Changement climatique et pérennité de la production fourragère : Le cas des exploitations du Pays de la Déodatie (Vosges)

Plantureux Sylvain[1], Pires Benjamin[1], Mariau Alexandre[1], Salagnat Thomas[1], Barrier Pauline[2], Graux Anne-Isabelle[3]

1: Université de Lorraine, Inrae, LAE, F-54000 Nancy (France)

2: PETR du Pays de la Déodatie, F-88110 Saint-Dié-des-Vosges (France)

3 : PEGASE, INRAE, Institut Agro, 35590, Saint Gilles(France)

Mots-clés : prairie, simulation, changement climatique, STICS, rendement

Correspondance : Sylvain PLANTUREUX, ENSAIA, 2 avenue de la forêt de Haye, BP 20163, 54505 Vandoeuvre les Nancy Cedex, sylvain.plantureux@univ-lorraine.fr

Mise en situation

Afin d'évaluer les effets du changement climatique sur les systèmes fourragers du pays de la Déodatie (Vosges), la production de 315 ilots (748 parcelles) de 12 exploitations a été simulée sur la période 1989-2100 avec une version de recherche du modèle STICS. Une originalité de l'article est de s'intéresser à l'effet du type de prairie permanente sur la vulnérabilité au changement climatique.

Résumé

Afin d'étudier la vulnérabilité des élevages du Pays de la Déodatie au changement climatique, et donc leur pérennité, la production fourragère de parcelles fourragères (prairies permanentes et temporaires, maïs ensilage) a été simulée sur la période 1989-2100 avec le modèle mécaniste STICS. Les caractéristiques pédoclimatiques et le type de végétation de chaque parcelle a été prise en compte. Selon les types de prairies, les scénarios climatiques et techniques retenus, la production pourrait évoluer de -30 à +40% à l'horizon 2100 par rapport à 1989-2020. A l'échelle de l'exploitation on obtient une compensation qui permet un maintien de la production fourragère, ou une augmentation en cas d'intensification. Ce résultat est cependant associé à une augmentation du niveau de risque sur le plan fourrager, organisationnel et économique.

Summary

In order to study the vulnerability of livestock farms in the Pays de la Déodatie (Vosges mountains, France) to climate change, and therefore their sustainability, fodder production of fodder plots (permanent and temporary grasslands, forage maize) was simulated over the period 1989-2100 with the process-based crop model STICS. The pedoclimatic characteristics and the type of vegetation of each plot were considered. Depending on the types of grassland, the climate and technical scenarios chosen, production could change from -30 to +40% by 2100

compared to 1989-2020. At the farm level, compensation is obtained which allows fodder production to be maintained, or an increase in the event of intensification. However, this result is associated with an increase in the level of risk in terms of forage budget, farmer organization and profitability.

Introduction

Les prairies sont au cœur de nombreux enjeux : i) économiques, pour réduire les coûts de production et maintenir la rentabilité des élevages, ii) sociétaux, pour répondre aux attentes du consommateur et du citoyen, et iii) environnementaux, notamment pour contribuer à la préservation de la biodiversité et à la limitation du changement climatique. Face à ces enjeux multiples et parfois contradictoires, le changement climatique déjà constaté et annoncé conduit à s'interroger sur le rôle et l'avenir des prairies dans les systèmes d'élevage. D'un côté, les prairies sont présentées par certains comme une solution globale et résiliente, c'est-à-dire permettant de maintenir durablement les performances économiques et environnementales des exploitations. D'un autre côté, des interrogations naissent du constat de sensibilité des prairies aux sécheresses et canicules de plus en plus fréquentes et de plus en plus sévères. Même si les autres productions fourragères sont également impactées par le changement climatique, l'avenir des prairies est questionné, et la diminution régulière des surfaces en France comme en Europe peut en partie être imputée à la recherche de solutions pour faire face à ce changement climatique.

Le territoire du Pays de la Déodatie est au cœur de ces questionnements. Ce territoire, organisé en Pôle d'Equilibre Territorial et Rural (PETR), regroupe 111 communes représentant 1219 km^2 de l'Ouest du massif Vosgien, dans des situations de moyenne montagne et de piémont. Les 574 exploitations du territoire sont principalement des élevages (bovin lait et bovin viande) qui contribuent significativement à la vie économique (alimentation, tourisme) et sociale. La prairie est la source d'alimentation principale des troupeaux, puisqu'elle représente 80% de la SAU. Face au changement climatique, nombre d'éleveurs font le choix de maintenir le niveau de production fourragère en intensifiant les prairies permanentes (précocité et fréquence d'exploitation, chargement et fertilisation), et en augmentant la proportion de prairies temporaires et de maïs-fourrage, lorsque les parcelles sont mécanisables. Cette évolution interroge les élus du PETR qui, dans le cadre d'un programme d'évaluation de la vulnérabilité des systèmes fourragers basés sur l'herbe, souhaitent savoir si cette intensification permettra de maintenir une activité rentable d'élevage. Cette question est d'autant plus importante que l'intensification fourragère a par ailleurs des conséquences environnementales négatives: perte de biodiversité, diminution du stockage de carbone, risque accru de pollution de l'eau et d'érosion des sols.

