area index retrieved from MODIS observations. *Agricultural and Forest Meteorology* 164, 39-52.
 - Diodato, N., Ceccarelli, M., 2004. Multivariate indicator Kriging approach using a GIS to classify soil degradation for Mediterranean agricultural lands. *Ecological Indicators* 4, 177-187.
 - Donatelli, M., Acutis, M., Fila, G., Bellocchi, G., 2002. A method to quantify time mismatch of model estimates. In *Proceedings of the 7th European Society for Agronomy Congress*, 15-18 July, Cordoba, Spain, pp. 269-270.
 - Drouzas, I., Challinor, A.J., Swiderski, M., Semenov, M.A., 2019. New modelling technique for improving crop model performance - Application to the GLAM model. *Environmental Modelling & Software* 118, 187-200.
 - Dunford, R.W., Smith, A.C., Harrison, P.A., Hanganu, D., 2015. Ecosystem service provision in a changing Europe: adapting to the impacts of combined climate and socio-economic change. *Landscape Ecology* 30, 443-461.
 - EC, 2008. Regulation (EC) No 1166/2008 of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on farm structure surveys and the survey on agricultural production methods and repealing Council Regulation (EEC). *Official Journal of the European Union*, Brussels, Belgium.
 - Eitzinger, J., Thaler, S., Schmid, E., Strauss, F., Ferrise, R., Moriondo, M., Bindi, M., Palosuo, T., Rötter, R., Kersebaum, K.C., Olesen, J.E., 2013. Sensitivities of crop models to extreme weather conditions during flowering period demonstrated for maize and winter wheat in Austria. *The Journal of Agricultural Science* 151, 813-835.
 - Fakarayi, T., Mashapa, C., Gandiwa, E., Kativu, S., 2017. Pattern of land-use and land cover changes in Driefontein grassland important bird area, Zimbabwe. *Tropical Conservation Science* 8, 274-283.
 - Finger R, Hediger W, Schmid S (2011) Irrigation as adaptation strategy to climate change - a biophysical and economic appraisal for Swiss maize production. *Climatic Change* 105, 509-528.
 - Gardarin, C. Durr, Colbach, N., 2012. Modeling the dynamics and emergence of a multispecies weed seed bank with species traits. *Ecological Modelling* 240, 123-138.
 - Gibson, L., Münch, Z., Palmer, A., Mantel, S., 2018. Future land cover change scenarios in South African grasslands - implications of altered biophysical drivers on land management. *Heliyon* 4: e00693.

