



La revue francophone sur les fourrages et les prairies

The French Journal on Grasslands and Forages

Cet article de la revue **Fourrages**,
est édité par l'Association Francophone pour les Prairies et les
Fourrages

Pour toute recherche dans la base de données
et pour vous abonner :

www.afpf-asso.fr



AFPF - Maison Nationale des Eleveurs - 149 rue de Bercy - 75595 Paris Cedex 12
Tel. : +33.(0)7.69.81.16.62 - Mail : contact@afpf-asso.fr

Association Francophone pour les Prairies et les Fourrages

Type de prairie, changement climatique et pérennité de la production fourragère. Analyse à l'échelle des prairies et du système fourrager d'exploitations du Pays de la Déodaté (Vosges)

S. Plantureux¹, B. Pires¹, A. Mariau¹, T. Salagnat¹, P. Barrier², A.-I. Graux³

Afin d'évaluer les effets du changement climatique sur les systèmes fourragers du pays de la Déodaté (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.

RESUME

Afin d'étudier la vulnérabilité des élevages du Pays de la Déodaté au changement climatique, et donc leur pérennité, la production de parcelles fourragères (prairies permanentes et temporaires, maïs ensilage) a été simulée sur la période 1989-2100 avec le modèle mécaniste STICS (version de recherche). Les caractéristiques pédoclimatiques et le type de végétation de chaque parcelle ont été pris 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, voire une augmentation en cas d'intensification (accroissement de la fertilisation et de la proportion de maïs). Ce résultat est cependant associé à une augmentation du niveau de risque sur le plan fourrager et organisationnel.

SUMMARY

Grassland type, climate change and sustainability of forage production. Analysis at the scale of grasslands and forage systems of farms in the Déodaté region (Vosges)

In order to study the vulnerability of livestock farms to climate change in the Déodaté region, and thus their sustainability, the production of forage plots (permanent and temporary grasslands, silage maize) was simulated over the period 1989-2100 with the mechanistic model STICS (research version). The pedoclimatic characteristics and the type of vegetation of each plot were taken into account. Depending on the type of grassland and the climatic and technical scenarios used, production could change by -30 to +40 % by 2100 compared to 1989-2020. At the farm level, the result is a compensation that allows forage production to be maintained, or even increased in the case of intensification (increased fertilization and the proportion of corn). However, this result is associated with an increase in the level of risk in terms of forage and organization.

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 (Kipling *et al.*, 2016).

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 (Michaud *et al.*, 2020 ; Perrin *et al.*, 2018). 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 (Dumont *et al.* 2015 ; Picon-Cochard *et al.* 2013). Même

AUTEURS

1 : Université de Lorraine, Inrae, LAE, F-54000 Nancy (France) - sylvain.plantureux@univ-lorraine.fr

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

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

MOTS-CLES : Prairie, simulation, changement climatique, STICS, rendement.

KEY-WORDS: Grassland, simulation, climate change, STICS, yield.

REFERENCE DE L'ARTICLE : Plantureux S., Pires B., Mariau A., Salagnat T., Barrier P., Graux A.-I., (2022). « Type de prairie, changement climatique et pérennité de la production fourragère. Analyse à l'échelle des prairies et du système fourrager d'exploitations du Pays de la Déodaté (Vosges) ». *Fourrages* 250, 13-23

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, en mobilisant notamment des cultures fourragères.

Le territoire du Pays de la Déodatie est au cœur de ces questionnements. Ce territoire, organisé en Pôle d'Équilibre Territorial et Rural (PETR), regroupe 111 communes représentant 1219 km² 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 (Bengtsson *et al.*, 2019 ; Gaujour *et al.*, 2012).

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 et 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 des projets présentés dans la Revue Fourrages (#244). Les impacts du changement climatique sur les prairies sont très variables selon les situations. 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 automnales) 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 influencera la composition floristique des prairies, il est important de se poser la question du rôle de cette composition, 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 au 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 Déodat, 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 évolutions simulées se répercutent à l'échelle du bilan fourrager de l'exploitation. Pour ce faire, des simulations de rendement du maïs fourrage ont été réalisées en complément des simulations de rendement des prairies. Le calcul à l'échelle de l'exploitation a été réalisé en multipliant le rendement annuel et la surface de tous les ilots des 12 exploitations étudiées.