L'évaluation des effets du changement climatique sur les systèmes fourragers en général, ou sur les prairies en particulier, est une problématique émergente, tant du point de vue de la recherche que du développement agricole, au niveau national et international. Deux outils principaux sont mis en place par la recherche pour étudier ces effets : 1) des expérimentations en conditions contrôlées (serres, chambres de cultures, enceintes en plein champ) et sur des durées assez courtes (Cantarel et al. 2013; Lüscher et al. 1997; Naudts et al. 2013; Soussana et al. 2005), 2) des simulations mettant en œuvre différents modèles mécanistes (STICS, PASIM, DynaGraM, …) en s'intéressant généralement à des périodes allant de décennies au siècle à venir (Chang et al. 2017; Graux et al. 2020; van Oijen et al. 2018; Ruget et al. 2006). Compte-tenu de l'importante diversité des conditions d'étude (type de végétation, environnement pédoclimatique, nature des modèles et des dispositifs expérimentaux), des revues et des méta-analyses de tous ces travaux ont été publiées (Dumont et al. 2015;

Ghahramani et al. 2019; Hopkins and Del Prado 2007). La Revue Fourrages a récemment consacré un numéro spécial (#244 en 2020) sur la question de la production de fourrages dans un contexte de changement climatique. Il rend compte de l'accroissement du nombre des projets, associant souvent le développement agricole et la recherche, autour de cette thématique (ex : CLIMALAIT, CLIMAVIANDE, CLIMFOURREL, CLIMATOR, …). Plusieurs approches sont mises en œuvre, soit basées sur des modèles de simulation des cultures et prairies, soit sur des indicateurs agro-climatiques.

S'agissant des impacts sur la composition, la production de biomasse et la qualité du fourrage, quelques grandes conclusions ressortent de ces travaux. Les impacts du changement climatique sur les prairies sont très variables selon les situations. Pour la production, et en analysant 256 études mondiales, (Li et al. 2018) rapportent qu'un réchauffement de 2°C de la planète se traduirait par une augmentation de la production d'herbe dans 50% des cas, et seulement dans 10% des cas pour un réchauffement de 4°C. Ces effets peuvent notamment s'expliquer par une compensation variable entre les facteurs positifs pour la croissance des plantes (élévation de la teneur en CO2, réchauffement des températures printanières et automnale) et les facteurs négatifs (déficit hydrique accru, dépassement des températures limites de croissance de l'herbe). La qualité des fourrages sera également impactée, et plusieurs travaux indiquent une amélioration de la valeur énergétique au détriment de la valeur protéique des prairies (Soussana 2013). Les impacts sur la composition des prairies permanentes ont été étudiés sur des groupes fonctionnels ou sur la richesse spécifique (Moulin et al. 2021; Pearman 2011), en démontrant notamment un effet positif sur les légumineuses au détriment des graminées. Il n'est malheureusement pas encore possible d'évaluer le comportement de l'ensemble des espèces de la flore prairiale.

Si le changement climatique influera la composition floristique des prairies, il est important de se poser la question du rôle de cette composition, et donc du type de prairie, dans le comportement des prairies vis-à-vis du changement climatique. En effet, les éleveurs gèrent en général sur leur exploitation plusieurs types de prairie, et les effets du changement climatique dépendront de ces comportements. En utilisant le modèle DynaGraM, (Moulin and Calanca 2020) suggère que les végétations des prairies gérées extensivement seraient plus résilientes vis-à-vis du changement climatique.

Le premier objectif du présent article est de montrer comment les différents types de prairie peuvent réagir à ce changement climatique. En partant d'un échantillon de onze types de prairies permanentes et d'un type de prairie temporaire réparties sur le territoire du Pays de la Déodatie, nous avons simulé l'évolution de leur rendement entre 1989 et 2100, en utilisant 2 scénarios climatiques et 3 scénarios techniques.
Le deuxième objectif est de montrer comment ces simulations se répercutent à l'échelle du bilan fourrager de l'exploitation. Pour ce faire, des simulations de rendement du maïs fourrage ont été réalisées, et les ilots des 12 exploitations ont été pris en compte au prorata de leur surface.

Matériel et Méthodes

Echantillon d'exploitation et de parcelles

Afin d'étudier un échantillon de prairies représentatif de la diversité de situations du Pays de la Déodatie, nous sommes partis d'une enquête réalisée par le PETR décrivant 130 (sur 574) des

exploitations du territoire. En croisant le type d'atelier animal, la proportion de STH dans la SAU, le chargement animal et le secteur géographique, 12 exploitations ont été retenues comme représentatives des exploitations du territoire. Ces exploitations comportent 715 parcelles fourragères qui ont été regroupées en 315 ilots pour limiter le nombre de simulations à effectuer. Un ilot correspond à un ensemble de parcelles ayant le même type de végétation, les mêmes conditions pédoclimatiques et la même gestion. 237 ilots correspondent à des parcelles de prairies permanentes, les autres ilots étant cultivés en prairie temporaire continue (prairie régulièrement ressemée), ou en prairie temporaire au sein d'une rotation avec du maïs ou des culture céréalières. Les 237 ilots de prairie permanente ont été classés en utilisant la typologie des prairies permanentes du massif Vosgien (Plantureux et al. 2021), sur la base des informations fournies par les éleveurs et d'informations cartographiques (sol, altitude, pente). 11 types (parmi les 15 types du massif vosgien) ont été trouvés au sein des 12 exploitations (Tableau 1).

Type	Typologie prairie massif vosgien	Effectif
Prairie permanente fauchée ou mixte	CF2/CF3	34
	CF3	7
	CF5	40
	CF6	37
	CF8	31
	MF1	14
Prairie permanente exclusivement pâturée	CP1	2
	CP2	18
	CP2/CP3	3
	CP3	39
	MP1/MP2	12
Prairies temporaires (PT)		15
Rotation PT + Maïs		50
Rotation PT + autres cultures		13
	Total Prairies Permanentes	237
	Total ensemble des ilots	315

Tableau 1 : Répartition des ilots de parcelles fourragères des 12 exploitations du Pays de la Déodatie

Renseignement des entrées nécessaires aux simulations réalisées avec le modèle STICS

Le modèle de simulation des cultures et prairies STICS a été choisi pour plusieurs raisons : 1) il permet de simuler la croissance de plantes (prairies et autres cultures fourragères telles que le maïs) avec un paramétrage du type de plante suffisamment détaillé pour prendre en compte différents types de prairies permanentes, 2) il prend en compte les facteurs pédologiques, climatiques et de gestion, 3) A l'origine le modèle s'adressant aux grandes cultures, il a ensuite été modifié pour prendre en compte les prairies et leur récolte plusieurs fois dans l'année (récolte mécanique ou pâturage), 4) Le modèle fait partie des modèles ayant été le plus utilisé par la communauté agronomique en France, et ayant fait l'objet de nombreuses validations. Le modèle peut simuler à un pas de temps journalier la croissance de l'herbe, à partir de paramètres décrivant le sol, le climat, la gestion et la plante.