- Graux, A.-I., Bellocchi, G., Lardy, R., Soussana, J.-F., 2013. Ensemble modelling of climate change risks and opportunities for managed grasslands in France. *Agricultural and Forest Meteorology* 170, 114-131.
- Graux, A.-I., Lardy, R., Bellocchi, G., Soussana, J.-F., 2012. Global warming potential of French grassland-based dairy livestock systems under climate change. *Regional Environmental Change* 12, 751-763.
- Hirose, T., Werger, M.J.A., van Rheenen, J.W.A., 1989. Canopy development and leaf nitrogen distribution in a stand of *Carex acutiformis*. *Ecology* 70, 1610-1618.
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192312002857>
- Isselstein, J., Jeangros, B., Pavlu, V., 2005. Agronomic aspects of extensive grassland farming and biodiversity management. *Agronomy Research* 10, 211-220.
- Klepper, O., Rouse, D.I., 1991. A procedure to reduce parameter uncertainty for complex models by comparison with real system output illustrated on a potato growth model. *Agricultural Systems* 36, 375-395.
- Lemaire, G., Hodgson, J., Chabbi, A., 2011. Food security and environmental impacts: challenge for grassland science. In: Lemaire, G., Hodgson, J., Chabbi, A. (eds.) *Grassland productivity and ecosystem services*. CAB International, Wallingford, United Kingdom, pp. xiii-vii.
- Loreau, M., 2010. Linking biodiversity and ecosystems: towards a unifying ecological theory. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 365, 49-60.
- Maire, V., 2009. Des traits des graminées au fonctionnement de l'écosystème prairial : une approche de modélisation mécaniste. Thèse doctorale de l'Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, Clermont-Ferrand, France. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00725487>
- Mangani, R., Tesfamariam, E., Bellocchi, G., Hassen, A., 2018. Modelled impacts of extreme heat and drought on maize yield in South Africa. *Crop & Pasture Science* 69, 703-716.
- Mangani, R., Tesfamariam, E.H., Engelbrecht, C.J., Bellocchi, G., Hassen, A., Mangani, T., 2019. Potential impacts of extreme weather events in main maize (*Zea mays* L.) producing areas of South Africa under rainfed conditions. *Regional Environmental Change* 19, 1441-1452.
- Marquard, E., Weigelt, A., Temperton, V.M., Roscher, C., Schumacher, J., Buchmann, N., Fischer, M., Weisser, W.W., Schmid, B., 2009. Plant species richness and functional composition drive overyielding in a six-year grassland experiment. *Ecology* 90, 3290-3302.
- Meisser, M., Deléglise, C., Freléhoux, F., Chassot, A., Jeangros, B., Mosimann, E., 2014. Foraging behaviour and occupation pattern of beef cows on a heterogeneous pasture in the Swiss Alps. *Czech Journal of Animal Science* 59, 84-95.
- Meziene, D., Shipley, B., 2001. Direct and indirect relationships between specific leaf area, leaf nitrogen and leaf gas exchange. Effects of irradiance and nutrient supply. *Annals of Botany* 88, 915-927.
- Minson, D.J., McDonald, C.K., 1987. Estimating forage intake from the growth of beef cattle. *Tropical Grasslands* 21, 116-122.
- Monteith, J.L., 1965. Light distribution and photosynthesis in field crops. *Annals of Botany* 29, 17-37.
- Movedi, E., Bellocchi, G., Argenti, G., Paleari, L., Vesely, F., Stagliano, N., Dibari, C., Confalonieri, R., 2019. Development of generic crop models for simulation of multi-species plant communities in mown grasslands. *Ecological Modelling* 401, 111-128.
- Münch, Z., Okoye, P.I., Gibson, L., Mantel, S., Palmer, A., 2017. Characterizing degradation gradients through land cover change analysis in rural Eastern Cape, South Africa. *Geoscience Journal* 7, 1-7.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282-290.
- Nie, Z.N., Miller, S., Moore, G.A., Hackney, B.F., Boschma, S.P., Reed, K.F.M., Mitchell, M., Albertsen, T.O., Clark, S., Craig, A.D., Kearney, G., Li, G.D., Dear, B.S., 2008. Field evaluation of perennial grasses and herbs in southern Australia. 2. Persistence, root characteristics and summer activity. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48, 424-435.
- Norberg, J., Swaney, D.P., Dushoff, J., Lin, J., Casagrandi, R., Levin, S.A., 2011. Phenotypic diversity and ecosystem functioning in changing environments: A theoretical framework. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 98, 11376-11381.
- Oertel, C., Matschullat, J., Zurba, K., Zimmermann, F., Erasmi, S., 2016. Greenhouse gas emissions from soils - A review. *Geochemistry* 76, 327-352.
- Osone, Y., Ishida, A., Tateno, M., 2008. Correlation between relative growth rate and specific leaf area requires associations of specific leaf area with nitrogen absorption rate of roots. *New Phytologist* 179, 417-427.
- Pagani, V., Guarneri, T., Fumagalli, D., Movedi, E., Testi, L., Klein, T., Calanca, P., Villalobos, F., Lopez-Bernal, A., Niemeyer, S., Bellocchi, G., Confalonieri, R., 2017. Improving cereal yield forecasts in Europe - The impact of weather extremes. *European Journal of Agronomy* 89, 97-106.
- Palosuo, T., Kersebaum, K.C., Angulo, C., Hlavinka, P., Moriondo, M., Olesen, J.E., Patil, R.H., Ruget, F., Rumbaur, C., Takáč, J., Trnka, M., 2011. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: a comparison of eight crop growth models. *European Journal of Agronomy* 35, 103-114.
- Parr, C.L., Lehmann, C.E., Bond, W.J., Hoffmann, W.A., Andersen, A.N., 2014. Tropical grassy biomes: misunderstood, neglected, and under threat. *Trends in Ecology & Evolution* 29, 205-213.
- Peyraud, J.L., 2019. Introduction. La prairie entre intérêts publics et (des)intérêt des éleveurs. Journées de printemps de l'AFPF, mars 2019, Paris, France. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02091618>
- Peyraud, J.L., Peeters, A., De Vlieghe, A., 2012. Place et atouts des prairies permanentes en France et en Europe. *Fourrages* 211, 195-204.
- Picon-Cochard, C., Hernandez, P., 2015. Rôle des racines profondes dans la récupération après un stress hydrique sévère de mélanges prairiaux. Colloque présentant les méthodes et résultats du projet Climagie (méta-programme ACCAF), 16-17 novembre 2015, Poitiers, France, 223 p.
- Plantureux, S., Peeters, A., McCracken, D., 2005. Biodiversity in intensive grasslands: Effect of management, improvement and challenges. *Agronomy Research* 3, 153-164.
- Pontes, L.d.S., Louault, F., Carrère, P., Maire, V., Andueza, D., Soussana, J.-F., 2010. The role of plant traits and their plasticity in the response of pasture grasses to nutrients and cutting frequency. *Annals of Botany* 105, 957-965.
- Pontes, L.d.S., Maire, V., Schellberg, J., Louault, F., 2015. Grass strategies and grassland community responses to environmental drivers: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 35, 1297-1318.
- Poorter, H., de Jong, R., 1999. A comparison of specific leaf area, chemical composition and leaf construction costs of field plants from 15 habitats differing in productivity. *New Phytologist* 143, 163-176.