1. Matériel et Méthodes

1.1. Echantillon d'exploitation et de parcelles

Afin d'étudier un échantillon de prairies représentatif de la diversité de situations du Pays de la Déodat, nous sommes partis d'une enquête réalisée par le PETR décrivant 130 (sur 574) des exploitations du territoire (rapport interne PETR de la Déodat). 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 sont toujours occupés par des prairies temporaires, ressemées régulièrement, ou en prairie temporaire au sein d'une rotation avec du maïs ou des cultures 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)).

1.2. Renseignement des entrées nécessaires aux simulations réalisées avec le modèle STICS

Le modèle de simulation des cultures et prairies STICS (Brisson *et al.*, 2003 ; Ruget *et al.*, 2006) a été choisi pour plusieurs raisons : 1) il permet de simuler la croissance de plantes (prairies et autres cultures annuelles 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) à l'origine le modèle s'adressant aux grandes cultures, il a ensuite été

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) Rotation PT + Maïs Rotation PT + autres cultures		15
		50
		13
	Total Prairies Permanentes	237
	Total ensemble des ilots	315

CF ou MF : Prairie de fauche ou mixte fauche-pâturage en dessous de 800 m d'altitude (CF) ou au-dessus de 800m (MF). CP OU MP : Prairie exclusivement pâturée en dessous de 800 m d'altitude (MF) ou au-dessus de 800m (MP)

Les numéros après CF, MF, CP ou MP correspondent à des types de végétation distincts.

TABLEAU 1 : Répartition des ilots de parcelles fourragères des 12 exploitations du Pays de la Déodat

Nomenclature des types de prairies dans la typologie des prairies du massif Vosgien.

Table 1 : Distribution of the blocks of forage plots of the 12 farms of the Pays de la Déodat

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 les plus utilisés 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 se dégrader. Les simulations restent néanmoins pertinentes pour comparer différentes situations.

Pour décrire le sol de chaque ilot, deux bases de données ont été combinées : les 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 1/250 000, 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 8 x 8 km, 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 (<https://geoservices.ign.fr/bdalti>). Les valeurs de concentrations en CO₂ de ces fichiers n'étant pas fournies par DRIAS (<http://www.drias-climat.fr/>), 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) proposés par le GIEC (<https://www.ipcc.ch>) : 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 (<http://www.drias-climat.fr/>) a été retenu, issu des travaux du CNRM (Centre national de recherche météorologique). En considérant l'ensemble des 17 mailles de 8 x 8 km du Pays de la Déodatie, ces modèles prévoient à l'échéance 2100 en moyenne une hausse des températures et des teneurs en CO₂ atmosphérique (RCP2.6 : +1,5°C et +150ppm CO₂, 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 en revanche s'aggraver en été avec des déficits hydriques plus prononcés et plus longs (Figure 1).

