

Prairies et changement climatique

J.-F. Soussana

Le changement climatique et ses effets sont un axe de travail majeur pour la recherche : l'agriculture peut contribuer à la lutte contre le réchauffement climatique mais devra également s'adapter. Cet article dresse une vue d'ensemble des premiers acquis concernant l'élevage et les fourrages et souligne les questions qui demeurent.

RÉSUMÉ

De nombreux indicateurs confirment la réalité du changement climatique, qui devrait affecter prairies et système fourragers de plusieurs manières : par l'évolution moyenne des variables climatiques (température, précipitations et taux de CO₂) mais aussi par leurs interactions et l'accroissement de leur variabilité. L'augmentation de la production fourragère avec l'augmentation du taux de CO₂ est dépendante de nombreux autres facteurs et risque d'être compromise par les déficits hydriques estivaux. L'évolution à moyen terme de la végétation des prairies permanentes aura des incidences sur la qualité des fourrages et le bilan environnemental des prairies. Les espèces implantées comme la gestion des prairies devront être adaptées pour mieux résister aux extrêmes climatiques.

SUMMARY

Grassland and climate change

Climate change and its impact are a major subject of research: agriculture can help prevent global warming but will have to adapt in order to do so. Climate change is expected to affect grassland and forage systems in different ways: based on the evolution of average climatic variables (temperature, rainfall, and CO₂ levels), interactions and increased variability. Increase in forage production, as a result of higher CO₂ levels, depends on several factors and could be compromised by summer droughts. Medium-term evolution of vegetation in permanent grassland will affect the quality of forage and the environmental balance of grassland. Established species and grassland management will have to be adapted in order to better resist climatic extremes.

1. Le changement climatique : déjà une réalité

La publication du 4^e rapport du GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat, ou IPCC, 2007a et b) a renforcé la crédibilité scientifique et sociétale de la réalité du phénomène du changement climatique. C'est, en particulier, la confrontation des scénarios climatiques pour le XXI^e siècle et des observations récentes qui permet maintenant d'attribuer les changements observés, au-delà des facteurs naturels, à l'accroissement de l'effet de serre par l'action de l'homme.

■ L'évolution des variables climatiques

La température moyenne de surface a augmenté de 0,6°C (avec une incertitude en plus ou en moins de 0,2°C) depuis 1860. Le XX^e siècle a probablement été le siècle le plus chaud depuis 1 000 ans et la décennie 1990 a connu le réchauffement le plus important de ce siècle. Deux vagues de chaleur inédites depuis 1 500 ans ont ensuite touché le continent européen (durant l'été 2003 puis, en Russie, durant l'été 2010).

Les données purement climatiques sont corroborées par des observations sur des indicateurs qui en dérivent directement : diminution de la surface de couverture neigeuse et des glaciers de montagne ou de la glace de mer, élévation du niveau de la mer, etc. Par ailleurs,

AUTEUR

INRA, Collège de Direction, 147, rue de l'Université, F-75338 Paris ; jean-francois.soussana@paris.inra.fr.

MOTS CLÉS : Agriculture, association végétale, changement climatique, dioxyde de carbone, environnement, évolution, facteur climat, fixation symbiotique de l'azote, gaz à effet de serre, géopolitique, physiologie végétale, prairie, production fourragère, recherche scientifique, système fourrager, végétation.

KEY-WORDS : Agriculture, carbon dioxide, change in time, climatic change, climatic factor, environment, forage production, forage system, geopolitics, grassland, greenhouse effect gas, plant association, plant physiology, scientific research, symbiotic nitrogen fixation, vegetation.

RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE : Soussana J.-F. (2013) : "Prairies et changement climatique", *Fourrages*, 215, 171-180.

même s'il est généralement très délicat d'isoler l'action éventuelle du réchauffement global de celui d'un grand nombre d'autres facteurs, il est possible d'observer des **impacts sur les écosystèmes cultivés ou naturels**, en particulier **au niveau de leur phénologie** (avancement des dates de floraison des arbres fruitiers, des dates de vendange et des dates de semis du maïs) mais aussi, dans certains cas, de leur productivité (forêts, voire certaines céréales comme le blé). Ils attestent de la réalité d'un climat actuel significativement différent de celui des années 1940-1970 et très vraisemblablement en cours d'évolution sous l'action de l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère.

Les émissions mondiales de CO₂ à partir d'énergies fossiles ont augmenté de 40 % entre 1990 et 2008, pour atteindre 8,7 milliards de tonnes de carbone par an. **En mai 2013, la concentration en CO₂ atmosphérique a atteint un niveau de 400 ppm** à la station de Mauna Loa à Hawaï, indiquant une augmentation de +85 ppm après 55 ans de mesure en continu. Le niveau actuel de CO₂ dans l'atmosphère est le plus élevé depuis au moins 800 000 ans (figure 1) et la température mondiale actuelle est légèrement au-dessus de la plage de température connue au cours de l'Holocène, qui a vu l'apparition et l'expansion de l'agriculture depuis 10 000 ans avant JC environ (MARCOTT *et al.*, 2013). Pour la fin du siècle, les différents scénarios évaluent les conséquences de concentrations atmosphériques en CO₂ situées en gros entre 540 et 950 ppm. L'accroissement moyen de la température de surface est estimé, d'après les simulations réalisées pour le 4^e rapport du GIEC, devoir être de 1,8 à 4°C entre 1980-1999 et 2090-2099. Cette augmentation serait sans précédent dans les 10 000 dernières années. Il est presque certain que toutes **les surfaces continentales se réchaufferont plus rapidement que la moyenne**. Les prédictions sur la pluviométrie sont plus incertaines, mais elles font état en général d'une légère augmentation

de la moyenne annuelle, avec **une diminution de la pluviométrie estivale dans les zones tempérées de moyenne latitude**, qui serait nettement plus marquée autour du pourtour méditerranéen, amplifiant localement l'augmentation de température par le biais de rétroactions entre la sécheresse du sol et la canicule.