- Quijas, S., Jackson, L.E., Maass, M., Schmid, B., Raffaelli, D., Balvanera, P., 2012. Plant diversity and generation of ecosystem services at the landscape scale: expert knowledge assessment. *Journal of Applied Ecology* 49, 929-940.
- Reeg, J., Heine, S., Mihan, C., McGee, S., Preuss, T.G., Jeltsch, F., 2018. Simulation of herbicide impacts on a plant community: comparing model predictions of the plant community model IBC-grass to empirical data. *Environmental Sciences Europe* 30: 44.
- Rosenzweig, C., Jones, J.W., Hatfield, J.L., Ruane, A.C., Boote, K.J., Thorburn, P., Antle, J.M., Nelson, G.C., Porter, C., Janssen, S., Asseng, S., Basso, B., Ewert, F., Wallach, D., Baigorria, G., Winter, J.M., 2013. The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): Protocols and pilot studies. *Agricultural and Forest Meteorology* 170, 166-182.
- Sándor, R., Barcza, Z., Acutis, M., Doro, L., Hidy, D., Köchy, M., Minet, J., Lellei-Kovács, E., Ma, S., Perego, A., Rolinski, S., Ruget, F., Sanna, M., Seddaiu, G., Wu, L., Bellocchi, G., 2017. Multi-model simulation of soil temperature, soil water content and biomass in Euro-Mediterranean grasslands: Uncertainties and ensemble performance. *European Journal of Agronomy* 88, 22-40.
- Sándor, R., Picon-Cochard, C., Martin, R., Louault, F., Klumpp, K., Borrás, D., Bellocchi, G., 2018. Plant acclimation to temperature: Developments in the Pasture Simulation model. *Field Crops Research* 222, 238-255.
- Schenk, H.J., Jackson, R.B., 2002. Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystem. *Journal of Ecology* 90, 480-494.
- Schirpke, U., Kohlera, M., Leitinger, G., Fontana, V., Tasser, E., Tappeiner, U., 2017. Future impacts of changing land-use and climate on ecosystem services of mountain grassland and their resilience. *Ecosystem Services* 26, 79-94.
- Sommer, R., Glazirina, M., Yuldashev, T., Otarov, A., Ibraeva, M., Martynova, L., Bekenov, M., Kholov, B., Ibragimov, N., Kobilov, R., Karaev, S., Sultonov, M., Khasanova, F., Esanbekov, M., Mavlyanov, D., Isaev, S., Abdurahimov, S., Ikramov, R., Shezdyukova, L., de Pauw, E., 2013. Impact of climate change on wheat productivity in Central Asia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 178, 78-99.
- Sommer, R., Kienzler, K., Conrad, C., Ibragimov, N., Lamers, J., Martius, C., Vlek, P., 2008. Evaluation of the CropSyst model for simulating the potential yield of cotton. *Agronomy for Sustainable Development* 28, 345-354.
- Stöckle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18, 289-307.
- Tingem, M., Rivington, M., 2009. Adaptation for crop agriculture to climate change in Cameroon: turning on the heat. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 14, 153-168.
- Tribot, A.-S., Deter, J., Mouquet, N., 2018. Integrating the aesthetic value of landscapes and biological diversity. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 285, 20180971.
- Turnbull, L.A., Isbell, F., Purves, D.W., Loreau, M., Hector, A., 2016. Understanding the value of plant diversity for ecosystem functioning through niche theory. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 14: 283.
- van der Velde, M., Nisini, L., 2019. Performance of the MARS-crop yield forecasting system for the European Union: Assessing accuracy, in-season, and year-to-year improvements from 1993 to 2015. *Agricultural Systems* 168, 203-212.
- van Diepen, C.A., Wolf, J., van Keulen, H., Rappoldt, C., 1989. WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management* 5, 16-24.
- Van Keulen, H., Wolf, J., 1986. Modelling of agricultural production: weather soils and crops. *Simulation Monographs*. Pudoc, Wageningen, The Netherlands.
- van Klink, R., van der Plas, F., van Noordwijk, C.G.E. (Toos), Wallis DeVries, M.F., Olf, H., 2015. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 90, 347-366.
- Van Oijen, M., Bellocchi, G., Höglind, M., 2018. Effects of climate change on grassland biodiversity and productivity: the need for a diversity of models. *Agronomy* 8, 14.
- Vogel, A., Scherer-Lorenzen, M., Weigelt, A., 2014. Grassland resistance and resilience after drought depends on management intensity and species richness. *PLoS ONE* 7: e36992.
- Weiner, C.N., Werner, M., Linsenmair, K.E., Blüthgen, N., 2011. Land use intensity in grasslands: Changes in biodiversity, species composition and specialisation in flower visitor networks. *Basic and Applied Ecology* 12, 292-299.
- Wielgolaski, F.E., 1999. Starting dates and basic temperatures in phenological observations of plants. *International Journal of Biometeorology* 42, 158-168.
- Yachi, S., Loreau, M., 1999. Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment: the insurance hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 96, 1463-1468.
- Yang, J., Greenwood, D.J., Rowell, D.L., Wadsworth, G.A., Burns, I.G., 2000. Statistical methods for evaluating a crop nitrogen simulation model, N_ABLE. *Agricultural Systems* 64, 37-53.
- Yang, S., Logan, J., Coffey, D.L., 1995. Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days. *Agricultural and Forest Meteorology* 74, 61-74.
- Zavaleta, E.S., Pasari, J.R., Hulvey, K.B., Tilman, G.D., 2010. Sustaining multiple ecosystem functions in grassland communities requires higher biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107, 1443-1446.
- Zeller, U., Starik, N., Göttert, T., 2017. Biodiversity, land use and ecosystem services - An organismic and comparative approach to different geographical regions. *Global Ecology and Conservation* 10, 114-125.

