

# Impacts du changement climatique sur les prairies permanentes

C. Picon-Cochard<sup>1</sup>, J. Bloor<sup>1</sup>, M. Zwicke<sup>1</sup>, M. Duru<sup>2</sup>

**Avec un climat plus chaud et plus sec, plus de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, comment risque d'évoluer la végétation prairiale ? La production sera-t-elle affectée ? Quelle sera la capacité des prairies permanentes à résister et à récupérer après des épisodes de type canicule ou sécheresse sévère ? Les pratiques agricoles pourront-elles limiter ces effets ?**

## RÉSUMÉ

Des travaux expérimentaux de manipulation des principales variables du changement climatique sur des prairies permanentes de moyenne montagne ont mis en évidence un effet du changement climatique sur leur production bénéfique pendant seulement 1 à 2 ans. Soumises à un épisode de canicule, leur production baisse pendant 2 ans sans changement significatif de composition fonctionnelle. Une autre approche, comparant la proportion de graminées à stratégie de capture de 861 prairies permanentes, montre que cette proportion augmente au détriment des graminées les moins productives, suite à un changement climatique modéré mais sans prise en compte de l'augmentation de CO<sub>2</sub>. D'autres expérimentations à long terme sont nécessaires pour comprendre et évaluer la capacité de résilience des prairies à rendre des services.

## SUMMARY

### **The impact of climate change on permanent grassland**

How will a warmer, dryer climate and higher levels of CO<sub>2</sub> in the atmosphere change grassland vegetation and production? Experimental studies which involved the manipulation of main climate change variables in mid-altitude permanent grassland showed that the beneficial effect on grassland production only lasted 1 to 2 years. Submitted to a heat wave, grassland production decreased over a period of 2 years without any significant change in functional composition. Another approach, based on comparing the proportion of forage grass with a nutrient uptake strategy in 861 permanent grassland fields, showed that this proportion increased at the detriment of less productive plants after moderate climate change, regardless of higher CO<sub>2</sub> levels. Further long-term experimental studies are required for better understanding and evaluating grassland resilience and its capacity to provide services.

Le changement climatique correspond à une augmentation dans l'atmosphère de la concentration des gaz à effet de serre (GES : dioxyde de carbone, vapeur d'eau, méthane, protoxyde d'azote) qui sont les acteurs principaux du réchauffement de l'air (IPCC, 2007). A l'échelle du globe et depuis le début de l'ère pré-industrielle, la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère a augmenté de 100 ppm et le réchauffement de l'air a été de 0,6°C, avec une accélération depuis les années 1990. De plus, ce changement climatique moyen s'accompagne d'une augmentation de la **variabilité du climat** avec l'ap-

parition plus fréquente d'événements dits extrêmes, car non ou peu référencés dans les bases de données météorologiques (SEMPERVIRENTE *et al.*, 2012). Les canicules estivales de 2003 et 2010, observées en Europe de l'ouest et en Russie, ont induit des réchauffements de l'air supérieurs de 6 à 12°C par rapport aux normales. Outre les effets néfastes sur toutes les activités humaines, les forêts et les prairies, considérées comme puits de GES, sont devenues sources à ces périodes. Suite à la canicule de 2003, les travaux menés à l'échelle européenne ont montré que l'équivalent d'environ quatre ans de GES stockés

## AUTEURS

1 : INRA, UR 874, Unité de Recherche sur l'Ecosystème Prairial, 5 chemin de Beaulieu, F-63100 Clermont-Ferrand ; catherine.cochard@clermont.inra.fr

2 : INRA, UMR 1248 AGIR, F-31326 Castanet-Tolosan

**MOTS CLÉS** : Changement climatique, composition fonctionnelle, dioxyde de carbone, facteur climat, évolution, gestion des prairies, prairie permanente, production fourragère, sécheresse.

**KEY-WORDS** : Carbon dioxide, change in time, climatic change, climatic factor, drought, forage production, functional composition, pasture management, permanent pasture.

**RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE** : Picon-Cochard C., Bloor J., Zwicke M., Duru M. (2013) : "Impacts du changement climatique sur les prairies permanentes", *Fourrages*, 214, 127-134.

par les écosystèmes a été libéré dans l'atmosphère (CIELS *et al.*, 2005). Il y a donc un **risque d'emballement** du réchauffement de l'air lorsque ce type d'événement se produit et un risque de perte de la fonction de régulation que jouent les écosystèmes sur les émissions de GES. La distribution géographique du changement de température à l'échelle du globe est assez bien connue, avec les effets les plus marqués aux hautes latitudes. En revanche, il y a une grande incertitude concernant les régimes de précipitations qui sont affectés à une échelle régionale, voire locale, par la topographie, la présence de mers, lacs ou forêts lesquels ont des effets directs très localisés sur le régime de précipitations des petites régions (IPCC, 2007).

Sous climat tempéré d'Europe de l'ouest, les prairies permanentes sont maintenues tant qu'elles sont pâturées et fauchées pour fournir de l'herbe en quantité et en qualité aux herbivores. D'autres services dits environnementaux tels que la biodiversité végétale et animale, la capacité à filtrer l'air et l'eau, à limiter l'érosion du sol et le lessivage des nutriments et à stocker une grande quantité de C et de nutriments, essentiellement dans le sol, contribuent à la multifonctionnalité des prairies (voir synthèse d'AMIAUD et CARRÈRE, 2012). La majorité des espèces qui les composent sont des plantes pérennes ce qui permet de maintenir un fonctionnement physiologique actif toute l'année si les conditions climatiques le permettent. Dans un contexte de changement climatique, plus chaud, plus sec et avec plus de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, il est important d'évaluer et de comprendre le devenir des services rendus par les prairies, notamment la production de fourrages de qualité. Seront-ils favorisés, maintenus ou réduits ? Quel sera le rôle des espèces végétales dans la capacité des prairies permanentes à résister au changement climatique et à récupérer d'événements extrêmes, de type canicule ou sécheresse sévère ? Est-ce que les pratiques agricoles peuvent freiner ou limiter ces effets ?