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

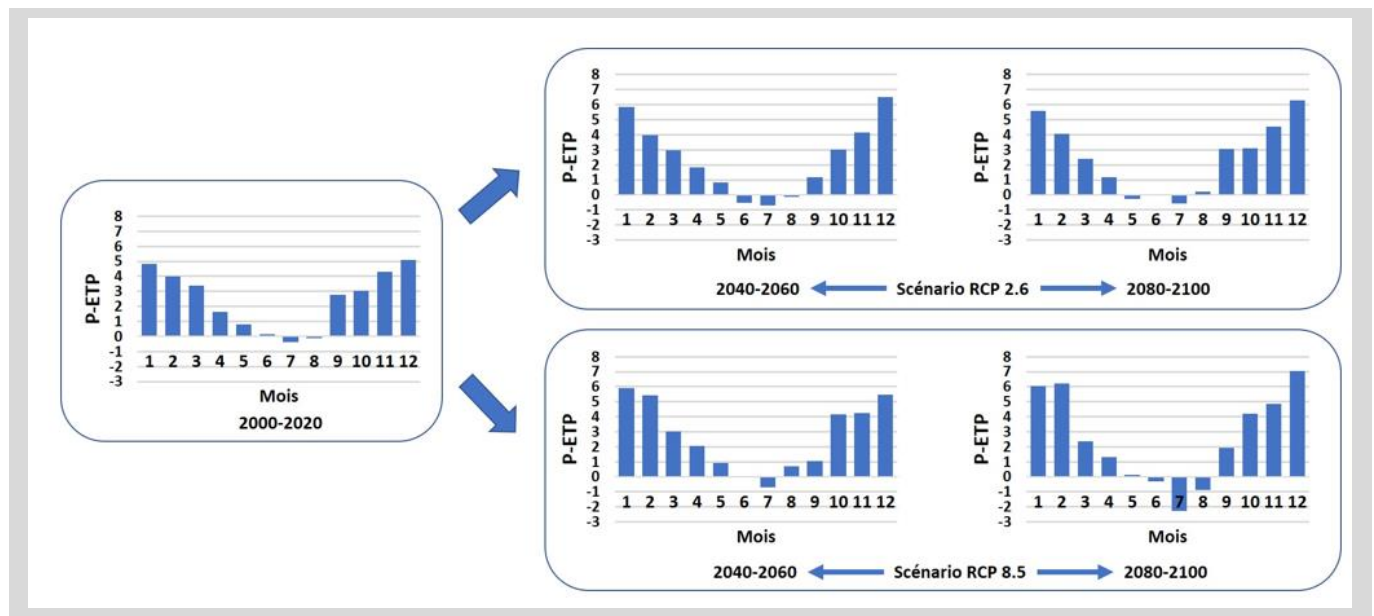


FIGURE 1 : Bilan hydrique climatique (différence entre précipitations et évapotranspiration potentielle) moyen du Pays de la Déodatie (Vosges) actuellement (2000-2020) et pour deux périodes du futur et deux scénarios climatiques.

Figure 1 : Average climatic water balance (difference between rainfalls and potential evapotranspiration) of the Pays de la Déodatie (Vosges) at present (2000-2020), for two future periods and two climate scenarios.

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 une prairie se voit affecter un autre type dans la typologie des prairies du massif vosgien, ce qui change sa composition floristique) 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), ainsi que la fertilisation de l'ensemble des prairies (fertilisation ajustée pour éliminer tout stress azoté). Dans ce scénario, si le type de végétation d'une prairie permanente est un type « extensif » (en référence à la classification des prairies du massif vosgien), il est remplacé par un type de végétation correspondant à un type « intensif ». Par exemple, le type CP2 (chargement animal < 250 j.UGB/ha) est remplacé par le type CP3 (chargement > 250 j.UGB/ha), ces deux types de prairie se trouvant dans les mêmes milieux (sol, climat, altitude).

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 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**. Douze

paramètres « plante » de STICS ont ainsi été adaptés pour décrire un type fonctionnel de graminée. Ces paramètres concernent la phénologie, la photosynthèse (efficacité 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). 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 connaître la proportion de ces types fonctionnels de graminées au sein d'un type de prairie, qui a été estimée au printemps (somme de températures de 800 à 1000 degrés-jours depuis le 1^{er} février de l'année) (Tableau 2). 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 graminées de type A (graminées productives comme le Ray-grass anglais). Pour le maïs, un hybride précoce a été retenu.

	A	B	b	C	D
CF2/CF3	47	22	14	14	0
CF3	58	9	16	16	0
CF5	61	6	12	21	0
CF6	32	7	21	39	0
CF8	37	8	11	44	0
MF1	21	16	23	36	2
CP1	0	0	21	79	0
CP2	35	15	7	43	0
CP2/CP3	42	16	9	32	0
CP3	49	17	10	22	0
MP1/MP2	0	1	30	53	16

TABLEAU 2 : Composition fonctionnelle des types de prairies permanentes. Valeurs : Proportion de chaque type de graminée (en % de la biomasse totale de graminées), en colonnes : Graminées de type A, B, b, C ou D, selon la typologie fonctionnelle des graminées INRAE Toulouse (Cruz *et al.* 2010) et en lignes : 11 types de prairies rencontrés dans la présente étude, paramétrés dans STICS. Chaque ligne renvoie à un ou deux types de la typologie des prairies permanentes du massif vosgien (Plantureux, Mesbahi, et Bayeur 2021)

Table 2: Functional composition of permanent grassland types.