Les productions d'herbe simulées par STICS correspondent à un potentiel de production, mais l'herbe effectivement valorisée par un éleveur est inférieure à cette valeur, en raison des pertes à la récolte et au pâturage, ou à l'herbe non utilisée en fin de cycle ou de saison, qui est susceptible de des dégrader. Les simulations restent néanmoins pertinentes pour comparer différentes situations.

Pour décrire le sol de chaque ilot, deux bases de données ont été combinées : La données de la Base de Données Géographique des Sols de France (BDGSF) au 1/1 000 000 a été utilisée car les développeurs de STICS ont renseigné la valeur de l'ensemble des paramètres sol pour les différents types de sols de cette base. Dans cette base, chaque sol est proposé avec des variantes. Pour le choix de cette variante, nous avons utilisé la base du Référentiel Régional Pédologique (RRP) de Lorraine dont l'intérêt est la définition au 1/250000, ce qui a permis de rapprocher chaque ilot d'un sol du RRP.

Les informations climatiques historiques (1989-2020) et futures (2021-2100) de Météo-France ont été obtenues sur le portail DRIAS et ont été mises au format STICS. Le territoire de Déodatie a été découpé en 17 mailles de 8x8 kms, selon le découpage « SAFRAN » proposé par Météo-France. Pour adapter les données climatiques aux localisations des parcelles (altitude, versant), la correction de l'altitude est réalisée directement par le modèle STICS, qui s'appuie sur la différence entre la valeur de l'altitude de la maille climatique considérée et l'altitude réelle de la parcelle. Cette dernière a été déterminée grâce au Modèle Numérique de Terrain (MNT) issu de la BD ALTI®, référentiel français pour le relief de la France. Ce jeu de données provient des données libres (sous licence ouverte) produites par l'IGNF. Les valeurs de concentrations en CO_2 de ces fichiers n'étant pas fournies par DRIAS, elles ont été obtenues auprès de « L'Institut Pierre Simon Laplace ».

Deux **scénarios climatiques** ont été utilisés pour la période 2021-2100, en s'appuyant sur les scénarios de forçage radiatif (RCP ou Representative Concentration Pathway) proposées par le GIEC : un scénario « optimiste » prévoyant une maîtrise des émissions de gaz à effets de serre et une augmentation des températures planétaires de moins de 2°C à l'horizon 2100 (scénario RCP2.6), et un scénario « pessimiste » poursuivant les tendances actuelles et aboutissant à un réchauffement de plus de 4°C (scénario RCP8.5). Différents modèles climatiques globaux et régionaux peuvent être utilisés pour simuler les évolutions de température, de précipitations et de rayonnement liées à ces données de radiation. Le modèle ALADIN a été retenu, issu des travaux du CNRM (Centre national de recherche météorologique). En considérant l'ensemble des 17 mailles de 8x8kms du Pays de la Déodatie, ces modèles prévoient à l'échéance 2100 en moyenne une hausse des températures et des teneurs en CO_2 atmosphérique (RCP2.6 : +1,5°C et +150ppm CO_2, RCP8.5 : +5,0°C et +600ppm) et un maintien des précipitations annuelles (de l'ordre de 1600 à 1880 mm par an). Le bilan hydrique climatique devrait par contre s'aggraver en été avec des déficits hydriques plus prononcés et plus longs (Figure 1).

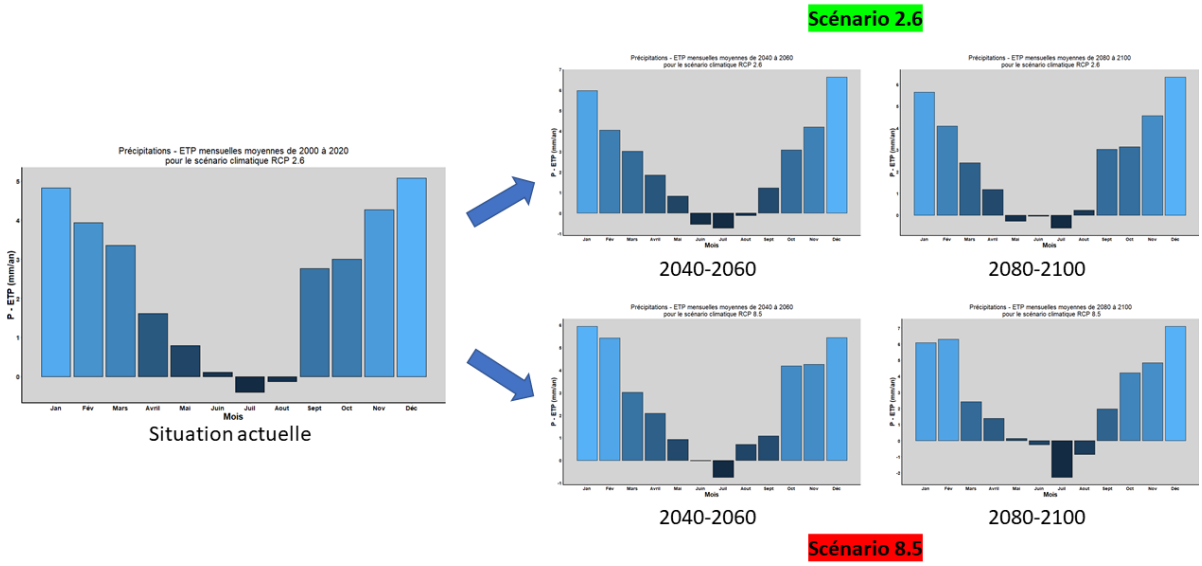


Figure 1 : Bilan hydrique climatique (différence entre précipitations et évapotranspiration potentielle) moyen du Pays de la Déodatie (Vosges) actuellement (1989-2020) et pour deux périodes du futur et deux scénarios climatiques.