Les caractéristiques du climat peuvent avoir un **effet direct sur la production de biomasse, mais aussi indirect** lorsqu'elles engendrent un **changement de composition botanique**, suite à une modification de l'habitat, les milieux pouvant devenir plus chauds et plus secs. Du fait de la grande diversité des prairies permanentes, les changements de composition botanique ont été analysés au niveau des groupes fonctionnels d'espèces (graminées, légumineuses et autres dicotylédones), ainsi que des types fonctionnels de graminées établis à partir de leur aptitude à acquérir des ressources (stratégie de croissance rapide) ou à les conserver (stratégie de croissance lente) (CRUZ *et al.*, 2010 ; DURU *et al.*, 2013 ; SUN et FRELICH, 2011). Les questions seront abordées à partir de **deux approches complémentaires** : i) des expérimentations manipulant pendant une ou plusieurs années des facteurs climatiques pour simuler le changement climatique en conditions naturelles, et ii) la comparaison, le long de gradients climatiques, de prairies supposées à l'équilibre avec le milieu. L'objectif principal de cet article est de **mieux connaître la réponse des prairies permanentes, en termes de biomasse et/ou de composition fonctionnelle de la végétation, à des**

**combinaisons de facteurs du changement climatique, avec ou sans extrêmes**. Il en est attendu des enseignements pour évaluer leur résilience et proposer des voies d'adaptation en anticipant les effets du changement climatique.

## 1. Expériences de manipulation pour simuler le changement climatique en conditions naturelles

### ■ Etat de l'art sur les effets du changement climatique sur les plantes et les écosystèmes

Dans les années 1990, les études menées en conditions contrôlées sur l'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> de l'air ont montré son effet « fertilisant » sur les plantes de type C<sub>3</sub>, puisque la croissance et l'économie de l'eau<sup>1</sup> sont en général plus élevées (MORGAN *et al.*, 2011). La composition chimique des plantes est enrichie en glucides non structuraux mais appauvrie en azote (PICON-COCHARD *et al.*, 2004). Cet effet sur l'azote est expliqué par un effet de dilution dans la matière organique des plantes, mais aussi par une immobilisation accrue par les micro-organismes du sol. **L'enrichissement en CO<sub>2</sub> de l'air** a donc des effets directs importants sur le cycle du carbone et des effets indirects sur les cycles de l'azote et de l'eau (figure 1). Il peut en outre avoir un impact direct sur la composition des groupes fonctionnels de la prairie permanente. Ainsi, l'abondance relative des légumineuses

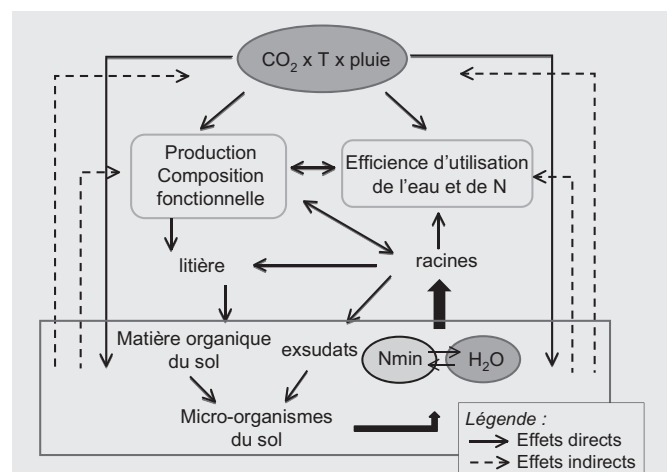


FIGURE 1 : Schéma présentant les effets directs et indirects des principales variables du changement climatique (enrichissement en CO<sub>2</sub> de l'air, réchauffement (T), diminution des pluies).

FIGURE 1 : Figure showing the direct and indirect effect of main climate change variables (higher CO<sub>2</sub> levels in the atmosphere, higher temperatures, lower rainfall).

1 : L'enrichissement en CO<sub>2</sub> de l'air agit directement sur la transpiration des plantes en induisant une fermeture des stomates présents sur les feuilles et qui permettent à la fois la sortie du flux de vapeur d'eau (transpiration) et l'entrée de CO<sub>2</sub>.

est en général favorisée par l'enrichissement en CO<sub>2</sub> de l'air lorsque la disponibilité en lumière (récolte fréquente) et la disponibilité en P et en eau du sol sont suffisantes, tandis que celle des dicotylédones non fixatrices augmente en fauche peu fréquente, ceci au détriment des graminées (TEYSSONNEYRE *et al.*, 2002). De manière similaire, **un réchauffement de l'air modéré** peut avoir des effets bénéfiques pour la croissance des plantes : la phénologie peut être avancée tandis que la transpiration augmente. De plus, le réchauffement stimule les activités microbiennes du sol en augmentant la disponibilité en nutriments. Dans ces conditions, les légumineuses peuvent être favorisées (CANTAREL *et al.*, 2013).

Des travaux de synthèse récents (par exemple DIELEMAN *et al.*, 2012) ont mis en évidence que l'effet des facteurs climatiques appliqués séparément sur les plantes est différent de celui de l'**effet des facteurs combinés**. Il n'y aurait donc pas d'effets additifs des facteurs climatiques mais plutôt des effets de rétroactions négatives correspondant à une diminution de la croissance des plantes.

Deux types de réponse des plantes au changement climatique combiné (CO<sub>2</sub> x température) sont attendus : i) la production des prairies augmente grâce à un allongement de la durée de croissance des plantes, à une efficacité d'utilisation de l'eau plus élevée et à une plus grande disponibilité en N dans le sol ; ii) la production des prairies baisse car la stimulation initiale de la croissance des plantes par effets directs du réchauffement et du CO<sub>2</sub> conduit à un dessèchement accéléré du sol et à une sécheresse plus marquée si le régime de précipitations est insuffisant.