■ Une variabilité climatique croissante

En plus de ces variations de climat moyen, il est vraisemblable que le changement climatique s'accompagne d'un **accroissement de la variabilité temporelle et spatiale et des extrêmes**. Avec des températures dépassant de 6°C les normales saisonnières et des déficits de pluviométrie atteignant 300 mm, la **sécheresse et la canicule** de l'été 2003 ont entraîné en France métropolitaine une réduction de 30 % des productions de maïs grain et de fourrages, de 25 % pour l'arboriculture fruitière et de 20 % environ pour le blé et pour d'autres productions végétales. Les dommages non assurés pour le secteur agricole ont été estimés à 4 milliards d'euros pour la France et à 13 milliards d'euros pour l'Europe. La canicule et la sécheresse de l'été 2003 ont provoqué un déficit de production fourragère estivale atteignant 60 % dans les pays touchés, comme la France. En Suisse, le fourrage a dû être importé de pays aussi éloignés que l'Ukraine (TUBIELLO *et al.*, 2007). La productivité primaire des écosystèmes européens a été réduite entraînant un important déstockage de carbone (CIAIS *et al.*, 2005). Cet épisode récent, ainsi que d'autres (comme la sécheresse exceptionnelle de printemps en 2011) au cours de la décennie, démontre le besoin d'adaptation de l'agriculture, de la forêt et de l'ensemble des écosystèmes à la variabilité climatique actuelle. Aux Etats-Unis, les canicules de 2005, 2006 et 2007 ont battu des records historiques pour les températures maximales et minimales, et des sécheresses ont touché plus de 50 % du territoire en 2000-2002, 2006-2007 et 2012. En Australie, la sécheresse généralisée de 6 ans, de 2001 à 2007, est considérée comme la plus grave de l'histoire du pays. **Les impacts de ces extrêmes climatiques sont encore plus importants pour l'agriculture de subsistance**. Ainsi, dans les régions arides de l'Afrique subsaharienne, la mortalité des cheptels nationaux a varié de 20 à 60 % au cours des sécheresses des dernières décennies. Les aléas climatiques entraînent également dans ces régions des tensions sur la sécurité alimentaire avec des conséquences négatives majeures pour les populations et pour le développement durable.

L'évolution des extrêmes climatiques a récemment été évaluée par le GIEC (IPCC, 2012). En Europe, le nombre de journées exceptionnellement chaudes a significativement augmenté depuis 1950. Dans le sud de l'Europe, les sécheresses climatiques se sont renforcées à la fois en fréquence et en intensité. Cette tendance devrait s'accroître d'ici à la fin du siècle avec **des vagues de chaleur 10 fois plus fréquentes qu'à notre époque**. En revanche, la fréquence de retour d'épisodes de précipitations intenses ne devrait pas varier significativement. Toutes les projections indiquent qu'indépendamment des efforts de réduction souhaitables des émissions de gaz à effet de serre, ces aléas climatiques se reproduiront plus

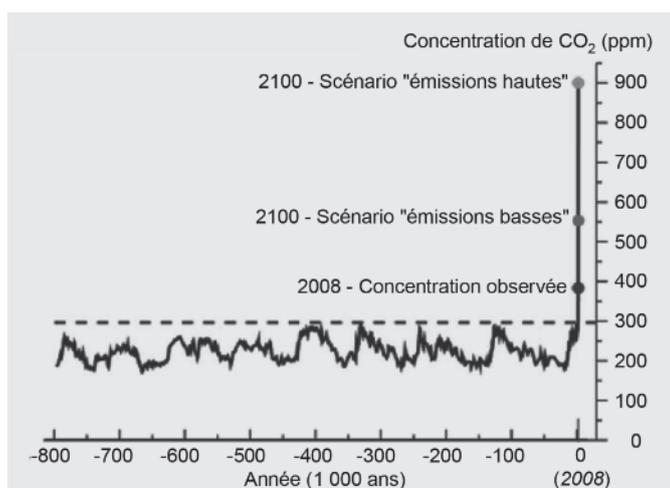


FIGURE 1 : Evolution de la concentration atmosphérique en CO₂ depuis 800 000 ans et perspectives (d'après LÜTHI *et al.*, 2008).

FIGURE 1 : Evolution of CO₂ levels in the atmosphere over a period of 800,000 years and perspectives for the future (after LÜTHI *et al.*, 2008).

souvent que par le passé. Il est très probable (au seuil de 90 %) qu'à la fin du XXI^e siècle, les températures de la saison de croissance dans la plupart des régions tropicales et subtropicales dépasseront les températures saisonnières les plus extrêmes enregistrées de 1900 à 2006 (BATTISTI et NAYLOR, 2009). En Europe, au cours des 40 prochaines années, **le risque d'étés aussi chauds que 2003 pourrait** augmenter de deux ordres de grandeur et **se rapprocher de la norme d'ici 2080** selon des scénarios d'émissions élevées de GES.

■ Comment répondre à ces évolutions ?

L'un des grands défis du 21^e siècle sera ainsi **d'augmenter la production alimentaire mondiale pour accueillir une population mondiale croissante** (8 à 10 milliards) tout en évitant des changements environnementaux dangereux (ROCKSTRÖM *et al.*, 2009 ; SOUSSANA *et al.*, 2012). Le changement climatique a déjà un impact négatif sur la production alimentaire au travers d'événements climatiques extrêmes (LOBELL *et al.*, 2011 ; COUMOU et RAHMSTORF, 2012). **La fenêtre dont nous disposons pour limiter le réchauffement global à 2°C est en train de se refermer** : sans une réduction mondiale des émissions de gaz à effet de serre (GES) intervenant au plus tard d'ici 10 ans, il sera sans doute impossible d'éviter un réchauffement global de 3-4°C, ou plus, d'ici à la fin du siècle (STOKER, 2013). **Nous avons collectivement le choix, par notre action dans les 10 à 20 prochaines années, d'aller vers un réchauffement encore modéré de l'ordre de 2 à 3°C** (à mettre en rapport avec une gamme de variation de la température moyenne annuelle de la France métropolitaine depuis 1900 de près de 2°C d'après Météo-France) ou, au contraire, dépassant les 4-5°C si on prolonge la tendance actuelle.

Des changements importants sont désormais inévitables, quels que soient les efforts de réduction des émissions de gaz à effet de serre qui pourront être déployés, **du fait de l'inertie du système climatique**. Ces changements vont affecter de nombreux secteurs : agriculture, forêt, pêche, aménagement du territoire, tourisme, infrastructures, *etc.* En ce sens, la question du changement climatique a cessé d'être une question strictement scientifique concernant un avenir lointain pour devenir **un enjeu prégnant pour la société, pour les politiques publiques et pour les acteurs privés**.