La gestion technique des parcelles a été déterminée à partir d'une enquête auprès des 12 exploitations. L'enquête a porté sur la gestion « habituelle » des cinq dernières années, en termes de mode d'utilisation des prairies (date, durée, fréquence, intensité pour les récoltes mécaniques et le pâturage), de fertilisation organique et minérale de toutes les parcelles, et d'opérations culturales pour les cultures fourragères (exclusivement maïs fourrage). De plus, les éleveurs ont été interrogés sur les évolutions techniques qu'ils envisageaient dans le futur, en vue de s'adapter au changement climatique. Pour la période 1989-2020, les simulations par STICS ont été réalisées en suivant la gestion mise en œuvre par les éleveurs. Le pâturage a été simulé par des coupes fréquentes, dès que la hauteur d'herbe le permettait. Pour la période 2021-2100, plusieurs scénarios techniques ont été élaborés. Les scénarios modifient à la fois la nature des ilots au sein d'une exploitation (par exemple des prairies sont transformées en maïs, ou le type de végétation d'une prairie permanente est changé) et le mode de gestion d'un ilot (par exemple la fertilisation est augmentée ou diminuée, et la première exploitation d'une prairie est plus précoce).

Scénario « business As Usual » (BAU), où le mode de gestion des surfaces fourragères est inchangé jusqu'en 2100. Seules les dates d'exploitation sont ajustées pour tenir compte de la précocité croissante de la croissance de l'herbe au printemps.

- Scénario « Diversification », où la proportion de prairies temporaires est accrue (maximum de 30% de la SAU, pente <20%), pour obtenir des surfaces fourragères plus diversifiées (équilibre des surfaces en PP/PT/Maïs), tout en conservant la diversité des types de prairies permanentes.

- Scénario « Intensification », où la proportion de maïs est augmentée (maximum de 20% de la SAU, pente <20% et altitude <600m) et , ainsi que la fertilisation de l'ensemble des prairies (fertilisation ajustée pour éliminer tout stress azoté). L'intensification se traduit aussi par une évolution des types de prairies permanentes.

Le paramétrage « plante » du modèle STICS est un élément clé de la présente étude, car il permet de représenter les différences entre les types de prairie, et explique donc en grande partie les résultats obtenus. Le paramétrage de la version de STICS utilisée dans ce travail se base sur le paramétrage

des prairies adopté dans l'étude « Prairies » (Graux et al., 2020) et sur des améliorations en cours (projet ADEME CarSolEl) pour mieux représenter la dynamique de la matière organique sous prairie. Un raffinement a en outre été apporté dans le cadre des besoins de cette étude pour pouvoir représenter différents types de prairie. Le paramétrage de chacun des types de prairie s'est basé sur la valeur des paramètres des types fonctionnels de graminées «A, B, b, C, D, d» de la classification proposée par (Cruz et al. 2010). Ces valeurs de paramètres pour STICS ont été communiquées par A.I. Graux de l'INRAE Rennes (communication personnelle). Ce paramétrage n'a pas encore fait l'objet d'une évaluation complète (actuellement limitée aux types A et B)et la version du modèle utilisée est une version de recherche.12 paramètres « plante » de STICS ont ainsi adaptés pour décrire un type fonctionnel de graminée. Ces paramètres concernent la phénologie, la photosynthèse (efficience d'utilisation du rayonnement), la croissance foliaire (surface spécifique, et croissance maximale de l'indice foliaire), la hauteur du couvert (hauteur maximale), et la croissance des racines (longueur spécifique) et. Un type de prairie a été défini ensuite comme l'association (en % de la biomasse produite) de plusieurs de ces types fonctionnels de graminées. La typologie des prairies permanentes du massif vosgien permet de connaitre la proportion de ces types fonctionnels de graminées au sein d'un type de prairie. Par exemple, le type de prairie permanente CF5 est composé en moyenne de 61% de graminées de type A, 6% de type B, 21% de type C et 12% de type D. Les valeurs des paramètres STICS du type de prairie CF5 correspondent à la moyenne des valeurs des types de graminées A à D, pondérée par le pourcentage de chaque type de graminée dans le type CF5. Les prairies temporaires ont été représentées comme un couvert pur de graminée de type A (graminées productives comme le Ray-grass anglais). Pour le maïs, un hybride précoce a été retenu.

Résultats

Les résultats présentés dans le présent article sont issues de 211680 simulations annuelles, correspondant à la combinaison de 3 scénarios techniques, 2 scénarios climatiques, 112 années (de 1989 à 2100) et 315 ilots.

La production d'herbe des prairies évolue de manière très variable selon les types de prairie

La Figure 2 montre que, pour tous types de prairies permanentes confondus (PP), la production annuelle d'herbe des prairies a tendance en moyenne à diminuer dans le scénario de faible changement climatique (RCP2.6), et à se maintenir voire à augmenter dans le scénario de fort changement climatique (8.5). L'augmentation est plus prononcée dans le cas du scénario technique d'intensification des prairies. La variabilité interannuelle des rendements n'évolue pas au fil du temps. Ces évolutions pour tous les types de prairies cachent cependant des différences de comportement selon les types de prairies. Les 6 graphiques à la droite de la Figure 2, montrent que dans le cas du scénario climatique RCP8.5, et pour 3 types de prairie du massif vosgien (CF5, CF6 et CP2), les rendements augmentent au fil du temps, sauf pour le type CP2 dont le rendement diminue fortement dans le scénario technique BAU.