La prise en compte des facteurs climatiques appliqués en combinaison pour simuler le changement climatique est alors indispensable pour extrapoler les réponses des prairies dans le futur. Pour cela, de nouvelles technologies développées dans les années 2000 permettent actuellement de manipuler *in situ* la concentration en CO<sub>2</sub> et la température de l'air : il s'agit du développement des **systèmes FACE** (Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment, MIGLIETTA *et al.*, 2001) et **FATI** (Free Air Temperature Increase, NIXS *et al.*, 1996). Des radiateurs « infrarouge » ont été utilisés pour simuler des vagues de chaleur (KIMBALL, 2005) et l'utilisation d'écrans de pluie a permis aussi de manipuler les précipitations (BEIER, 2004).

## ■ Effets d'un climat futur sur une prairie permanente de moyenne montagne

Les productions aérienne (fourrage) et racinaire (stockage de carbone à court terme dans le sol) d'une prairie permanente de moyenne montagne, située à 800 m d'altitude dans le Puy-de-Dôme et soumise à un changement climatique moyen (CC), ont été étudiées *in situ* durant 5 ans. En début d'expérimentation, cette prairie est dominée par un mélange de graminées à stratégies de capture (avoine élevée, fétuque élevée) et de conservation (agrostis capillaire, chiendent) ; les dicotylédones et

les légumineuses y sont faiblement représentées (<1 %). Avant l'expérimentation, la prairie a été pâturée par des ovins pendant 15 ans et pendant les 5 ans de l'expérimentation aucun engrais n'a été apporté. Le scénario climatique appliqué correspondait à un climat plus chaud de 3,5°C, plus sec l'été (réduction de précipitations de 20 %) et à un enrichissement en CO<sub>2</sub> de l'air de 200 ppm (concentration de 600 ppm). Ce **climat futur** est prévu à la fin du siècle sous scénario SRES A2 selon l'IPCC. Le réchauffement de l'air a été obtenu **par transplantation de monolithes de prairie** de moyenne montagne en plaine (500 m de dénivelé) ; les pluies estivales ont été interceptées par des **écrans de pluie** amovibles et l'**enrichissement en CO<sub>2</sub>** a été réalisé grâce au système mini-FACE. Au final, 4 traitements ont été mis en place : le contrôle (prairie située en moyenne montagne) et **3 traitements « réchauffés »** : T, réchauffement recevant les mêmes précipitations que le contrôle ; TD, réchauffement avec réduction des précipitations estivales ; TDCO<sub>2</sub>, réchauffement avec réduction des précipitations estivales et enrichissement en CO<sub>2</sub> de l'air.

Après 2 ans, les résultats ont montré un effet positif (par rapport au témoin de moyenne montagne) du réchauffement de l'air sur la production aérienne et souterraine de la prairie, sans modification de la diversité végétale. Cependant, **au bout de 3-5 ans, les effets positifs observés sur la production aérienne ont disparu**. La baisse de production aérienne sous réchauffement (T, TD, TDCO<sub>2</sub>) par rapport au témoin semble être **liée à plusieurs facteurs** : i) une forte exportation d'azote en fauche en première année, réduisant la capacité du couvert à constituer des réserves ; ii) une diminution (-10 %) de la proportion des graminées prairiales appartenant aux deux types de stratégies fonctionnelles, au profit des légumineuses (fixatrices d'azote, mais à moindre productivité, *Vicia* sp.) ; iii) une réduction des activités physiologiques des plantes liée à une forte diminution de la teneur en eau du sol en réponse à une demande évaporative plus élevée (ETP). De plus, des mesures d'échanges gazeux (CO<sub>2</sub>) à l'échelle du couvert végétal pendant la saison de croissance ont montré un effet négatif du réchauffement sur l'activité photosynthétique du couvert. Malgré la diminution de l'abondance des graminées après 3 années de réchauffement, la richesse spécifique (nombre d'espèces) et les indices de diversité taxonomique n'ont pas montré de variations significatives sous changement climatique (CANTAREL *et al.*, 2013).

**Après 5 ans** de manipulation climatique, la relation entre productivité aérienne et racinaire de la prairie soumise au CC combiné n'est pas différente de celle du contrôle. Ainsi, pour cette expérimentation, le réchauffement de l'air de +3,5°C appliqué pendant 5 ans a été le facteur le plus limitant de la production de fourrage et de racines, et **l'enrichissement en CO<sub>2</sub> de l'air a compensé les effets négatifs du réchauffement sur la productivité aérienne et sur la productivité racinaire**. Au niveau souterrain, la stimulation de la production des racines est maintenue plus longtemps sous climat futur, mais a aussi diminué 5 ans après le début de l'expérimentation. L'enrichissement en CO<sub>2</sub> de l'air, étudié sous

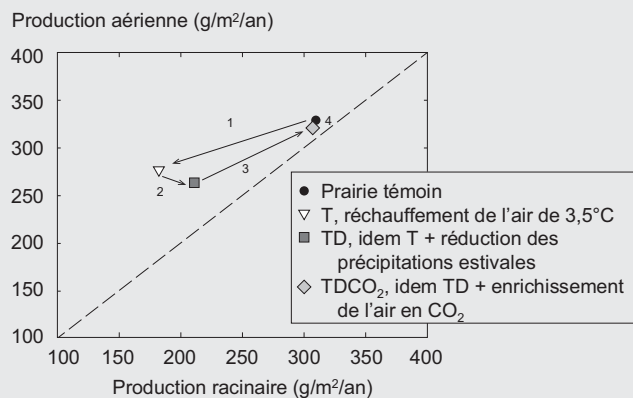


FIGURE 2 : Effets des traitements climatiques sur les productions aérienne et racinaire d'une prairie de moyenne montagne (5<sup>e</sup> année de l'expérimentation).