2. Agriculture et changement climatique : deux défis

■ Agriculture et lutte contre le changement climatique

La lutte contre le changement climatique demeure une priorité et les mesures nécessaires pour limiter son ampleur font l'objet d'engagements internationaux (protocole de Kyoto et ses suites), européens (objectif de réduction de -20 % des émissions de gaz à effet de serre

en 2020 par rapport à 1990) et nationaux (plan national Climat, objectif national de réduction de 75 % des émissions de GES en 2050). Au plan mondial, le secteur de l'agriculture et celui de "l'Utilisation des Terres, leur Changement et la Forêt" (UTCF) représentent environ 30 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre (IPCC, 2007b). **L'inventaire national 2010 des émissions françaises de GES attribue à l'agriculture 17,8 % de ces émissions** ; cette contribution s'élève à environ 20 % des émissions totales si l'on tient compte des émissions qui sont liées à la consommation d'énergie de l'agriculture et qui sont comptabilisées dans le secteur "Energie" de l'inventaire national.

Une spécificité des émissions du secteur agricole est qu'elles sont contrôlées par l'action de l'homme sur des processus biologiques. Sur les 17,8 % émis par l'agriculture dans l'inventaire national, 9,8 % sont dus aux émissions de protoxyde d'azote (N₂O), produit lors des réactions biochimiques de nitrification et de dénitrification (sols agricoles, prairies et gestion des déjections animales) et 8,0 % sont liés au méthane (CH₄) produit lors de fermentations en conditions anaérobies (fermentation entérique et gestion des déjections animales). Hors UTCF, **86,6 % des émissions françaises de N₂O et 68 % des émissions françaises de CH₄ sont attribués à l'agriculture** (46 % proviennent de la fermentation entérique et 22 % de la gestion des déjections animales).

Compte tenu de son poids dans les émissions globales, **l'agriculture est appelée à contribuer à l'effort général de réduction des émissions de GES**. Réduire les émissions nationales par un facteur 4 sans aucun changement pour l'agriculture reviendrait en effet à rendre les émissions agricoles majoritaires dans l'inventaire national.

L'agriculture peut participer à l'amélioration du bilan net des émissions de GES *via* quatre leviers : la réduction des émissions de N₂O et de CH₄, le stockage de carbone dans les sols et dans la biomasse, la production d'énergie à partir de biomasse (agrocarburants, biogaz) qui revient à réduire les émissions par effet de substitution à des énergies fossiles et les économies d'énergie (fuel). Etant donné le caractère majoritairement diffus des émissions, et la nature complexe des processus qui en sont à l'origine, **les possibilités d'atténuation sont à ce jour moins bien quantifiées** que dans d'autres secteurs et s'accompagnent d'incertitudes importantes. Une étude récente conduite par l'INRA (PELLERIN *et al.*, 2013) a permis d'évaluer le potentiel d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre et de stockage de carbone dans le secteur agricole. Cette étude analyse dix actions techniques portant sur des pratiques agricoles, avec une atténuation escomptée se situant au moins en partie sur l'exploitation agricole, sans remise en cause majeure du système de production ni baisse des niveaux de production supérieure à 10 %. Elles portent sur la réduction de la fertilisation azotée, sur le stockage de carbone dans le sol et dans la biomasse, sur des modifications de la ration des animaux d'élevage et sur une valorisation des effluents pour produire de l'énergie et réduire la consommation d'énergie fossile sur l'exploitation. L'INRA contribue par

ses recherches à un ensemble de projets nationaux, européens et internationaux dans ce domaine et coordonne notamment un groupe de travail et des réseaux de l'Alliance mondiale de recherche sur les GES en agriculture (www.globalresearchalliance.org).

■ Adaptation de l'agriculture au changement climatique

L'adaptation au changement climatique est devenue également un enjeu majeur et des plans nationaux d'adaptation ont été encouragés pour les pays en développement lors des négociations sur le climat à Cancún en 2010. Cette adaptation doit être envisagée comme un complément désormais indispensable aux actions d'atténuation déjà engagées. L'intérêt économique d'être adapté a été démontré par le rapport STERN en 2006 qui a montré que l'adaptation devait être anticipée afin d'en réduire les coûts et d'en anticiper les bénéfices.

L'adaptation au changement climatique peut se définir comme l'ensemble des actions contribuant à ajuster les systèmes naturels ou humains en réponse à des phénomènes climatiques, afin d'atténuer leurs effets néfastes ou d'exploiter leurs effets bénéfiques. Car, si **le réchauffement climatique** induira des coûts pour la société, il **entraînera également des opportunités qu'il s'agira de saisir**.

L'adaptation cherche à **limiter les vulnérabilités**, afin de réduire l'impact du changement climatique. Les agriculteurs, les éleveurs ou les forestiers disposent déjà de nombreuses options techniques d'adaptation pour des changements marginaux des systèmes existants. **Ces adaptations autonomes des pratiques s'inscrivent dans le prolongement de stratégies de maîtrise du risque climatique**, qui demandent encore des efforts de recherche. Elles peuvent permettre de « gagner du temps » pour un changement climatique modéré. Par exemple, pour les cultures annuelles, l'adaptation des pratiques agricoles permettrait d'augmenter de 10 à 20 % les rendements du blé, ce qui permettrait de retarder de plusieurs décennies les impacts du changement climatique sur la production. Cependant, l'efficacité de cette adaptation autonome est probablement insuffisante pour un changement climatique sévère ou pour des événements extrêmes. La mise au point d'**une stratégie d'adaptation planifiée, compatible avec les objectifs de développement durable, est donc incontournable** pour limiter la vulnérabilité face à des changements sévères.

Les échelles de temps concernant l'adaptation semblent *a priori* différentes selon les systèmes étudiés : en gros, de l'ordre de quelques années pour les cultures annuelles et les animaux d'élevage, 20 ans pour l'arboriculture fruitière ou la vigne, 50 ou 100 ans pour les forêts. Cependant, pour tous les systèmes, certaines formes d'adaptation nécessiteront un effort de recherche qui pourrait demander plusieurs années, voire plusieurs décennies : par exemple, pour la création d'un matériel génétique adapté, pour la mise au point d'un système d'alerte et d'aide à la décision en réponse à une variabilité climatique accrue, etc.