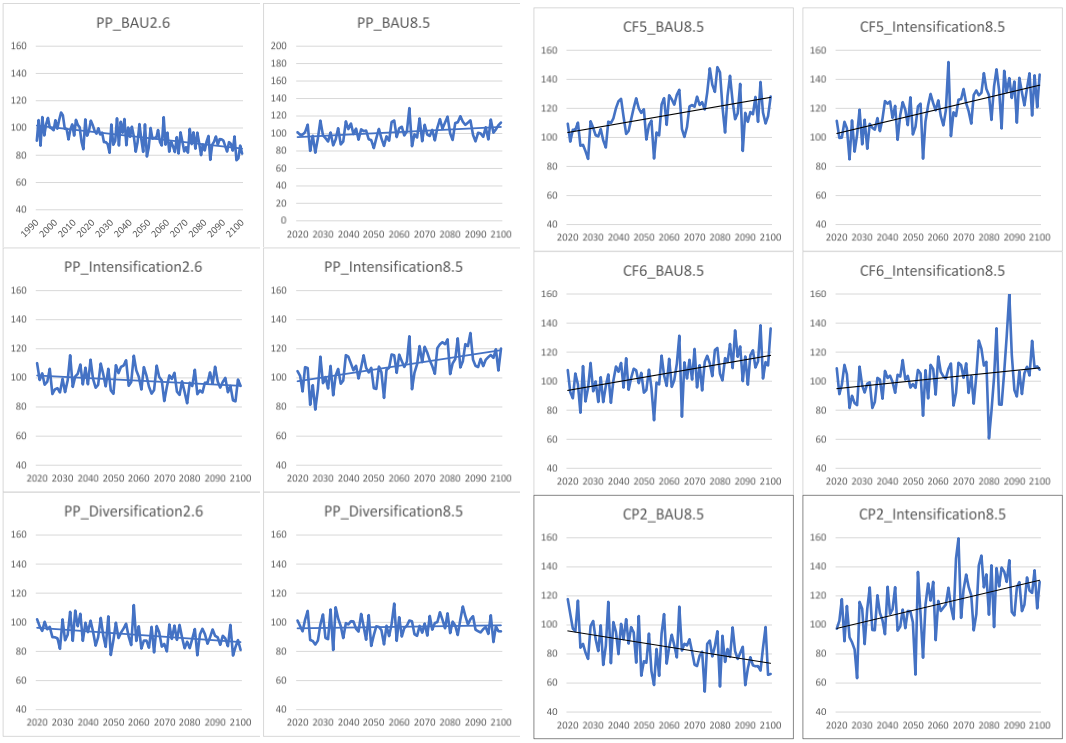


Figure 2 : Simulation par le modèle STICS de la production annuelle de MS selon deux scénarios climatiques (RCP2.6 ou RCP8.5), 3 scénarios techniques (Business As Usual ou BAU, Intensification, Diversification), pour l'ensemble des 237 ilots de prairie permanentes (titre du graphique commençant par PP), ou pour les types de prairie CF5, CF6 ou CP2 (types de la typologie des prairies permanentes du massif vosgien). Base 100 = production moyenne 1989-2020 de la situation simulée.

Le Tableau 2 détaille les évolutions de chaque type de prairie pour les scénarios climatiques et techniques. L'altitude des prairies (types MF au-dessus de 800m, et CF et CP en-dessous de 800m) ou le mode d'exploitation (MP ou CP = pâture exclusive, MF ou CF = fauche exclusive ou mixte fauche-pâture) n'apparaissent pas comme des facteurs explicatifs de l'évolution des rendements. Pour les prairies de fauche ou mixte, il apparait que les prairies les plus productives (CF2/CF3 et CF3) voient leur rendement diminuer, alors que les praires moins productives (CF5, CF6, CF8) conservent ou augmentent leur rendement. Cette tendance n'est pas retrouvée pour les prairies uniquement pâturées.

Type de PP	Rdt moyen actuel	BAU2.6	BAU8.5	Intensif2.6	Intensif8.5	Diversif2.6	Diversif8.5
CF2/CF3	6,3	-0,174	-0,030	-	-	-0,198	-0,077
CF3	6,4	-0,203	-0,170	-0,076	0,119	-0,349	-0,289
CF5	5,8	0,011	**0,297**	0,060	**0,383**	0,039	0,061
CF6	4,0	-0,144	**0,181**	-0,167	0,094	-0,096	0,063
CF8	2,5	0,050	**0,476**	-	-	0,099	**0,282**
CP1	1,8	-0,076	0,134	-0,134	-0,179	-0,059	-0,085
CP2	2,2	-0,331	-0,268	0,008	**0,317**	-0,368	-0,254
CP2/CP3	3,7	-0,231	-0,077	-	-	-0,146	-0,159
CP3	4,5	-0,013	0,034	0,012	**0,236**	-0,123	-0,111
MF1	2,8	-0,132	**0,235**	0,033	**0,441**	0,014	**0,415**
MP1/MP2	1,6	-0,319	0,046	-	-	-0,347	-0,072
MP2	1,4	-	-	-0,016	**0,163**	-	-

Tableau 2 : Pente des courbes d'évolution du rendement annuel simulé par STICS des différents types de prairie permanente (y= production en tMS.ha^{-1}.an^{-1} ; x = année) selon deux scénarios d'émission (RCP2.6 ou RCP8.5), 3 scénarios techniques (Business As Usual ou BAU, Intensification, Diversification) . Cellules grisées = pentes négatives ; valeurs en gras = pentes positives . Autres : pentes peu significatives. Rendement = rendement moyen actuel (2015-2020) des prairies en t MS.ha^{-1}.an^{-1} (source : Typologie des prairies du Massif Vosgien)

Pour les prairies temporaires, les simulations indiquent que le rendement évoluera très faiblement dans le scénario climatique RCP2.6, quel que soit le scénario technique envisagé. Une augmentation de rendement comprise entre 10 et 20% est prédite pour le scénario climatique RCP8.5, surtout quand il est associé au scénario technique «intensification ».