FIGURE 2 : Effect of climate change treatments on grassland production (plant roots and parts above the ground) in mid-altitude grassland (fifth year of experimentation).

climat réchauffé et avec réduction des précipitations, a permis de compenser en partie les effets négatifs du réchauffement sur la production des racines (PILON *et al.*, 2013 ; figure 2).

### ■ Effets du changement climatique incluant des événements extrêmes de type canicule et sécheresse

L'augmentation de la fréquence des extrêmes climatiques, vagues de chaleur et sécheresse estivale marquée, parfois cumulées, doit aussi être étudiée pour comprendre les effets du changement climatique sur les

caractéristiques des prairies. La production de fourrage d'une autre prairie permanente de moyenne montagne a été suivie *in situ* avec un régime de précipitations non modifié (climat actuel, témoin) et avec une réduction des précipitations estivales (-30 %) et automnales (-40 %) combinée à un réchauffement des températures minimales (+1-2°C la nuit) (climat futur). Ce climat futur est prévu au milieu du siècle sous scénario SRES A1B selon l'IPCC, mais sans prendre en compte l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique. Cette prairie, située à 800 m d'altitude dans le Puy-de-Dôme, est dominée par la présence de graminées à stratégie de capture (ray-grass anglais, pâturin commun, dactyle), d'une dicotylédone non fixatrice (*Taraxacum* spp.) et d'une légumineuse (trèfle blanc). Les manipulations des températures et des précipitations ont été réalisées grâce à l'utilisation d'écrans de pluie automatisés. De plus, **sous climats actuel et futur, un extrême climatique estival a été appliqué** par réduction des précipitations et réchauffement actif du couvert végétal (+6°C) grâce à l'utilisation de « radiateurs infrarouge » pendant deux semaines. Au total **4 traitements climatiques** ont été suivis : climat actuel sans extrême (C), climat actuel avec extrême (CX), climat futur sans extrême (WD), climat futur avec extrême (WDX). Après la période « extrême », la prairie a reçu des précipitations pour évaluer sa capacité de récupération pendant l'automne. La **deuxième année**, les deux climats (actuel et futur) ont été maintenus **sans appliquer d'extrême**. La troisième année, tous les traitements ont reçu les mêmes conditions climatiques : celles de l'année en cours. Enfin, **2 traitements de fréquence de fauche** ont été appliqués (3 et 6 fauches par an) dans tous les traitements, sans apports d'engrais.

Par rapport au traitement témoin (climat actuel), **la production de biomasse a été réduite** dans les traitements qui ont subi l'extrême climatique à la fois en climat

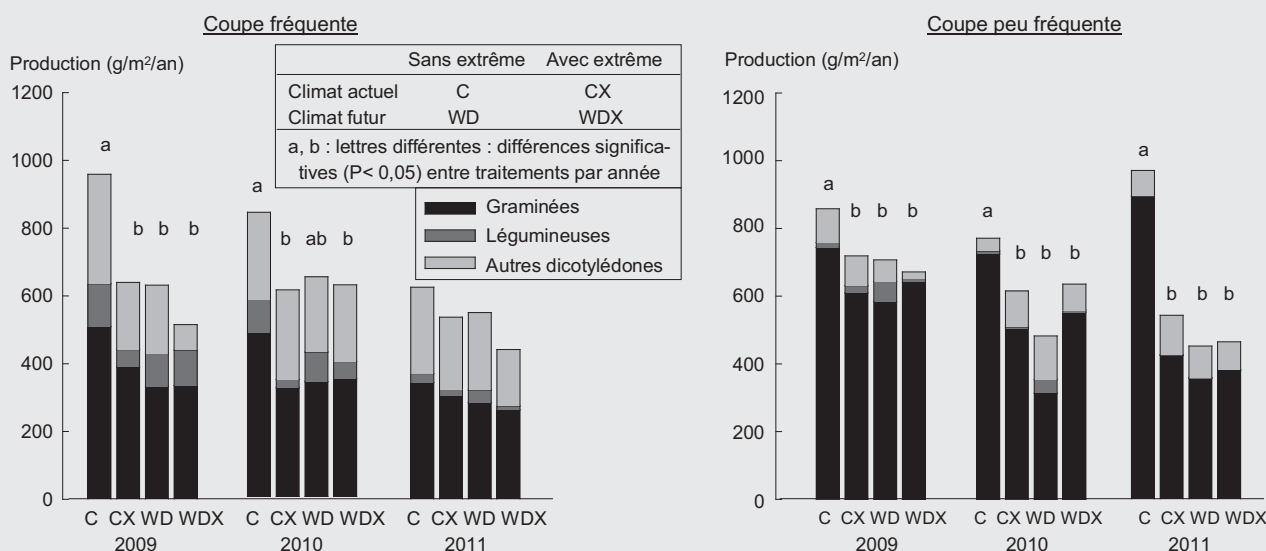


FIGURE 3 : Production de la prairie soumise à 4 traitements climatiques et 2 fréquences de défoliation, et contribution à la production de chaque groupe fonctionnel.

FIGURE 3 : Production of grassland subjected to 4 climate change treatments and 2 cutting rates, and contribution to each functional group.



	Aveyron	Auxois	Pyrénées centrales	Aubrac	Normandie
Echelle spatiale (km)	35	50	1	50	150
Altitude (m)	200-1 100	300-600	500-1 200	900-1 200	< 100
Nombre de relevés (F, PF, P) <sup>(1)</sup>	47, 7, 14	0, 0, 94	103, 96, 42	55 et 21, 0, 38	0, 50, 211
Température (°C) <sup>(2)</sup>	11,6	10,5	11,7	9,1	10,9
Pluviométrie (mm)	971	732	1 014	861	735
ETP (mm)	1 182	1 089	1 200	816	606

1 : F : fauchée ; P : pâturées ; PF : pâturées puis fauchées ; 2 : valeurs moyennes corrigées par l'altitude des parcelles

TABLEAU 1 : Description succincte des 5 bases de données régionales rassemblées dans l'étude (compléments : cf. MARTIN et al., 2009).