Dans ce contexte, l'adaptation au changement climatique de l'agriculture et des écosystèmes s'impose aujourd'hui comme un objectif complémentaire à la lutte contre l'effet de serre. **L'agriculture « intelligente face au climat » a été définie par la FAO en 2010** comme une agriculture qui augmente durablement la productivité et la résilience (adaptation), réduit les émissions de GES (atténuation) et améliore la sécurité alimentaire et le développement. Des systèmes plus productifs et résilients peuvent avoir des effets secondaires bénéfiques comme la séquestration du carbone et des réductions des émissions de gaz à effet de serre. Ces options « gagnant - gagnant » supposent de modifier la gestion de la biodiversité et des ressources naturelles (par exemple, conservation et restauration des sols, récupération et économies d'eau, utilisation accrue de la fixation biologique de l'azote et de systèmes intégrés, etc.).

A l'échelle européenne, 21 pays se sont alliés pour programmer de manière conjointe leur recherche dans le domaine de l'agriculture, du changement climatique et de la sécurité alimentaire (SOUSSANA *et al.*, 2012). Un agenda stratégique de recherche a été défini en interaction avec des porteurs d'enjeux et se traduit par une série de programmes de recherche, financés par les Etats et par la Commission Européenne, sur la modélisation des impacts du changement climatique, sur l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, sur la sécurité alimentaire mondiale en lien avec les changements d'affectation des terres et sur l'adaptation au changement climatique de l'agriculture européenne. Ces actions peuvent prendre différentes formes (appel d'offres, mobilité de chercheurs, infrastructures de recherche...) et s'accompagnent d'un alignement progressif des programmes de recherche nationaux¹.

Au plan international, la nécessité d'une convergence entre les recherches sur l'agriculture, les écosystèmes et le changement climatique est notamment portée par *Future Earth*², une plate-forme qui rassemble les grandes institutions scientifiques, les agences de financement de la recherche et les Nations Unies. C'est donc à une prise de conscience d'une grande ampleur que nous assistons aujourd'hui dans le domaine de la recherche.

C'est dans ce contexte que l'Agence Nationale de la Recherche a confié à l'INRA en 2008 la coordination d'un atelier de réflexion prospective (ARP) sur l'adaptation au changement climatique de l'agriculture et des écosystèmes anthropisés. Cet atelier avait deux objectifs : disposer d'un panorama des **recherches françaises** dans ce domaine et définir les éléments d'une stratégie de recherche susceptible d'être mise en œuvre dans les programmes de l'agence ou d'autres institutions. L'ARP ADAGE (Adaptation de l'agriculture et des écosystèmes anthropisés au changement climatique) a permis d'opérer une première cartographie des recherches dans ce domaine (SOUSSANA *et al.*, 2013). Il a notamment montré que les recherches sur l'adaptation au changement climatique constituent une

1 : FACCEJPI : Agriculture, Food Security and Climate Change Joint Programing Initiative (www.facejpi.com)

2 : www.icsu.org/future-earth

thématique émergente, comme en atteste la multiplication par 10 au cours des 10 dernières années du nombre de citations dans la littérature scientifique internationale. Cet atelier a souligné que les recherches sur l'adaptation au changement climatique de l'agriculture et des écosystèmes doivent permettre :

- d'évaluer les risques associés aux événements climatiques extrêmes et de définir des stratégies visant à anticiper et pallier les impacts de crises climatiques ;

- de prévoir (avec une quantification des incertitudes associées) les impacts régionaux du changement climatique sur l'agriculture et les écosystèmes diversement anthropisés ;

- de comprendre et de maîtriser les principaux effets du changement climatique sur les dynamiques de la biodiversité (aires de répartition des espèces, ressources génétiques) et de la santé (espèces invasives, bioagresseurs, maladies) des écosystèmes ;

- d'adapter des espèces cultivées ou domestiquées aux modifications du climat et de la composition de l'atmosphère (CO₂) et de renforcer la capacité d'adaptation des systèmes de production et des filières ;

- de développer des technologies innovantes de l'adaptation compatibles avec la réduction des émissions et le renforcement des puits de carbone ;

- d'identifier les coûts et les bénéfices de mesures d'adaptation acceptables au regard d'autres enjeux (compétitivité économique, biodiversité, ressources en eau et en sols, critères de qualité fixés par l'aval) ;

- de définir des modes d'organisation collective (gouvernance des territoires, assurances, formation, innovation, valorisation) susceptibles de renforcer la capacité d'adaptation de l'agriculture et de la forêt au changement climatique.

Ces pistes sont d'ores et déjà utiles pour orienter la recherche relative aux impacts, à la vulnérabilité et à l'adaptation. L'INRA a ainsi lancé un méta-programme (ACCAF) sur l'adaptation au changement climatique de l'agriculture et de la forêt. Cet atelier a bénéficié des conclusions de l'ARP ADAGE. Elles conduisent aussi à un **renforcement des infrastructures nationales de recherche**, notamment en ce qui concerne l'étude et l'observation à long terme des agro-écosystèmes et de leur biodiversité³. Toutefois, avant de pouvoir progresser dans l'adaptation des prairies et des systèmes d'élevage au changement climatique, il faut déjà pouvoir mieux anticiper les impacts du changement climatique sur les prairies.

3. Quels impacts du changement climatique sur les prairies ?

Le changement climatique recouvre un ensemble de facteurs (concentration en CO₂ atmosphérique, température et précipitations). Les changements locaux sont

moins incertains d'ici à 2100 pour le CO₂ que pour la température et pour les précipitations saisonnières. Les réponses des prairies à ces changements sont **complexes car elles dépendent d'interactions avec la disponibilité de l'eau et des nutriments, avec la nature des sols et de la végétation et avec les conditions de gestion**. Au cours des 30 dernières années, des dizaines d'expériences ont été menées pour comprendre les impacts du changement climatique sur les prairies. A partir de la fin des années 1980, de nouvelles techniques d'enrichissement en CO₂ de l'atmosphère des cultures ont vu le jour. La technique de référence (FACE, « *Free Air Carbon dioxide Enrichment* ») permet de réaliser une fumigation contrôlée en CO₂ d'un écosystème. La fumigation consiste à injecter de l'air fortement enrichi en gaz carbonique dans un anneau creux, placé autour d'une ou de plusieurs parcelles expérimentales. Cette fumigation est contrôlée en fonction de la concentration en CO₂ mesurée au centre de l'anneau et de la vitesse du vent. La plupart de ces expériences concernent les prairies tempérées et méditerranéennes, nettement moins les prairies tropicales et les zones arides pour lesquelles il existe un véritable déficit de connaissances.