2. Résultats

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

2.1. 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 (RCP 8.5). L'augmentation est plus prononcée dans le cas du scénario technique d'intensification des prairies. Dans le scénario climatique 2.6, le réchauffement printanier et automnal est insuffisant pour compenser la

dégradation du bilan P-ETP en été, déjà très pénalisant pour les prairies dans ce scénario. Dans le scénario climatique 8.5, la situation estivale n'est pas plus grave pour les prairies que dans le scénario 2.6, mais les meilleures conditions printanières et automnales sont favorables à la croissance de l'herbe. 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 prairies 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. Le type CF5 correspond à des prairies de fauche de fond de vallée plutôt humides, le type CF6 à des prairies de fauche saines exploitées précocement (avant 1000 degrés-jours), et le type CP2 à des pâtures exclusives peu

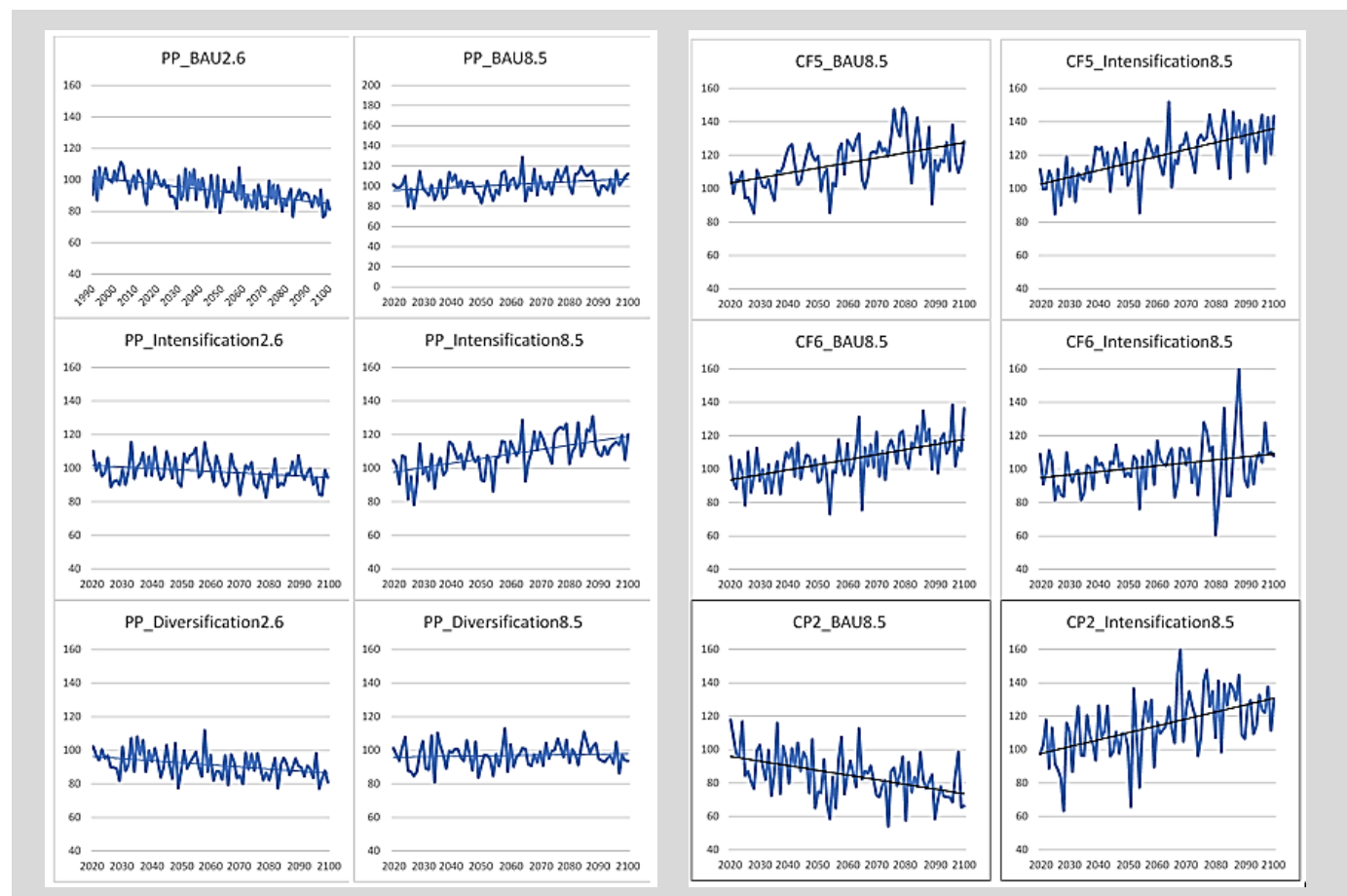


FIGURE 2 : Simulation par le modèle STICS de la production annuelle de MS selon deux scénarios climatiques (RCP2.6 ou RCP8.5), 3 scénarios techniques (Business As Usual ou BAU, Intensification, Diversification), pour l'ensemble des 237 ilots de prairie permanente (tous types de prairie permanente confondus,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

Figure 2 : Simulation by the STICS model of annual DM production according to two climate scenarios (RCP2.6 or RCP8.5), 3 technical scenarios (Business As Usual or BAU, Intensification, Diversification).

chargées (<250 j.UGB/ha), les trois types étant à des altitudes inférieures à 800 m.

constitue son rendement, dans un contexte où l'irrigation n'est pas pratiquée.

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 3 : Pente des courbes d'évolution du rendement annuel simulé par STICS des différents types de prairie permanente ($y = \text{production en tMS.ha}^{-1}\text{.an}^{-1}$; $x = \text{année}$) 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).