TABLE 1 : Brief description of the 5 regional databases pooled for the study (cf. MARTIN et al., 2009).

actuel et climat futur, de même que sous climat futur sans extrême (WD). De plus, **la réduction a été plus importante en coupe fréquente (-38 %)** qu'en coupe peu fréquente (-18 %, figure 3). Chaque groupe fonctionnel (graminées, dicotylédones non fixatrices, légumineuses) a été affecté par l'extrême. **De manière surprenante, cet effet négatif sur la production de la prairie a été maintenu pour les deux années suivantes**, en 2010 et 2011. Ces résultats suggèrent l'absence de résilience (retour à l'état initial) de cette prairie suite à un extrême climatique estival qui pourrait être liée à une limitation par l'azote de la production, notamment en coupe fréquente (ZWICKE et al., 2013).

## 2. Comparaison de la composition fonctionnelle de prairies situées dans des contextes climatiques contrastés

La comparaison de la composition fonctionnelle actuelle (proportion de graminées à stratégies de capture et de conservation) de prairies situées dans différentes zones pédoclimatiques a été effectuée en vue de tirer des enseignements sur l'impact du climat futur.

Pour **comparer un très grand nombre de prairies**, il est difficile de caractériser finement le milieu, notamment la disponibilité en eau (effet de la profondeur de sol exploitée par les racines) et la température (exposition des parcelles en montagne). C'est pourquoi, nous avons retenu **deux méthodes** : i) les variables climatiques

brutes (température, pluviométrie et ETP) ; ii) les indices d'Ellenberg (température, humidité, et continentalité) habituellement utilisés pour caractériser des habitats. D'autre part, il est nécessaire de tenir compte des pratiques qui, étant potentiellement différentes entre sites, biaisent les résultats si on n'en tient pas compte. A cet effet, des régressions ont été établies entre la proportion de graminées à stratégie de capture des ressources (exemple d'espèces : ray-grass anglais, dactyle, houlque laineuse...), et des indicateurs de pratiques (modes d'exploitation, fertilisation), en supplément des variables du climat.

Pour **861 parcelles réparties sur 5 sites** (tableau 1), la température a été estimée en tenant compte de l'altitude (correction de  $-0,6^{\circ}\text{C}$  par 100 m) ou du positionnement géographique par interpolation entre plusieurs stations météorologiques (Normandie). Une valeur unique par région a été considérée pour la pluie et l'ETP, excepté pour la Normandie où des interpolations ont été effectuées à partir de données de 4 stations. Un indice de continentalité a été calculé comme la différence de températures entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid.

Compte tenu des fortes variations d'altitude (Aubrac et Pyrénées) ou de l'étendue géographique (Normandie), il y a de fortes variations de températures intrasites, de telle sorte qu'il y a des recouvrements entre sites pour les températures moyennes annuelles de  $10-11^{\circ}\text{C}$  (figure 4a). La comparaison des indices d'Ellenberg aux descripteurs du

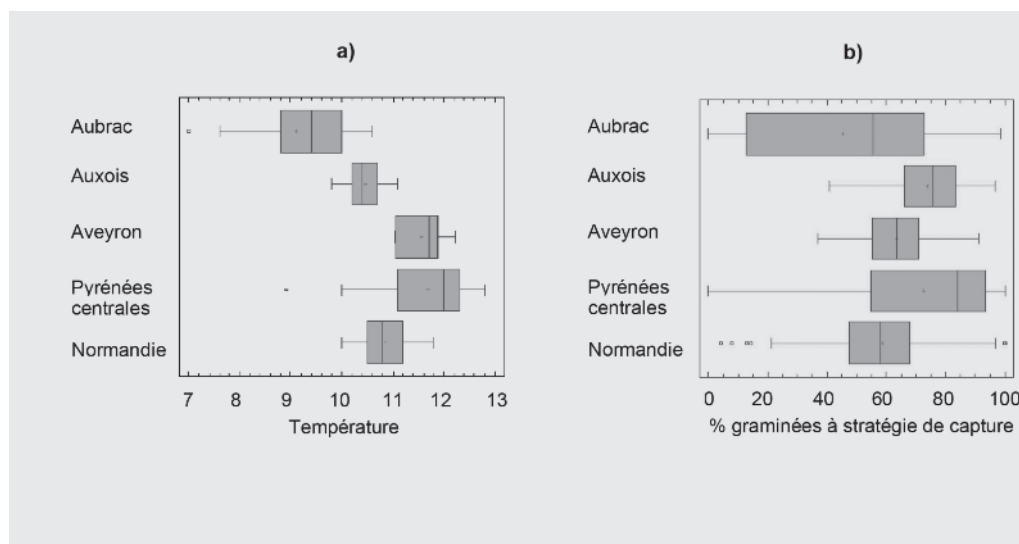


FIGURE 4 : Distribution des données des 5 bases régionales selon a) les températures (estimées à partir de l'altitude des parcelles) et b) le pourcentage de graminées à stratégie de capture (boîtes à moustaches).

FIGURE 4 : Distribution of data from the 5 regional databases based on a) estimated temperatures (based on grassland altitude) and b) percentage of forage grass with a nutrient uptake strategy (box plot).

a)	Indices d'Ellenberg pour le climat			Indices d'Ellenberg pour les pratiques et le pH du sol				r <sup>2</sup>	se <sup>(1)</sup>
Ordonnée à l'origine	Température	Continentalité	Humidité	pH	Azote	Fréquence de coupe	Lumière		
-154	5,6*	-14,2***	3,5**	+12,7***	4,6***	-3,0***	18,2***	0,46***	11

b)	Climat			Pratiques			r <sup>2</sup>	se <sup>(1)</sup>
Ordonnée à l'origine	Température (°C)	Déficit hydrique (mm)	Indice de continentalité	Mode d'exploitation <sup>(2)</sup>	Fertilisation (kg/ha)			
34,8	7,1***	-0,02***	-3,5*	-3,2***	9,2***	0,29***	14,8	

1 : se : erreur standard de la prédiction ; 2 : traitements codifiés 1 pour la fauche et 2 pour le pâturage

TABLEAU 2 : Coefficients de régression entre la proportion de types fonctionnels de graminées à stratégie de capture et a) les indices d'Ellenberg, b) les descripteurs du milieu.