Pour le maïs, les simulations indiquent une plus forte variabilité que pour les rendements des prairies. La culture semble mieux s'en sortir dans le scénario climatique RCP 2.6 que dans le scénario climatique 8.5, notamment dans le scénario technique BAU (Figure 3).

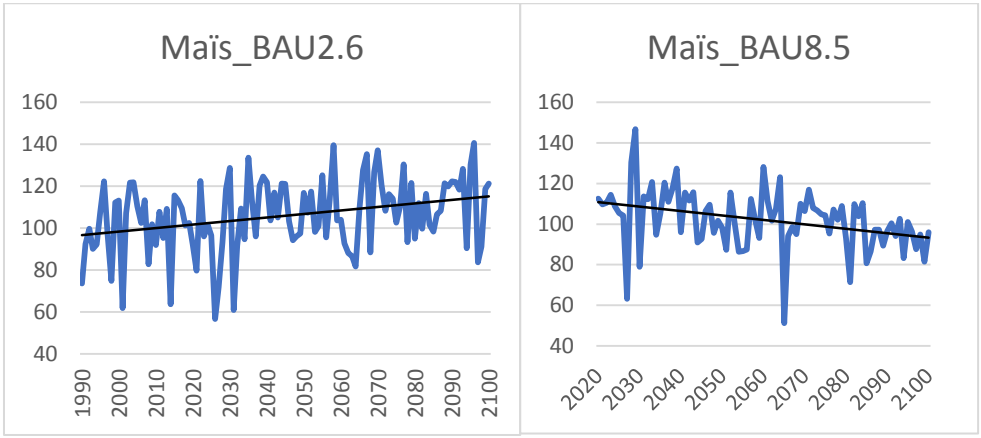


Figure 3 : Simulation par le modèle STICS de la production annuelle de MS du maïs fourrage selon deux scénarios climatiques (RCP2.6 ou RCP8.5), pour le scénario technique Business As Usual ou BAU. Base 100 = production moyenne 1989-2020 de la situation simulée.

La production d'herbe estivale diminue, celle des autres saisons est plus variable

La saison de croissance de l'herbe a été divisée en 4 périodes : Printemps 1 (1er mars-30 avril), Printemps 2 (1er mai-21 juin), Eté 1 (22 juin-14 juillet), Eté 2 (15 juillet-21 septembre) et Automne (22 septembre-15 novembre). Comme attendu par rapport aux prévisions climatiques, la période Eté 2 est celle où la réduction de la production d'herbe est la plus impactée. Ceci est d'autant plus important que le changement climatique est important, comme en témoigne la plus forte réduction dans le scénario climatique RCP8.5. Au contraire, les 3 périodes précédentes, couvrant du 1er mars au 21 juillet, voient leur proportion augmenter. Ceci accroitra encore la concentration de la production d'herbe au printemps et en tout début d'été. La part de la production d'herbe automnale se maintiendra ou diminuera légèrement.

La production totale de fourrage des exploitations se maintient

Toutes les exploitations du territoire du Pays de la Déodatie disposent, à l'instar de la majorité des exploitations françaises, de différentes ressources fourragères. Il est ainsi apparu important de simuler le bilan fourrager des exploitations, en tenant compte de leurs surfaces en prairies permanentes et temporaires et en maïs (Figure 4). Dans le scénario Business As Usual (BAU), ces surfaces restent constantes, seul le climat change. Dans les scénarios « Intensification » et « Diversification », des changements d'affectation de parcelles entrainent une modification des surfaces fourragères des exploitations. Dans le scénario « Intensification », la gestion de ces surfaces évolue également.

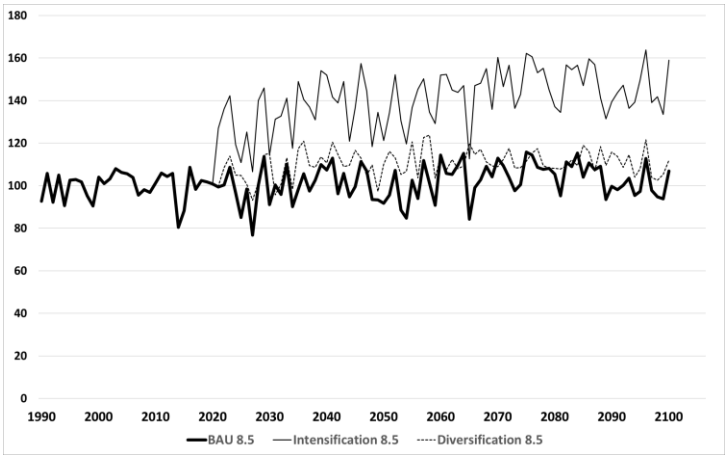


Figure 4 : Simulation STICS de la production fourragère totale de 12 exploitations du PETR de la Déodatie dans les scénarios « BAU Business as Usual » (trait gras), « Intensification » (trait fin continu) et « Diversification » (trait fin pointillé), pour le scénario climatique RCP 8.5. Les données sont exprimées par rapport à la moyenne des productions sur la période 1989-2020

Les simulations indiquent qu'en moyenne, le bilan fourrager des exploitations du territoire de la Déodatie sera maintenu. En analysant l'origine des variations de production des exploitations dans les scénarios où les surfaces de prairie et de maïs évoluent, il apparait que les évolutions de surface expliquent plus de 75% de ces variations. Cela est particulièrement notable sur la Figure 4 où le scénario « Intensification » permet d'augmenter de 40% le bilan fourrager, par simple substitution de surfaces en prairie par des surfaces en maïs-fourrage, dont le rendement est en moyenne deux fois plus important.

Cette simulation de production a été complétée par une simulation de la quantité d'énergie (UFL) et de protéines (PDIN) produites à l'échelle de chaque exploitation. Les valeurs alimentaires (contenu énergétique et protéique) des fourrages ont été mesurées dans le travail de typologie des prairies permanentes du massif vosgien, et les valeurs alimentaires des prairies temporaires et du maïs fourrage proviennent de références régionales. Cette analyse montre des variations de ces quantités d'énergie et de protéines, mais qui s'expliquent à plus de 80% par les variations de quantité de matière sèche. Le changement des types de surface fourragère (types de PP, PT et maïs) se traduit donc par des compensations en termes de valeur alimentaire, sur les deux critères pris en compte.