■ Impacts de l'augmentation du CO₂ atmosphérique sur la photosynthèse et la productivité végétale

L'augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂ stimule la photosynthèse, entraînant une **augmentation de la productivité primaire** (KIMBALL *et al.*, 2002 ; NOWAK *et al.*, 2004). En conditions optimales, un doublement de la concentration atmosphérique ambiante en CO₂ augmente la photosynthèse foliaire de 30 à 50 % pour les espèces végétales en C₃ (d'origine tempérée) et de 10 à 25 % pour les espèces en C₄ (d'origine tropicale). Ceci en dépit d'une fréquente acclimatation négative de la photosynthèse après exposition prolongée à un enrichissement en CO₂ (ELLSWORTH *et al.*, 2004 ; AINSWORTH et LONG, 2005). La photosynthèse du couvert est également augmentée de 30 % pour un doublement de la concentration ambiante en CO₂ chez une graminée comme le ray-grass anglais (CASELLA et SOUSSANA, 1997 ; AESCHLIMANN *et al.*, 2005).

La production de la prairie augmente en moyenne de 17 % sous l'effet d'un enrichissement en CO₂ (CAMPBELL *et al.*, 2000 ; AINSWORTH *et al.*, 2003 ; NOWAK *et al.*, 2004). Toutefois, cette moyenne masque des variations importantes et **la réponse à long terme peut différer** sensiblement de la réponse à court terme (THORNLEY et CANNELL, 2000). Ainsi, dans l'expérience suisse de fumigation de CO₂ à l'air libre (FACE), en fertilisation azotée non limitante, la stimulation de la production du ray-grass anglais est passée en 10 ans de 7 à 32 % (LÜSCHER et AESCHLIMANN, 2006), alors qu'en azote limitant un effet non significatif a été observé (SCHNEIDER *et al.*, 2004 ; LÜSCHER et AESCHLIMANN, 2006). Nous ne savons donc pas encore quelle est la part de l'effet fertilisant du CO₂ qui subsistera dans les conditions très variables de la production agricole mondiale (TUBIELLO *et al.*, 2007 ; SOUSSANA *et al.*, 2010).

3 : Projet ANAEE Services : <http://presse.inra.fr/Ressources/Communique-de-presse/ANAEE-Services>

■ Interactions entre augmentation du CO₂ et réchauffement climatique

Chez les plantes en C₃, l'**optimum thermique de la photosynthèse augmente** de quelques degrés dans une **atmosphère enrichie en CO₂**. D'un autre côté, l'augmentation de la température accroît en valeur absolue la respiration végétale et, par conséquent, les pertes de carbone la nuit. L'effet relatif du CO₂ sur la croissance végétale d'une graminée comme le ray-grass anglais augmente avec la température (CASELLA *et al.*, 1996) :

- L'augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂ entraîne une fermeture partielle des stomates foliaires, ce qui tend à réduire la perte en eau des feuilles. Toutefois, cet effet est souvent compensé par une augmentation de la surface transpirante (feuillage plus développé).

- L'efficacité d'utilisation de l'eau augmente sous fort CO₂. L'effet relatif du CO₂ sur la croissance est ainsi généralement plus fort en présence d'une contrainte hydrique qu'en son absence.

- L'augmentation de la température de l'air et des feuilles accroît la demande climatique et l'évapotranspiration.

À l'échelle du peuplement végétal, les interactions entre température, CO₂ et disponibilité en eau sont donc importantes et affectent à la fois la production végétale et le bilan hydrique.

■ Impacts du changement climatique sur des prairies temporaires

Une expérience a été conduite durant 3 ans à l'INRA (Clermont-Ferrand) afin de tester les impacts d'un **scénario de changement climatique** (700 ppm CO₂ avec ou sans réchauffement de +3°C, sans variation de la pluviométrie) sur une prairie temporaire de ray-grass anglais (*Lolium perenne*) associée ou non au trèfle blanc (*Trifolium repens*) et cultivée à 2 niveaux d'apport d'azote sans limitation par P, K et S.

Le doublement de la concentration ambiante en CO₂ (700 ppm) sans augmentation de température a accru la production moyenne des peuplements semés de ray-grass de 16 %. Cette augmentation a été faible et parfois non significative (+6 %, en moyenne) au printemps et à l'automne, tandis que la réponse en conditions de déficit hydrique estival était nettement plus forte (+48 %, en moyenne). En été, l'augmentation du CO₂ atmosphérique a permis de conserver une teneur en eau du sol plus forte, ce qui a renforcé la stimulation de la production (CASELLA *et al.*, 1996).

Un réchauffement de 3°C sous 700 ppm de CO₂ n'a pas modifié significativement la production annuelle de matière sèche : **l'augmentation de la productivité végétale au printemps et à l'automne a été compensée par un déficit estival de production**. Le réchauffement de l'air s'est traduit par un assèchement du sol au printemps et par un stress hydrique accentué en été. La saison de croissance a été rallongée de 3 semaines environ au printemps

comme à l'automne. Ces résultats montrent que les impacts du changement climatique sur la production fourragère seront particulièrement sensibles en été, malgré l'effet d'économie d'eau obtenu grâce au doublement du CO₂ atmosphérique.