TABLE 2 : Coefficients of regression between the proportion of forage grass functional types with a nutrient uptake strategy and a) Ellenberg indicator values, and b) environmental descriptors.

climat a montré à la fois des convergences et des discordances *ex ante* à l'analyse de la réponse de la composition de la végétation. Les relations entre les indices de température et d'humidité et les données climatiques (température et déficit hydrique) dépendent du site d'étude. Cet effet du site peut être expliqué par l'indice de continentalité et le type de milieu (plaine *vs* montagne). De manière cohérente avec les variabilités intra et inter-sites de la plupart des indices de caractérisation du climat et des pratiques, on observe une large gamme de variation du pourcentage de graminées à stratégie de capture, notamment pour les zones de montagne et en Normandie (figure 4b).

**Le pourcentage de types fonctionnels de graminées à stratégie de capture est significativement corrélé aux trois variables retenues pour caractériser le climat**, que ce soit avec les indices d'Ellenberg (tableau 2a) ou les indicateurs bruts (tableau 2b). Les corrélations sont positives avec la température et la disponibilité en eau, et négatives avec les indices de continentalité. Les **variables caractérisant les pratiques** (fertilisation ou disponibilités en nutriment) sont corrélées positivement avec la proportion de graminées à stratégie de capture des ressources et les variables caractérisant les modes d'exploitation ont aussi un effet significatif.

Nous avons utilisé ces données de deux manières pour évaluer l'effet du changement climatique sur la composition fonctionnelle des prairies permanentes. D'une part, nous avons simulé une augmentation de la température de 1,2°C à partir de l'équation du tableau 2a. La proportion de graminées à stratégie de capture de parcelles situées à 900 m d'altitude a été comparée à celle de parcelles situées à 1 100 m, avec le climat actuel ou suite à une élévation de la température de 1,2°C. Pour cette dernière option, on observe une bonne convergence entre la simulation et la situation de référence (tableau 3). D'autre part, nous avons comparé les valeurs moyennes de deux sites dont l'un préfigure le climat escompté dans quelques décennies. Ainsi, les températures de l'Aubrac sont de 2,6°C inférieures à celles des Pyrénées centrales, et l'écart de déficit hydrique annuel moyen passe de +45

à -186 mm (tableau 1). En considérant les indices d'Ellenberg indicateurs des pratiques comme covariables, on montre que l'effet du site est significatif sur la proportion d'espèces à stratégie de capture de ressources (respectivement 49 *vs* 75 %, les valeurs les plus élevées étant observées pour les Pyrénées).

**L'analyse** des réponses des types fonctionnels de graminées aux caractéristiques du milieu et des pratiques **par les deux méthodes montre des convergences**, ce qui rend les résultats robustes. Cela **permet** aussi **d'accorder du crédit aux indices d'Ellenberg pour hiérarchiser les effets des facteurs de manière plus fine** qu'il n'est possible de le faire à partir des descripteurs du milieu et des pratiques recueillis par enquête. **Les graminées à stratégie de capture sont favorisées par l'augmentation des températures, mais le stress hydrique a un effet opposé**, favorisant les espèces à stratégie de conservation. La résultante de ces deux facteurs dépend donc du contexte. Toutefois, la comparaison de sites dont l'un peut préfigurer le climat futur de l'autre (augmentation de la température et du déficit hydrique) montre que l'effet attendu est bien une augmentation significative des espèces à stratégie de capture. Avec les données disponibles, il n'a pas été possible d'expliquer les différences d'abondance des légumineuses qui sont de 10 % en moyenne.

Caractéristiques des parcelles	Graminées à stratégie de capture (%)
Parcelles situées à 900 m (n = 7)	66
Parcelles situées à 1 100 m (n = 6)	60
Parcelles situées à 1 100 m et élévation de température de 1,2°C (simulation)	68

TABLEAU 3 : Pourcentages de graminées à stratégie de capture observés pour le site Aubrac et simulés suite à une élévation de température.

TABLE 3 : Percentage of forage grass with a nutrient uptake strategy observed on the Aubrac site, and simulated after an increase in temperature.

## Discussion - conclusion

Les **approches expérimentales de manipulation du microclimat** de prairies de moyenne montagne menées *in situ* ont permis de faire avancer les connaissances sur les effets attendus du changement climatique incluant des extrêmes climatiques. Ces travaux ont mis en évidence qu'**un réchauffement moyen de l'air de 3,5°C ainsi que des réductions de précipitations ont diminué la production prairiale**. Les effets attendus d'un réchauffement de l'air ont bien été observés au bout d'un an mais n'ont pas été maintenus à partir de la 3<sup>e</sup> année. Ceci met en évidence une **incapacité des plantes prairiales de moyenne montagne pour s'acclimater et s'adapter à ces conditions climatiques plus stressantes**, prédites par les climatologues à l'horizon 2070-2096. Des résultats originaux ont montré que l'enrichissement en CO<sub>2</sub> de l'air pouvait contrebalancer à court terme les effets négatifs d'événements extrêmes sur la production prairiale (données non montrées obtenues dans l'Ecotron de Montpellier). Cependant il est très probable que cet effet positif ne soit pas maintenu sur plusieurs années (expérience 1), notamment dans un futur lointain (fin de siècle). En outre, sachant que durant l'étude la composition fonctionnelle a été beaucoup plus stable que la production prairiale, on peut supposer que la redondance fonctionnelle des espèces présentes dans la communauté prairiale ne contribuerait pas à jouer l'effet tampon attendu sur la stabilité de la production prairiale (YACHI et LOREAU, 1999). Des changements d'abondance relative des principaux groupes fonctionnels des prairies permanentes étudiées sont observables à des pas de temps annuels et pluriannuels ; cependant, le recrutement de nouveaux individus par la banque de graines est limité dans les expériences de transplantation de monolithes. Mais ces expérimentations sont « lourdes » à mettre en place et coûteuses. Les résultats obtenus doivent alimenter des bases de données et paramétrer des modèles de fonctionnement des prairies non calibrés pour la réponse aux extrêmes par exemple. Cependant, les perturbations induites par les choix expérimentaux (transplantation de monolithes, changements brusques du microclimat de la prairie...) peuvent induire **des artefacts** pouvant affecter la réponse des plantes.