Discussion

Intérêts et limites de la modélisation

Comme toute méthodologie, l'approche par simulation numérique comporte un certain nombre de limites. La précision des informations relatives au sol, au climat et à la plante peut être discutée. Le choix de représenter un type de prairie par une « graminée moyenne » est lié à la limite des connaissances actuelles pour pouvoir simuler chacune des espèces d'une prairie, et les interactions entre ces espèces. De l'aveu même des prévisionnistes climatiques, la prévision actuelle des évolutions du climat est très dépendante des hypothèses biophysiques et socio-économiques, et la précision diminue quand on s'adresse au long terme, par exemple la fin du XXIème siècle. Malgré toutes les qualités de STICS, qui a été validé sur de nombreuses situations de culture, son adaptation aux prairies est plus récente, et encore en cours. Ces limites, dont il faut avoir conscience, n'enlèvent en rien l'intérêt de cette approche par modélisation. Elle est d'abord la seule dont nous disposons

pour évaluer des situations futures. Les modèles intègrent les connaissances acquises dans un domaine, et les modèles mécanistes comme STICS présentent l'intérêt de prendre en compte tous les principaux mécanismes de fonctionnement de la plante et du sol. Enfin, l'approche conduite dans le présent travail est avant tout une approche qui propose une méthodologie, en comparant des scénarios d'évolution des pratiques sous changement climatique, et qui permet d'évaluer dans quel sens évolue la production des surfaces fourragères. Cette méthodologie pourrait être étendue à d'autres territoires et bénéficier d'une nouvelle du modèle.

Des bilans fourragers peu perturbés mais une plus forte vulnérabilité des exploitations

En prenant en compte les précautions formulées sur la modélisation, les simulations réalisées sur le territoire du Pays de la Déodatie indiquent une stabilité globale voire une légère augmentation de la production fourragère des exploitations, à priori rassurante pour les éleveurs. Ce résultat s'explique notamment par le contexte du massif vosgien : les températures actuelles sont relativement froides (moyenne annuelle de St Dié des Vosges = 9,7°C) et tout réchauffement est favorable à la croissance ; les prévisions de maintien de la pluviométrie et de forte augmentation des concentrations en CO_2 sont favorables à la croissance des prairies et du maïs fourrage. Si la production estivale sera bien impactée par le changement climatique, la production printanière compensera en quantité cet impact négatif. L'extrapolation des résultats de la présente étude à d'autres territoires est donc envisageable, dès lors que l'on se situe dans des conditions pédoclimatiques comparables. Comme l'a démontré le travail de typologie nationale des prairies (Michaud et al. 2011), les types de prairie rencontrés dans le massif vosgien sont très similaires à d'autres types de prairies rencontrées par exemple dans le massif central.

Si le bilan fourrager des exploitations semble préservé, il apparait cependant que leur vulnérabilité au changement climatique pourrait s'accroitre, pour plusieurs raisons. La modification de la répartition intra-annuelle de la production d'herbe peut impacter négativement les exploitations. Au printemps, une production d'herbe plus précoce et plus abondante pourrait ne pas pouvoir être récoltée en raison de la faible portance des parcelles, comme cela a déjà été constaté par exemple au printemps 2021. Une récolte plus précoce réduit les possibilités de séchage du fourrage au sol, orientant vers l'ensilage et l'enrubannage, ou le séchage en grange, mais avec des coûts de production plus importants. Une partie de la production d'herbe prédite par le modèle STICS pourrait donc ne pas être valorisable. L'accroissement du déficit hydrique estival, et des canicules, augmente le risque de ne plus pouvoir valoriser les prairies pendant une longue période. Cela se traduira par une charge de travail accrue pour les éleveurs, ou des coûts de production pour apporter des fourrages conservés aux animaux.

Une des hypothèses fortes du travail était la stabilité des compositions floristiques des prairies pour un même type de prairie, à l'exception des changements de type opérés dans le scénario d'intensification. Ce choix s'explique par l'impossibilité actuelle de prédire quelles seront ces modifications de flore. Dans le massif vosgien comme dans d'autres lieux, les canicules récentes (2018 à 2020), auxquels s'ajoutent les dégâts provoqués par la faune sauvage, se traduisent déjà par des modifications de la flore, en défavorisant plutôt les espèces productives et appétentes.

Parmi les scénarios testés, celui de l'intensification apparait comme plus favorable sur le plan de la préservation du bilan fourrager. Ce scénario aurait bien-sûr des conséquences environnementales très négatives (biodiversité, séquestration de carbone, consommation d'énergie, qualité de l'eau, de l'air et du sol) qui ne sont pas discutées ici. Sur le plan fourrager, ce scénario, caractérisé par un recours accru au maïs et à la fertilisation des prairies présente malgré tout plusieurs limites. La première est liée à l'augmentation du risque, car les rendements de maïs simulés sont beaucoup plus

variables. La croissance du maïs intervenant en période estivale, le modèle STICS prévoit que certaines années, le maïs pourrait avoir des rendements extrêmement faibles, inférieurs à 2 T MS.ha^{-1}. Il en est de même des prairies les plus productives, et les plus intensifiées, qui apparaissent comme plus vulnérables au changement climatique. Ceci rejoindrait les conclusions des simulations réalisées par (Moulin and Calanca 2020), dans des prairies jurassiennes. Le scénario d'intensification apparait ainsi comme en moyenne plus intéressant du point de vue de la production fourragère, mais plus risqué d'un point de vue environnemental. Son acceptabilité par la société pose aussi question, particulièrement dans un territoire où la place économique du tourisme, dont l'agro-tourisme, est importante, et où les filières pourraient demander une production basée sur de l'herbe et de la prairie naturelle.