Annexes

Annexe 1 : Notion des services écosystémiques et leurs catégories

La notion de service écosystémique, introduite dans le *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA, 2005), se résume aux bénéfices pour la société qui résultent du fonctionnement de l'écosystème. Ces services sont organisés en quatre catégories selon la Classification Internationale Commune des Services Écosystémiques (CICES, <https://cices.eu>) : d'approvisionnement, de régulation, culturels et de soutien (Haines-Young and Potschin, 2013 pour la version 4.3, désormais mise à jour par CICES V5.1, <https://cices.eu/resources>). Les services d'approvisionnement regroupent les bénéfices nutritionnels, matériels ou énergétiques délivrés par les écosystèmes tels que la production alimentaire (ou, pour les prairies, de fourrage) et la production de bois pour la construction ou le chauffage. Les services de régulation désignent les aspects de la participation des écosystèmes au maintien d'un environnement favorable au bien être humain. Parmi ces dernières nous pouvons citer la capacité à stocker et restituer de l'eau de qualité, la limitation de l'érosion des sols ou bien de la capacité à stocker du carbone dans les sols. Les services culturels couvrent tous les services non matériels qui contribuent au bien être mental et physique (ex. l'esthétique du paysage). Enfin, les services de soutien sont ceux nécessaires à la production de tous les autres services écosystémiques car ils assurent le bon fonctionnement de la biosphère. Leur influence sur l'homme est souvent indirecte ou étalée sur une très longue période. Ces services comprennent les grands cycles biogéochimiques (de l'eau, du carbone, etc.), la préservation du sol, la structure des communautés et la production primaire.