La **comparaison de la composition fonctionnelle de prairies situées dans des contextes pédoclimatiques très diversifiés** présente l'avantage de considérer des végétations le plus souvent en équilibre avec le milieu et les pratiques pour lesquelles le processus d'extinction et de recrutement des espèces est permis par les évolutions lentes du climat. Nos résultats montrent que **l'augmentation des températures favorise les espèces à stratégie de capture de ressources**, en cohérence avec la synthèse de MORECROFT *et al.* (2009) : à partir d'une analyse multi-sites en Grande-Bretagne, ces auteurs montrent que la réduction des stress thermiques et hydriques a réduit les espèces tolérantes à ces stress selon la classification de Grime. Toutefois, dans les expériences de manipulation présentées dans cet article, il

**semble que certaines graminées à stratégie de capture soient favorisées** par le changement climatique moyen avec extrême (dactyle) et d'autres non (pâturin commun). Ces résultats montrent qu'il faut améliorer les connaissances sur les réponses des types fonctionnels des plantes prairiales afin de trouver des « patrons » de réponse des espèces au changement climatique. Cependant, ces études basées sur la comparaison de prairies situées dans des zones biogéographiques différentes présentent deux limites importantes : l'effet du CO<sub>2</sub> ne peut être pris en compte pour se projeter dans un climat futur, et il n'est pas possible de dissocier les effets des principaux facteurs (température et régime hydrique). Enfin, une limite propre à l'étude présentée ici est de s'être limitée aux graminées, alors que nous avons vu dans les études expérimentales que la proportion des différents groupes fonctionnels pouvait aussi changer.

La comparaison des résultats des approches diachronique (expérimentation) et synchronique (parcelles situées dans des pédoclimats diversifiés) est difficile compte tenu de la durée limitée et du nombre restreint de prairies de la première, et du caractère partiel (pas d'effet du CO<sub>2</sub>) et global (difficulté de dissocier les effets des facteurs) de la seconde. Pour toutes ces raisons, **les observatoires de prairies sont un outil indispensable** de compréhension de leurs trajectoires d'évolution sur lesquels les deux types d'approches pourraient être menés. Ces dispositifs doivent porter sur des prairies ayant des compositions fonctionnelles différentes et situées dans des conditions pédoclimatiques les plus larges possibles (plaine, moyenne et haute montagne), en procédant ou non à des manipulations. C'est une condition pour dégager des « patrons » de réponse plus précis que les expériences menées à court terme ou que les comparaisons multi-sites, afin de quantifier la réponse des prairies (compartiments sol et plantes) au changement climatique incluant des extrêmes climatiques. Concernant les pratiques de gestion, les travaux présentés ont montré qu'**une gestion plus extensive par la fauche permettrait une meilleure résistance et une récupération plus rapide de la production prairiale face aux stress**. Cependant, **la fertilisation azotée semble jouer un rôle important pour maintenir le fonctionnement de la prairie les années « sèches »** comme l'ont montré KLUMPP *et al.* (2011). Le nombre trop restreint d'études ne permet pas de conclure quant à la gestion la plus adaptée pour limiter les effets néfastes du changement climatique incluant des extrêmes.

Intervention présentée aux Journées de l'A.F.P.F.,  
"Le changement climatique : incertitudes et opportunités  
pour les prairies et les systèmes fourragers",  
les 26-27 mars 2013.

**Remerciements** : Les auteurs remercient D. Leconte et S. Granger pour avoir fourni les relevés botaniques des prairies de Normandie et de l'Auxois, ainsi que les projets O2LA (Organismes et Organisations Localement Adaptés, contrat ANR-09-STRA-09) et VALIDATE (Vulnérabilité des prairies et des élevages de ruminants au changement climatique et aux événements extrêmes, contrat ANR-07-VULN-011) financés par l'ANR.