Table 1 : Slope of the evolution curves of the annual yield simulated by STICS of the different types of permanent grassland ($y = \text{production in tMS.ha}^{-1}\text{.year}^{-1}$; $x = \text{year}$), according to two emission scenarios (RCP2.6 or RCP8.5), 3 technical scenarios (Business As Usual or BAU, Intensification, Diversification)

Le Tableau 3 détaille les évolutions de chaque type de prairie pour les scénarios climatiques et techniques. L'altitude des prairies ou le mode d'exploitation n'apparaissent pas comme des facteurs explicatifs de l'évolution des rendements. Pour les prairies de fauche ou mixte, il apparaît que les prairies les plus productives (CF2/CF3 et CF3) voient leur rendement diminuer, alors que les prairies moins productives (CF5, CF6, CF8) conservent ou augmentent leur rendement. Cette tendance n'est pas retrouvée pour les prairies uniquement pâturées. A ce stade de l'étude, il n'a pas été possible d'expliquer cette différence, qui nécessiterait une étude plus fine des stress hydriques et azotés pour chaque période de l'année, ce que STICS permet potentiellement de faire.

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). La même variabilité forte des rendements est retrouvée dans les autres scénarios techniques, avec un scénario climatique 8.5 moins favorable que le 2.6 pour le scénario technique « Intensification », et l'inverse pour le scénario technique « Diversification » (figure non présentée) Les effets négatifs du changement climatique sur le maïs dans le scénario 8.5 s'expliquent par un accroissement fort du déficit estival, période où le maïs

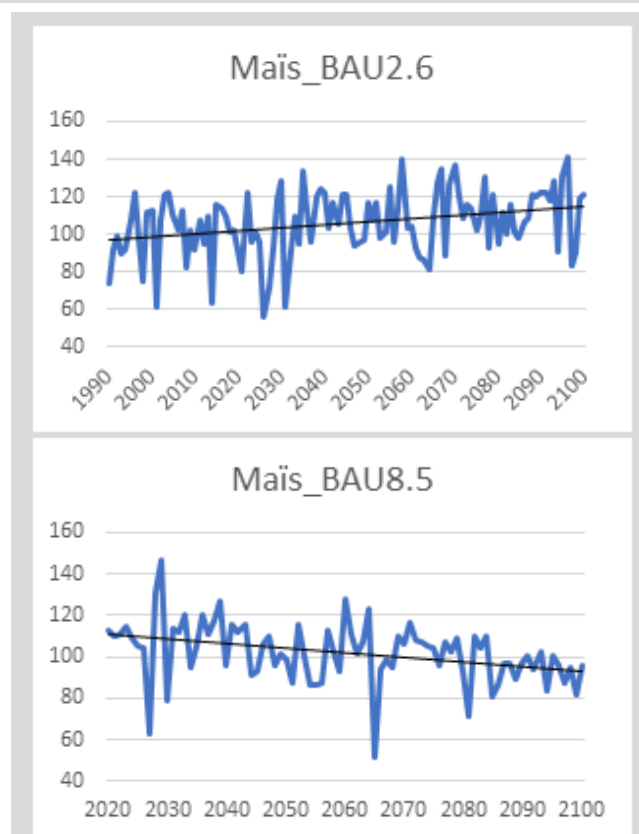


FIGURE 3 : Simulation par le modèle STICS de la production annuelle de MS du maïs fourrage selon deux scénarios climatiques (RCP2.6 ou RCP8.5), pour le scénario technique Business As Usual ou BAU. Base 100 = production moyenne 1989-2020 de la situation simulée.