Dans le cas des agroécosystèmes prairiaux, on fait également appel à trois grandes catégories de services (Le Roux et al., 2008): les services intrants qui contribuent à la fourniture des ressources et au maintien des supports de la production agricole, les services produits qui englobent la fourniture de la nourriture pour les animaux (notamment la production des fourrages et la valeur alimentaire de ces fourrages), et les services hors revenu agricole ou environnementaux décrivant l'implication de processus et fonctions dans le maintien de la qualité de l'environnement (la séquestration du carbone ou le maintien de la qualité des eaux en sont des exemples).

Références bibliographiques sur les services écosystémiques

- Haines-Young, R., Potschin, M., 2013. CICES V4.3 - Revised report prepared following consultation on CICES Version 4, August-December 2012.
- Le Roux, X., Barbault, R., Baudry, J., Burel, F., Doussan, I., Garnier, E., Herzog, F., Lavorel, S., Lifran, R., Roger-Estrade, J., Sarthou, J.P., Trommetter, M., 2008. Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA, France.http://oatao.univ-toulouse.fr/16331/1/LeRoux_16331.pdf
- MEA, 2005. Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystem and human well-being: synthesis, Island Press, Washington DC, USA

Annexe 2 : Interface du modèle CoSMo avec les entées introduite

Select a Configuration or Generate it
 laqueuille_intensive Update

Entry start simulation day and end simulation day (dd/mm/yyyy)
 15/04/2002 31/12/2017

Write the Configuration name
 laqueuille_intensive

Write the latitude value
 45.15833

Specify the grass species in mixture
 Grass species in mixture

Select weather file
 C:\Users\Acer\Desktop\stage 2019\stage 2019\Laqueuille\Laqueuille

Entry each information about management (grazing, irrigation or mowing)
 Natural grassland Lawn or pasture

Events added

Soil Proprieties
 Layer1 Layer2 Layer3 Layer4 Layer5 Layer6

Layer 1 Proprieties

Sand	Clay	Silt	C. Org.	Skeleton	Bulk density
26	25	49	12.68	2	0.591
Water Sat.	Field capacity	N. Org.	NO3-N kg/ha	Thickness (m)	
0.53	0.366	1.1523	0	0.02	
Wilting point	NH4-N kg/ha	Conductivity at sat mm/day	Copy proprieties from		
0.217	0	163			

OK Modify

Annexe 3 : Interface du modèle CoSMo avec la liste des paramètres, leur descriptions et valeurs attribuées à l'espèce *Poa pratensis*

Parameter name	Value	Description
ParameterKey	poa	
DayToRestartAfterMown>	2	Day tu start to regrowth after a mown
WaterCompetitionCoefficient>	0.7	Competitiveness in drought condition 1 tollerant
RootTypeNumber>	0	1 tap root 0 fibrous root
LowerCriticalTemperature>	0	Minim temperature
UpperCriticalTemperature>	32	Maximum temperature
GrowingDegreeDayRestart>	0	Growing degree days to emergence aftr resowing
GrowingDegreeDayMaturity>	100000000	Growing degree day to die
AnimalLiking cow>	0.86	Cow or bull liking
AnimalLiking goat>	0	Goat liking
AnimalLiking sheep>	0	Sheep liking
AnimalLiking horse>	0	Horse liking
AnimalLiking donkey>	0	Donkey liking
LAlmax>	5.5	Maximum LAI
MaximumHeight>	1	Maximum plant height
OptimalTemperature>	15	Optimal temperature
RootingDept>	80	Maximum rooting dept (cm)

Annexe 4 : Présentation de la structure d'accueil INRA

L'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), est une structure de recherche française, ayant le statut d'établissement public à caractère scientifique et technologique sous la tutelle du ministère de l'agriculture et du Ministère de la recherche de l'Agriculture et de l'alimentation et du Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation. Il est le premier institut de recherche agronomique en Europe et le deuxième en sciences agricoles dans le monde. Il a été fondé en 1946, au lendemain de la Seconde Guerre mondiale dans le but de répondre à la question "comment nourrir la France" alors que la pénurie alimentaire s'étend sur le territoire.