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AMIAUD B., CARRERE P. (2012) "La multifonctionnalité de la prairie pour la fourniture de services écosystémiques", *Fourrages*, 211, 229-238.
- BEIER C. (2004) "Climate change and ecosystem function - full-scale manipulations of CO<sub>2</sub> and temperature", *New Phytol.*, 162, 243-245.
- CANTAREL A.A.M., BLOOR J.M.G., 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.*, in press.
- CAIS P., REICHSTEIN M., VIOVY N., GRANIER A., OGEE J., ALLARD V., AUBINET M., BUCHMAN N., BERNHOFER C., CARRARA A., CHEVALLIER F., DE NOBLET N., FRIEND A.D., FRIEDLINGSTEIN P., GRUNWALD T., HEINESCH B., KERONEN P., KNOHL A., KRINNER G., LOUSTAU D., MANCA G., MATTEUCCI G., MIGLIETTA F., OURCIVAL J.M., PAPALE D., PILEGAARD K., RAMBAL S., SEUFERT G., SOUSSANA J.F., SANZ M.J., SCHULZE E.D., VESALA T., VALENTINI R. (2005) "Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003", *Nature*, 437, 529-533.
- CRUZ P., THEAU J.P., LECLoux E., JOUANY C., DURU M. (2010) "Typologie fonctionnelle de graminées fourragères pérennes : une classification multitraits", *Fourrages*, 201, 11-17.
- DIELEMAN W.I.J., VICCA S., DIJKSTRA F.A., HAGEDORN F., HOVENDEN M.J., LARSEN K.S., MORGAN J.A., VOLDER A., BEIER C., DUKES J.S., KING J., LEUZINGER S., LINDER S., LUO Y., OREN R., DE ANGELIS P., TINGEY D., HOOSBEEK M.R., JANSSENS I.A. (2012) "Simple additive effects are rare: a quantitative review of plant biomass and soil process responses to combined manipulations of CO<sub>2</sub> and temperature", *Global Change Biol.*, 18, 2681-2693.
- DURU M., JOUANY C., THEAU J.P., GRANGER S., CRUZ P. (2013) "L'écologie fonctionnelle pour évaluer et prédire l'aptitude des prairies permanentes à rendre des services", *Fourrages*, 213, 21-34.
- IPCC (2007) : "Climate change 2007: the physical science basis", Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL eds., *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on climate change*, Cambridge (UK) and New York (NY, USA): Cambridge University Press, 996 p.
- KIMBALL B.A. (2005) "Theory and performance of an infrared heater for ecosystem warming", *Global Change Biol.*, 11, 2041-2056.
- KLUMPP K., TALLEC T., GUIX N., SOUSSANA J.F. (2011) "Long-term impacts of agricultural practices and climatic variability on carbon storage in a permanent pasture", *Global Change Biol.*, 17, 3534-3545.
- MARTIN G., CRUZ P., THEAU J.P., JOUANY C., FLEURY P., GRANGER S., FAIVRE R., BALENT G., LAVOREL S., DURU M. (2009) "A multi-site study to classify semi-natural grassland types", *Agri. Ecosys. Environ.*, 129, 508-515.
- MIGLIETTA F., HOOSBEEK M.R., FOOT J., GIGON F., HASSINEN A., HEIJMANS M., PERESSOTTI A., SAARINEN T., VANBREEMEN N., WALLEN B. (2001) "Spatial and temporal performance of the MiniFACE (Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment) system on bog ecosystems in northern and central Europe", *Environ. Monit. Assess.*, 66, 107-127.
- MORECROFT M.D., BEALEY C.E., BEAUMONT D.A., BENHAM S., BROOKS D.R., BURT T.P., CRITCHLEY C.N.R. et al. (2009) "The UK Environmental Change Network: Emerging trends in the composition of plant and animal communities and the physical environment", *Biol. Conserv.*, 142, 2814-2832.
- MORGAN J.A., LECAIN D.R., PENDALL E., BLUMENTHAL D.M., KIMBALL B.A., CARRILLO Y., WILLIAMS D.G., HEISLER-WHITE J., DIJKSTRA F.A., WEST M. (2011) "C4 grasses prosper as carbon dioxide eliminates desiccation in warmed semi-arid grassland", *Nature*, 476, 202-205.
- NIJS I., KOCKELBERGH F., TEUGHELHES H., BLUM H., HENDREY G., IMPENS I. (1996) "Free air temperature increase (FATI): A new tool to study global warming effects on plants in the field", *Plant, Cell Environ.*, 19, 495-502.
- PICON-COCHARD C., TEYSSONNEYRE F., BESLE J.M., SOUSSANA J.F. (2004) "Effects of elevated CO<sub>2</sub> and cutting frequency on the productivity and herbage quality of a semi-natural grassland", *E. J. Agron.*, 20, 363-377.
- PILON R., PICON-COCHARD C., BLOOR J.M.G., REVAILLLOT S., KUHN E., FALCIMAGNE R., BALANDIER P., SOUSSANA J.F. (2013) "Grassland root demography responses to multiple climate change drivers depend on root morphology", *Plant Soil*, 364, 395-408.
- SENEVIRATNE S.I., NICHOLLS N., EASTERLING D., GOODNESS C.M., KANAE S., KOSSIN J., LUO Y., MARENGO J., MCINNES K., RAHIMI M., REICHSTEIN M., SORTEBERG A., VERA C., ZHANG, X. (2012) "Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment", *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, Field C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, P.M. Midgley (eds.), *A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 109-230.
- SUN S., FRELICH L.E. (2011) "Flowering phenology and height growth pattern are associated with maximum plant height, relative growth rate and stem tissue mass density in herbaceous grassland species", *J. Ecol.*, 99, 991-1000.
- TEYSSONNEYRE F., PICON-COCHARD C., FALCIMAGNE R., SOUSSANA J.F. (2002) "Effects of elevated CO<sub>2</sub> and cutting frequency on plant community structure in a temperate grassland", *Global Change Biol.*, 8, 1034-1046.
- YACHI S., LOREAU M. (1999) "Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment : the insurance hypothesis", *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 96, 1463-1468.
- ZWICKE M., ALESSIO G.A., THIERY L., FALCIMAGNE R., BAUMONT R., ROSSIGNOL N., SOUSSANA J.F., PICON-COCHARD C. (2013) "Lasting effects of climate disturbance on perennial grassland above-ground biomass production under two cutting frequencies", *Global Change Biol.*, soumis.





Association Française pour la Production Fourragère

---

La revue *Fourrages*

est éditée par l'Association Française pour la Production Fourragère

**[www.afpf-asso.org](http://www.afpf-asso.org)**



AFPF – Centre Inra – Bât 9 – RD 10 – 78026 Versailles Cedex – France

Tél. : +33.01.30.21.99.59 – Fax : +33.01.30.83.34.49 – Mail : [afpf.versailles@gmail.com](mailto:afpf.versailles@gmail.com)

Association Française pour la Production Fourragère