Figure 3: Simulation by the STICS model of the annual DM production of forage corn under two climate scenarios (RCP2.6 or RCP8.5), for the technical scenario Business As Usual or BAU.

2.2. 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), Été 1 (22 juin - 14 juillet), Été 2 (15 juillet - 21 septembre) et Automne (22 septembre - 15 novembre). Comme attendu par rapport aux prévisions climatiques, la période Été 2 est celle où la production d'herbe est la plus réduite. Ceci est d'autant plus important que le changement climatique est sévère, comme en témoigne la plus forte réduction dans le scénario climatique RCP8.5. Au contraire, les 3 périodes précédentes couvrant du 1^{er} mars au 21 juillet, connaissent une augmentation de leur production fourragère. La période du 1^{er} mars au 21 juillet concentre actuellement ¾ de la production annuelle des prairies, et cette proportion s'accroîtra donc encore dans l'avenir. La part de la production d'herbe automnale se maintiendra ou diminuera légèrement.

2.3. 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

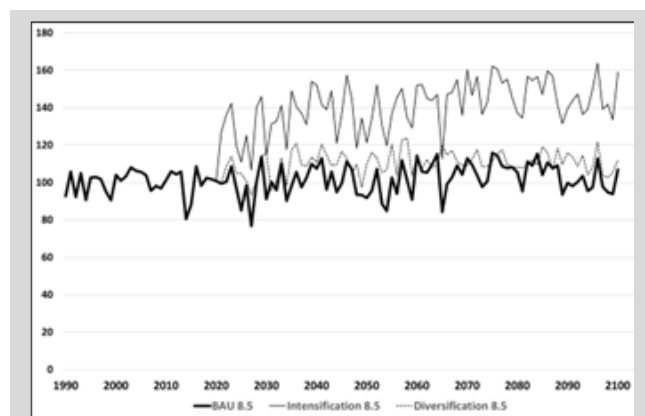


FIGURE 4 : Simulation STICS de la production fourragère totale de 12 exploitations du PETR de la Déodatie dans les scénarios « BAU Business as Usual » (trait gras), « Intensification » (trait fin continu) et « Diversification » (trait fin pointillé), pour le scénario climatique RCP 8.5. Les données sont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

Figure 4 : STICS simulation of the total forage production of 12 farms of the PETR of Déodatie in the scenarios "BAU Business as Usual" (bold line), "Intensification" (thin continuous line) and "Diversification" (thin dotted line), for the climate scenario RCP 8.5.

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 entraînent une modification des surfaces fourragères des exploitations. Dans le scénario « Intensification », la gestion de ces surfaces évolue également.

Les simulations indiquent qu'en moyenne, le bilan fourrager des exploitations du territoire de la Déodatie sera maintenu. Le scénario « Diversification » réduit la variabilité des productions des exploitations, en comparaison du scénario BAU. En analysant l'origine des variations de production des exploitations dans les scénarios où les surfaces de prairie et de maïs évoluent, il apparaît 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 (MAT) 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 des quantités d'énergie et de protéines produites, 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. Pour chaque parcelle de l'exploitation, cet équilibre des rations n'est par contre pas maintenu.

3. Discussion

3.1. Intérêts et limites de la modélisation

Comme pour 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 XXI^{ème} siècle. Par exemple le choix de

représenter une prairie permanente par une seule espèce, dont les caractéristiques ne varient pas au fil du temps, constitue une hypothèse biophysique forte. Concernant le paramétrage des plantes, il a été supposé que les plantes de 2100 auraient les mêmes caractéristiques que les plantes de 2020. C'est une hypothèse forte, puisqu'il est probable que les espèces prairiales présentes dans les types de prairie actuels évolueront (apparition ou disparition d'espèces, évolutions génétiques) et que les espèces fourragères (maïs et autres cultures) continueront à évoluer sur le plan génétique. Dans le présent travail, le choix a été fait de ne pas faire de scénario d'évolution de ces caractéristiques de plantes pour ne pas tout changer en même temps, et *in fine* risquer de moins bien comprendre les évolutions. Cette prise en compte des évolutions des paramètres des plantes reste néanmoins une perspective intéressante pour de futures études.