Conclusion

L'objectif de la présente étude était d'évaluer l'impact du changement climatique sur la production des différents types de prairie et sur les bilans fourragers d'exploitations d'élevage du territoire du pays de la Déodatie, dans le massif des Vosges. Ces simulations ont été réalisées en prenant en compte deux scénarios climatiques et trois scénarios techniques. Elles montrent que la réponse des différents types de prairie permanente au changement climatique est variable. On ne peut donc pas considérer une réponse moyenne des prairies permanentes, et la prise en compte du type de végétation s'avère pertinente. Dans des conditions initiales froides, le scénario de changement climatique important semble globalement plus favorable à la production globale des surfaces fourragères, mais au prix d'une prise de risque accrue, d'une adaptation au déficit estivale nécessaire et sans doute coûteuse en temps et en argent pour les éleveurs, et de conséquences négatives sur le bien-être, la santé et les performances de production des animaux.

Il est également essentiel d'associer à ces résultats « techniques » des simulations « économiques » qui prennent en compte à la fois les bénéfices et les coûts engendrés par les adaptations techniques et par les conséquences du changement climatique. Cette analyse économique est de nature à modifier les conclusions d'une étude purement technique des effets du changement climatique.

Remerciements aux personnes ayant contribué à fournir des informations pour la simulation :
S. Valdenaire, CA88 , S. Maillant, CRAGE, G. Louarn, INRAE, F. Ruget, INRAE, C. Piedallu, INRAE AgroParisTech

Bibliographie

Cantarel, A. A. M., Bloor, J. M. G., and Soussana, J.-F. (2013). “Four years of simulated climate change reduces above-ground productivity and alters functional diversity in a grassland ecosystem.” *Journal of Vegetation Science*, (S. Güsewell, ed.), 24(1), 113–126.

Chang, J., Ciais, P., Viovy, N., Soussana, J.-F., Klumpp, K., and Sultan, B. (2017). “Future productivity and phenology changes in European grasslands for different warming levels: implications for grassland management and carbon balance.” *Carbon Balance and Management*, 12(1), 11.

Cruz, P., Theau, J. P., Lecloux, E., Jouany, C., and Duru, M. (2010). “Typologie fonctionnelle de graminées fourragères pérennes : une classification multitraits.” *Fourrages*, 8.

Dumont, B., Andueza, D., Niderkorn, V., Lüscher, A., Porqueddu, C., and Picon-Cochard, C. (2015). “A meta-analysis of climate change effects on forage quality in grasslands: specificities of mountain and Mediterranean areas.” *Grass and Forage Science*, 70(2), 239–254.

Ghahramani, A., Howden, S. M., del Prado, A., Thomas, D. T., Moore, A. D., Ji, B., and Ates, S. (2019). “Climate Change Impact, Adaptation, and Mitigation in Temperate Grazing Systems: A Review.” *Sustainability*, 11(24), 7224.

Graux, A.-I., Resmond, R., Casellas, E., Delaby, L., Faverdin, P., Le Bas, C., Ripoche, D., Ruget, F., Thérond, O., Vertès, F., and Peyraud, J.-L. (2020). “High-resolution assessment of French grassland dry matter and nitrogen yields.” *European Journal of Agronomy*, 112, 125952.

Hopkins, A., and Del Prado, A. (2007). “Implications of climate change for grassland in Europe: impacts, adaptations and mitigation options: a review.” *Grass and Forage Science*, 62(2), 118–126.

Li, W., Li, X., Zhao, Y., Zheng, S., and Bai, Y. (2018). “Ecosystem structure, functioning and stability under climate change and grazing in grasslands: current status and future prospects.” *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 33, 124–135.

Lüscher, A., Hendrey, G. R., and Nösberger, J. (1997). “Long-term responsiveness to free air CO 2 enrichment of functional types, species and genotypes of plants from fertile permanent grassland.” *Oecologia*, 113(1), 37–45.

Michaud, A., Plantureux, S., Pottier, E., Farrié, J. P., Launay, F., and Baumont, R. (2011). “Une typologie nationale des prairies permanentes : un outil pour caractériser leur potentiel fourrager et leur intérêt environnemental.” *3R*, Paris, France, 35–38.

Moulin, T., and Calanca, P. (2020). “Modélisation de la réponse des prairies permanentes aux changements climatiques », Fourrages, 246, 11-20.”

Moulin, T., Perasso, A., Calanca, P., and Gillet, F. (2021). “DynaGraM: A process-based model to simulate multi-species plant community dynamics in managed grasslands.” *Ecological Modelling*, 439, 109345.

Naudts, K., Van den Berge, J., Janssens, I. A., Nijs, I., and Ceulemans, R. (2013). “Combined effects of warming and elevated CO2 on the impact of drought in grassland species.” *Plant and Soil*, 369(1–2), 497–507.

van Oijen, M., Bellocchi, G., and Höglind, M. (2018). “Effects of Climate Change on Grassland Biodiversity and Productivity: The Need for a Diversity of Models.” *Agronomy*, 8(2), 14.

Pearman, P. B. (2011). “Impacts of climate change on Swiss biodiversity: An indicator taxa approach.” *Biological Conservation*, 10.

Plantureux, S., Mesbahi, G., and Bayeur, C. (2021). *Les prairies permanentes du massif des Vosges*. Ed PNR des Vosges du Nord.

Ruget, F., Novak, S., and Granger, S. (2006). “Du modèle STICS au système ISOP pour estimer la production fourragère. Adaptation à la prairie, application spatialisée.” 17.

Soussana, J. F. (2013). “Prairies et Changement climatique.” *Fourrage*, (215), 171–180.

Soussana, J.-F., Teyssonneyre, F., Picon-Cochard, C., and Dawson, L. (2005). “A trade-off between nitrogen uptake and use increases responsiveness to elevated CO2 in infrequently cut mixed C3 grasses.” *New Phytologist*, 166(1), 217–230.