La qualité du fourrage a également été affectée : sous fort CO₂, la teneur en protéines a diminué d'un tiers et les teneurs en sucres solubles ont pratiquement doublé ; un réchauffement de 3°C a entraîné une légère baisse de la digestibilité du fourrage (SOUSSANA *et al.*, 1996). La baisse de la teneur en protéines du fourrage ne tenait pas seulement à une dilution accrue des protéines par les sucres solubles. Les graminées cultivées sous fort CO₂ étaient en effet plus carencées en azote que dans le traitement témoin. Des études détaillées des cycles C et N dans le sol grâce aux isotopes stables ¹³C et ¹⁵N ont permis de montrer que l'immobilisation de l'azote minéral par les micro-organismes du sol est plus forte lorsque le taux de CO₂ est doublé (LOISEAU et SOUSSANA, 2000). **Le réchauffement de 3°C a réduit l'ampleur des effets négatifs sur la nutrition azotée des graminées.**

Un autre aspect important a été mis en évidence par ces expériences : **la fixation symbiotique des légumineuses est fortement stimulée** (de 40 à 50 %) **par l'enrichissement en CO₂**. Avec la concentration de 700 ppm CO₂, le trèfle blanc, légumineuse la plus fréquente dans les prairies françaises, est devenu plus productif en culture pure et plus abondant dans les associations avec les graminées. L'augmentation de la fixation symbiotique, qui intervenait également dans le climat réchauffé de 3°C, indique qu'il sera possible d'utiliser les légumineuses pour compenser la carence en azote induite par l'augmentation du CO₂ atmosphérique (SOUSSANA et HARTWIG, 1996).

Cette expérience montre également que **le changement climatique aura des impacts sur le bilan environnemental de la prairie** :

- le drainage hivernal, qui permet de réalimenter les nappes, a été réduit de 40 à 50 mm dans le climat réchauffé de 3°C (CASELLA *et al.*, 1996) ;

- les pertes hivernales en nitrate dans les eaux de drainage ont diminué dans les peuplements exposés à un doublement du CO₂ atmosphérique (SOUSSANA *et al.*, 1996) ;

- le stockage de carbone dans la matière organique du sol a augmenté significativement sous l'effet de l'augmentation du CO₂ et ce stockage n'a pas été affecté par un réchauffement de 3°C (LOISEAU et SOUSSANA, 2000).

Les services écologiques rendus par une prairie temporaire pourraient donc évoluer avec les changements du climat et de la composition de l'atmosphère. La moindre réalimentation des nappes souterraines est préoccupante puisque l'on craint une fréquence accrue des sécheresses dans un climat modifié. En revanche, la réduction des pertes de nitrate et l'augmentation des stocks de carbone organique du sol constitueraient un avantage du point de vue de l'environnement. Mais il n'est pas certain que ces résultats soient extrapolables, l'expérience ayant imposé un doublement instantané de la concentration

atmosphérique en CO₂, alors que celle-ci augmentera graduellement au cours du siècle.

■ CO₂ et diversité floristique des prairies semi-naturelles

Une grande partie des prairies se caractérisent par une flore diversifiée. Dans une expérience faisant varier la diversité spécifique végétale au champ sous CO₂ ambiant ou élevé, les mélanges les plus riches en espèces végétales ont mieux répondu au CO₂ que les cultures pures et les peuplements les moins diversifiés (REICH *et al.*, 2001). De plus, dans certaines études, des indices de diversité floristique ont augmenté sous l'effet d'une exposition pluriannuelle d'une prairie permanente à un enrichissement en CO₂ (TEYSSONNEYRE *et al.*, 2002a). Toutefois, ce résultat n'a pas été confirmé par d'autres études (par exemple, ZAVALTA *et al.*, 2003 ; CANTAREL *et al.*, 2013).

Des monolithes d'une prairie permanente comprenant une vingtaine d'espèces herbacées (graminées, légumineuses et dicotylédones non fixatrices) ont été exposés durant 3 ans à un enrichissement continu en CO₂ (600 ppm) dans un **dispositif de fumigation contrôlée** de CO₂ à l'air libre (Mini-FACE). Au cours de cette expérience, réalisée simultanément à l'INRA (Clermont-Ferrand) et dans plusieurs sites européens, seule la concentration atmosphérique en CO₂ a été manipulée. La richesse spécifique de la prairie n'a pas été modifiée par l'enrichissement en CO₂. En revanche, la composition botanique de la prairie a dérivé. **Les graminées qui étaient initialement dominantes ont fortement régressé dans le traitement soumis à une augmentation du CO₂ atmosphérique, au profit soit des légumineuses** (lorsque la prairie était fauchée fréquemment), **soit des dicotylédones non fixatrices** (lorsque la prairie n'était coupée que 3 fois par an) (TEYSSONNEYRE *et al.*, 2002). Ce résultat a été confirmé dans d'autres sites (LÜSCHER *et al.*, 1996 ; HARMENS *et al.*, 2004 ; ROSS *et al.*, 2004). La production de la prairie permanente a augmenté graduellement en réponse au CO₂, en partie du fait d'un accroissement de la fixation symbiotique des légumineuses. L'augmentation de production sous l'effet du CO₂ est intermédiaire entre le cas des graminées pures (10 à 15 %) et celui des légumineuses pures (20 à 40 %). La **valeur nutritive du fourrage** récolté en prairie permanente a également été étudiée. On a observé des tendances communes pour les graminées : diminution des protéines, augmentation des sucres solubles ; l'augmentation des légumineuses et des dicotylédones non fixatrices a permis de compenser cette réduction des protéines et de préserver la valeur azotée du fourrage (TEYSSONNEYRE *et al.*, 2002 ; PICON-COCHARD *et al.*, 2004).

Ces résultats soulignent donc que **les impacts sur la production de la prairie et sa valeur alimentaire** pour des herbivores **dépendront largement des changements de composition botanique induits** par l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂.