Malgré toutes les qualités du modèle STICS, qui a été validé sur de nombreuses situations de culture, son adaptation aux prairies est plus récente, et encore en cours. Il faut encore considérer ce modèle comme un modèle de recherche en développement. 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 version du modèle.

A terme, il serait intéressant de confronter ces simulations à des données de terrain, avec la limite que des simulations pour l'avenir sont par définition impossibles à valider aujourd'hui. Il serait malgré tout possible de tester plus largement STICS dans les conditions actuelles, avec la paramétrisation des types de prairie, sur un plan national.

3.2. 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, *a 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 CO₂ sont favorables à la croissance des prairies et du maïs fourrage, même si les réactions de ces plantes à ces facteurs sont différentes. Si la production estivale était effectivement impactée par le changement climatique, la production printanière devrait compenser en quantité cet impact négatif. L'extrapolation des résultats de la présente étude à d'autres territoires est 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), certains types de prairie rencontrés dans le massif vosgien sont très similaires à d'autres types de prairies rencontrées par exemple dans le Massif central. Il serait cependant intéressant de valider cette hypothèse dans un travail de comparaison des prairies de différentes régions.

Si le bilan fourrager des exploitations semble préservé, il apparaît cependant que leur vulnérabilité au changement climatique pourrait s'accroître, 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 exploitée (pâture ou fauche) 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, qui se traduira par une charge de travail accrue pour les éleveurs, ou des coûts supplémentaires pour constituer des stocks et 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), auxquelles 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. En outre, les troupeaux continuent de pâturer même s'ils sont affouragés.

Parmi les scénarios testés, celui de l'intensification apparaît comme plus favorable sur le plan de la préservation du bilan fourrager, au prix de la substitution de prairies par des surfaces en maïs et à une fertilisation accrue des prairies. Ce scénario aurait

bien sûr des conséquences environnementales très probablement 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, et nécessiterait de constituer des stocks de report en année favorable. La croissance du maïs intervenant en période estivale, le modèle STICS prévoit que certaines années et dans le scénario climatique 8.5, 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, dans ce même scénario 8.5, qui apparaissent comme plus vulnérables au changement climatique. Ceci rejoindrait les conclusions des simulations réalisées par Moulin et Calanca, (2020) dans des prairies jurassiennes. Le scénario d'intensification apparaît ainsi comme 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 prairies permanentes 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. Il y a donc un intérêt pour l'éleveur de connaître le type de ses prairies, et de s'appuyer sur cette connaissance pour conserver les prairies dont la production n'est pas dégradée par le changement climatique, et modifier les pratiques pour modifier les autres types de prairie, quand ce changement est possible. 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 estival nécessaire et sans doute coûteuse en temps et en argent pour les éleveurs, et de conséquences probablement 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.