La fonction de cet institut est d'explorer, de comprendre, d'expérimenter, et d'anticiper sur différents domaines qui ont évolués depuis la création de l'institut, mais certains domaines restent les mêmes : l'alimentation, l'agriculture et l'environnement. Les enjeux majeurs de l'institut sont le territoire, la santé, le développement durable, la bio-économie et la compétition avec les entreprises privées. Depuis 2015, l'INRA s'inscrit dans une stratégie à long terme sur une période de 10 ans, dans le but d'atteindre différents objectifs : explorer de nouveaux mondes microbiens, modéliser les phénomènes naturels (culture et élevage du futur).

L'INRA Centre Auvergne-Rhône-Alpes comporte 29 unités réparties sur 15 sites, et cela représente environ 10% de l'effectif total de l'INRA. Mon stage a été effectué au sein de l'Unité Mixte de Recherche sur l'Ecosystème Prairial (UREP), dirigée par Catherine PICON-COCHARD. Elle se situe au site de Crouël à Clermont-Ferrand et ses dispositifs expérimentaux sont positionnés sur les domaines de Theix et de Laqueuille. Elle compte 25 agents permanents, dont 13 chercheurs et ingénieurs, 2 maîtres de conférences, 8 techniciens, 2 adjoints techniques et 9 agents non titulaires.

L'UREP possède une expertise internationale dans le domaine de l'écologie prairiale et plus particulièrement sur l'impact du changement climatique, les bilans de gaz à effet de serre, la séquestration de carbone, les cycles du carbone et de l'azote, les interactions plantes-sol (microorganismes) et herbe-animal, ou encore les effets des pratiques de gestion sur la dynamique prairiale (production). Elle est rattachée au Département Ecologie des Forêts, Prairies et milieux Aquatiques (EFPA).

Résumé

La prairie permanente procure de nombreux bénéfices. Elles constituent un réservoir de biodiversité animale et végétale. La diversité végétale soutient la forte aptitude des prairies à produire du fourrage et à contribuer au stockage du carbone, tout en garantissant la pollinisation et l'esthétique des paysages. Cette capacité dépend de l'intensité de gestion du système, des contraintes physiques et des caractéristiques climatiques. Afin de comprendre l'évolution de ces écosystèmes, une approche de modélisation s'avère être utile. Le modèle dynamique de prairies CoSMo (COmmunity Simulation MOdel) inclut un ensemble de règles permettant de simuler explicitement les changements au pas journalier de la composition botanique des prairies gérées sous différents facteurs de sol, de climat et de gestion, et il est cohérent avec le degré de complexité des simulateurs de culture génériques (CropSyst, WOFOST) dans lesquels il est intégré. Grâce au couplage des modèles, des simulations ont été réalisées sur deux couverts prairiaux complexes et pluriannuels du massif central gérés différemment. Les réponses tendent à être satisfaisantes, les modèles semblent être performants pour la dynamique végétale, bien que les fluctuations soient plus visibles avec WOFOST. La biomasse aérienne semble être mieux représentée avec les modèles couplés qu'autonomes.

Mots clé :

Prairies permanentes ; diversité végétale ; modélisation ; CoSMo ; dynamique végétale

Abstract

The permanent grassland provides many benefits. They constitute a reservoir of animal and plant biodiversity. Plant diversity supports the ability of grasslands to produce fodder and contribute to carbon storage, while ensuring pollination and landscapes aesthetics. This capacity depends on the intensity of management of the system, the physical constraints and the climatic characteristics. In order to understand the evolution of these ecosystems, a modeling approach proves to be useful. The CoSMo (Community Simulation MOdel) dynamic grassland model includes a set of rules for explicitly simulating daily changes in the botanical composition of grasslands managed under different soil, climate and management factors, and is consistent with the degree of complexity of the generic culture simulators (CropSyst, WOFOST) in which it is integrated. Thanks to the coupling of the models, simulations were carried out on two complex and multi-annual grasslands of the central massif managed differently. The answers tend to be satisfactory; the models seem to be performant for the vegetal dynamics, although the fluctuations are more visible with WOFOST. The aboveground biomass seems to be better represented with coupled than standalone models.

Keywords

Permanent grassland; plant diversity; modeling; CoSMo; vegetal dynamics