Afin de disposer de références expérimentales concernant les impacts de scénarios climatiques prévus

pour 2050, une nouvelle expérience a été entreprise en 2005 à l'INRA (Clermont-Ferrand). Un scénario climatique a été retenu qui correspond à la moyenne des prédictions pour le centre de la France dans le cas d'une augmentation rapide des émissions de gaz à effet de serre (scénario A2, GIEC, 2001) : réchauffement de 3,5°C, diminution de 20 % de la pluviométrie estivale et augmentation de 200 ppm du CO₂ atmosphérique. Afin de reproduire expérimentalement ce scénario climatique, des **monolithes de prairie permanente** ont été prélevés en moyenne montagne (Theix, 900 m d'altitude) puis **transportés**, ou non, en plaine (Clermont-Ferrand, 350 m altitude). Ces deux sites étant distants de 20 km seulement, leurs climats sont proches mais le site de plaine est plus chaud (+3,5°C) et plus sec que le site de moyenne montagne. Dans le site de plaine, l'irrigation est contrôlée de manière à obtenir des apports d'eau mensuels égaux aux précipitations du site de montagne, ou réduits de 20 % en été. Enfin, les monolithes sont exposés, ou non, à un enrichissement en CO₂ de 200 ppm. On peut ainsi **comparer le scénario climatique 2050 au climat actuel de la moyenne montagne**. De plus, ce dispositif permet d'analyser les effets de chaque facteur (réchauffement, réduction de la pluviométrie et enrichissement en CO₂). Au bout de 4 ans, même sous CO₂ élevé, **la production annuelle de la prairie permanente de moyenne montagne a été significativement réduite** par une exposition aux conditions climatiques correspondant à un scénario climatique tendanciel (scénario A2) pour les années 2070 (CANTAREL *et al.*, 2013).

Ces expériences montrent que la diversité, la productivité et la composition botanique des prairies tempérées seront affectées par la hausse actuelle des concentrations atmosphériques en CO₂ et des températures et que **les principes de la gestion des prairies** (fertilisation, fréquence des coupes, pâturage...) **devront être adaptés au changement climatique** (HOPKINS et DEL PRADO, 2007).

■ Impacts d'une variabilité climatique accrue sur la prairie

La hausse anticipée de la variabilité climatique aura tendance à être associée à des conditions météorologiques plus extrêmes (IPCC, 2007a), conduisant à des risques de dommages pour l'agriculture qui n'ont pas encore été assez explorés (TUBIELLO *et al.*, 2007 ; SOUSSANA *et al.*, 2010). D'ici à la fin du siècle des vagues de chaleur 10 fois plus fréquentes qu'à notre époque sont anticipées et les sécheresses devraient être plus fortes et plus intenses. En revanche, la fréquence de retour d'épisodes de précipitations intenses ne devrait pas varier significativement (IPCC, 2012).

Dans ce contexte, le projet ANR VALIDATE a eu pour objectif de comprendre les impacts de la variabilité future du climat sur les prairies et les élevages herbagers et de tester des pistes d'adaptation. Nous avons utilisé des scénarios climatiques régionalisés reproduisant la variabilité des précipitations et des températures et son évolution au cours du siècle. La vulnérabilité des élevages herbagers

a été étudiée à partir de ces scénarios climatiques, en combinant plusieurs approches : expérimentation, modélisation biotechnique et modélisation socio-économique.

Les conséquences pour l'environnement (émissions nettes de gaz à effet de serre, recharge des nappes, qualité de l'eau) et pour la biodiversité (diversité floristique, diversité microbienne des sols) des prairies ont également été évaluées. Enfin, des pistes d'adaptation ont été testées à trois échelles complémentaires : conduite agronomique de la prairie, conduite des troupeaux et adaptation des systèmes d'élevage.

• Deux expériences pour tester l'impact d'extrêmes climatiques

Afin de réduire les incertitudes concernant les impacts de futures vagues de chaleur et de sécheresse, combinées à un réchauffement de quelques degrés et à une forte augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂, nous avons développé 2 expériences complémentaires :

- **L'exposition de prairies** (situées le long d'un gradient climatique, sur 4 sites : Alpes, Ouest, Massif central et Méditerranée) **à un réchauffement à l'air libre et à des sécheresses et canicules** obtenues par une combinaison d'exclusion de la pluie et de réchauffement infrarouge. Cette expérience a été réalisée **en CO₂ ambiant**.

Les prairies permanentes de moyenne montagne (Theix) ont montré une **résilience à l'extrême climatique** (sécheresse et chaleur) **plus élevée sous climat futur que sous climat actuel**. Une **augmentation de la croissance des racines en profondeur** pourrait expliquer cette meilleure acclimatation. Une gestion extensive (coupes peu fréquentes) a favorisé la résilience à l'extrême climatique, tout en maintenant une production fourragère de bonne qualité. Grâce à une bonne résilience, la richesse spécifique de la flore n'a pas été affectée par l'extrême climatique, bien que les légumineuses aient été initialement plus sensibles au stress appliqué (ZWICKE *et al.*, 2013). En haute montagne (col du Lautaret), il semble que la résilience ait été plus forte qu'en moyenne montagne. En effet, malgré quelques réponses observées à l'échelle des plantes, les prairies permanentes subalpines se sont avérées résistantes aux manipulations climatiques estivales appliquées et ce, quel que soit le mode de gestion (une fauche estivale ou aucune fauche). Ces réponses sont à mettre en relation avec les traits fonctionnels de la graminée dominante (*Festuca paniculata*), qui constitue d'importantes réserves souterraines (BENOT *et al.*, 2011).

Pour des prairies temporaires de fétuque élevée et de dactyle, les résultats sont essentiellement expliqués par **l'intensité du déficit hydrique cumulé** et montrent que la variabilité intraspécifique de la résilience et de la résistance est supérieure à celle entre espèces. **Seules les variétés de graminées d'origine méditerranéenne ont survécu à des déficits hydriques très importants** qui pourraient être atteints à la fin du siècle. Toutefois, ces origines méditerranéennes sont **moins productives en année favorable** que les variétés d'origine tempérée (POI-

RIER *et al.*, 2012). Ce résultat a des conséquences importantes tant pour la conservation et la gestion des ressources biologiques que pour l'amélioration des plantes.

- L'exposition dans l'ECOTRON du CNRS à Montpellier d'une **prairie semi-naturelle de moyenne montagne** (Theix) **à la combinaison de sécheresses et canicules et d'augmentation du CO₂** atmosphérique représentative des projections pour les années 2070.

L'enrichissement en CO₂ de l'air a accéléré la récupération du fonctionnement de la prairie de moyenne montagne soumise à un scénario climatique plus chaud et plus sec. Cette meilleure récupération est liée à une très forte augmentation de la photosynthèse, à une meilleure économie de l'eau contribuant à augmenter la croissance foliaire des deux espèces de graminées étudiées, et à la croissance accrue des racines de la communauté végétale. **Le fonctionnement du sol est aussi affecté** puisque la décomposition des litières est ralentie. L'extrême estival appliqué a réduit les principaux flux de l'écosystème ; puis, lors de la phase de récupération, on a mis en évidence une activité physiologique des plantes et des microbes plus élevée, contribuant à augmenter la masse aérienne verte par rapport au témoin, soit une croissance compensatoire qui a également été observée pour le bilan de carbone (PICON-COCHARD, ROY *et al.*, en préparation).