Article accepté pour publication le 23 juin 2022

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bengtsson J., Bullock J. M., Egoh B., Everson C., Everson T., O'Connor T., O'Farrell P. J., Smith H. G., et Lindborg R., (2019). « Grasslands-more important for ecosystem services than you might think ». *Ecosphere*, 10 (2) : e02582.
- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussièrre F., Cabidoche Y. M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillère J. P., Hénault C., Maraux F., Seguin B., et Sinoquet H., (2003). « An overview of the crop model stics ». *European Journal of Agronomy*, 18 (3-4) : 309-332.
- Cantarel A.A.M., Bloor J.M.G., et Soussana J.-F., (2013). « Four years of simulated climate change reduces above-ground productivity and alters functional diversity in a grassland ecosystem ». *J Veg Sci*, (S. Güsewell, ed.), 24 (1) : 113-126.
- Chang J., Ciais P., Viovy N., Soussana J.-F., Klumpp K., et Sultan B., (2017). « Future productivity and phenology changes in European grasslands for different warming levels: implications for grassland management and carbon balance ». *Carbon Balance Manage*, 12 (1) : 11.
- Cruz P., Theau J.-P., Lecloux E., Jouany C., et Duru M., (2010). « Typologie fonctionnelle de graminées fourragères pérennes : une classification multitraits ». *Fourrages* 201, 11-17.
- Dumont B., Andueza D., Niderkorn V., Lüscher A., Porqueddu C., et 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.
- Gaujour E., Amiaud B., Mignolet C., et Plantureux S., (2012). « Factors and processes affecting plant biodiversity in permanent grasslands. A review ». *Agronomy for Sustainable Development*, 32 (1) : 133-160.
- Ghahramani A., Howden S.-M., Del Prado A., Thomas D. T., Moore A. D., Ji B., et 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., et Peyraud J.-L., (2020). « High-resolution assessment of French grassland dry matter and nitrogen yields ». *European Journal of Agronomy*, 112 : 125952.
- Hopkins A., et Del Prado A., (2007). « Implications of climate change for grassland in Europe: impacts, adaptations and mitigation options: a review ». *Grass and Forage Sci*, 62 (2) : 118-126.
- Kipling R. P., Virkajärvi P., Breitsameter L., Curnel Y., De Swaef T., Gustavsson A.-M., Hennart S., Höglind M., Järvenranta K., Minet J., Nendel C., Persson T., Picon-Cochard C., Rolinski S., Sandars D. L., Scollan N. D., Sebek L., Seddaiu G., Topp C. F.

- E., Twardy S., Van Middelkoop J., Wu L., et Bellocchi G., (2016). « Key challenges and priorities for modelling European grasslands under climate change ». *Science of The Total Environment*, 566–567: 851–864.
- Li W., Li X., Zhao Y., Zheng S., et 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., et Nösberger J., (1997). « Long-term responsiveness to free air CO₂ enrichment of functional types, species and genotypes of plants from fertile permanent grassland ». *Oecologia*, 113 (1): 37-45.
- Michaud A., Plantureux S., Baumont R., et Delaby L., (2020). « Les prairies, une richesse et un support d'innovation pour des élevages de ruminants plus durables et acceptables ». *INRA Prod. Anim.*, 153–172.
- Michaud A., Plantureux S., Pottier E., Farrié J. P., Launay F., et Baumont R., (2011). « Une typologie nationale des prairies permanentes : un outil pour caractériser leur potentiel fourrager et leur intérêt environnemental ». *3R*, 35–38. Paris, France.
- Moulin T., et Calanca P., (2020). « Modélisation de la réponse des prairies permanentes aux changements climatiques ». *Fourrages* 246, 11-20.
- Moulin T., Perasso A., Calanca P., et 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., et 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.
- Pearman P. B., (2011). « Impacts of climate change on Swiss biodiversity: An indicator taxa approach ». *Biological Conservation*, 10.
- Perrin A., Bancarel A., Cassel S., Doumayzel S., Durand M., Eve D., Grenier J., Ghilou R., Maleysson F., Mouchard T., Nael E., Nayet C., Patout O., Pavie J., Piquart-Hebert A., Roy D., Uzureau A., Experton C., et Martin G., (2018). « Caractérisation des facteurs de résilience des élevages laitiers biologiques ». *Renc. Rech. Ruminants*, 2018, 24.
- Picon-Cochard C., Bloor J. M. G., Zwicke M., et Duru M., (2013). « Impacts du changement climatique sur les prairies permanentes ». *Fourrages*, (214) : 127–134.
- Plantureux S., Mesbahi G., et Bayeur C., (2021). « Les prairies permanentes du massif des Vosges ». *Ed PNR des Vosges du Nord*.
- Ruget F., Novak S., et Granger S., (2006). « Du modèle STICS au système ISOP pour estimer la production fourragère. Adaptation à la prairie, application spatialisée ». *Fourrages* 186, 241-256.
- Soussana J. F., (2013). « Prairies et Changement climatique ». *Fourrage* 215 : 171–180.
- Soussana J.-F., Teyssonneyre F., Picon-Cochard C., et 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.
- Van Oijen M., Bellocchi G., et Höglind M., (2018). « Effects of Climate Change on Grassland Biodiversity and Productivity: The Need for a Diversity of Models ». *Agronomy*, 8 (2): 14.