• Modélisation des impacts d'extrêmes climatiques sur la prairie

Après une étape de développement, de calibration et d'évaluation par comparaison aux résultats de ces expériences, deux modèles ont été utilisés pour réaliser des projections agronomiques : PaSim, un modèle déterministe et largement mécaniste de l'écosystème prairial, et STICS, un modèle plus simple utilisé en mode opérationnel (projet ISOP) pour prévoir les impacts des sécheresses sur les prairies françaises.

Afin d'obtenir une gamme représentative de futurs climatiques pour une petite maille du territoire, ces modèles agronomiques ont été forcés par un ensemble de modèles climatiques et de méthodes de régionalisation du climat. Cette démarche « ensembliste » a été appliquée à des stations climatiques puis à l'ensemble du territoire sur une grille de maille 8x8 km. Une analyse probabiliste a été développée en prenant en compte, ou non, des adaptations simples de la gestion des prairies par les éleveurs. Les transformations des systèmes d'élevage en réponse au changement climatique ont, par ailleurs, été évaluées grâce à une approche participative avec des éleveurs (MARTIN *et al.*, 2011) et *via* une approche d'optimisation économique.

Plusieurs études de modélisation ont montré des **effets compensatoires des concentrations élevées de CO₂** et du changement climatique sur les prairies tempérées (PARTON *et al.*, 1995 ; RIEDO *et al.*, 1999). Avec des systèmes laitiers à base d'herbe, les simulations du scénario A1B (incluant l'augmentation du CO₂) pour un ensemble de modèles climatiques montrent d'ici la fin du siècle une augmentation de la production fourragère et de

la production de lait au printemps et à l'automne, mais avec des risques accrus de défaillances de la production estivale (GRAUX *et al.*, 2013).

Une analyse probabiliste du risque lié au changement climatique peut être développée (VAN OIJEN *et al.*, 2013). Avec cette approche, une **augmentation significative de l'exposition au risque de sécheresse estivale** a été confirmée pour des prairies françaises (GRAUX *et al.*, 2013). L'augmentation de la variabilité interannuelle et saisonnière de la production des prairies entraîne une réduction en dessous du tiers de la valeur médiane actuelle pour 4 ans sur 30 à la fin du siècle, alors que des déficits similaires n'ont pas été observés avec le climat de référence (GRAUX *et al.*, 2013).

Les principaux résultats du projet VALIDATE indiquent donc que la production (quantité et qualité) de **la prairie est plus affectée par l'augmentation de la variabilité climatique** (épisodes de sécheresse et de chaleur) **que par un réchauffement moyen** de quelques degrés. Les légumineuses fixatrices d'azote et les graminées de bonne qualité fourragère ont été les plus sensibles ; **les plantes à réserves** (pivots, rhizomes) **et les variétés méditerranéennes**, déjà adaptées, **ont été les plus résilientes**. Une baisse de la fréquence d'exploitation de la prairie a renforcé sa résilience. Les résultats expérimentaux du projet soulignent également des conséquences négatives pour l'environnement : le réchauffement a entraîné une dégradation du bilan de GES de la prairie et la quantité d'eau drainée vers la nappe a été fortement réduite. Toutefois, l'augmentation du CO₂ atmosphérique a limité ces effets négatifs.

La modélisation illustre les risques et les opportunités pour les élevages herbagers français : risque élevé de chute de la production à l'herbe de lait et de viande durant la période estivale ; en revanche, nette augmentation du potentiel de production aux autres saisons (GRAUX *et al.*, 2012, 2013). La démarche participative a abouti à des propositions de transformations des systèmes d'élevage (MARTIN *et al.*, 2011).

Conclusion

La recherche sur les interactions entre le changement climatique et les prairies a connu une expansion rapide au cours de ces dernières années, mais il reste encore beaucoup à faire pour améliorer notre capacité à anticiper les changements à venir et mettre au point des mesures d'adaptation et d'atténuation concernant les prairies et les élevages. Cette tâche est rendue plus difficile par la variabilité du climat, par les incertitudes sur son évolution locale, par la complexité des interactions entre climat, végétation, sols et herbivores. Il importe donc de renforcer les capacités adaptatives des acteurs en élaborant des indicateurs et des outils d'aide à la décision.

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.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AESCHLIMANN U., NÖSBERGER J., EDWARDS P.J., SCHNEIDER M.K., RICHTER M., BLUM H. (2005) : "Responses of net ecosystem CO₂ exchange in managed grassland to longterm CO₂ enrichment, N fertilization and plant species", *Plant, Cell and Environment*, 28, 823-833.
- AINSWORTH E.A., LONG S.P. (2005) : "What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis", *New Phytologist*, 165, 351-371.
- AINSWORTH E.A., DAVEY P.A., HYMUS G.J., OSBORNE C.P., ROGERS A., BLUM H., NÖSBERGER J., LONG S.P. (2003) : "Is stimulation of leaf photosynthesis by elevated carbon dioxide concentration maintained in the long term? A test with *Lolium perenne* grown for ten years at two nitrogen fertilization levels under Free Air CO₂ Enrichment (FACE)", *Plant, Cell and Environment*, 26, 705-714.
- BATTISTI D.S., NAYLOR R.L. (2009) : "Historical warnings of future food insecurity with unprecedented seasonal heat", *Science*, 323, 240-244.
- BENOT M.L., SACCONI P., VICENTE R., PAUTRAT E., MORVAN-BERTRAND A., DECAU M.L., GRIGULIS K., PRUD'HOMME M.P., LAVOREL S. (2011) : "Management vs climate change: do they both represent a threat to subalpine grasslands? A test on the dominant grass *Festuca paniculata*", *12th EEF Congress*, Avila (Espagne), 25-29 septembre 2011.
- CAMPBELL B.D., STAFFORD-SMITH D.M., ASH A.J., FUHRER J., GIFFORD R.M., HIERNAUX P., HOWDEN S.M., JONES M.B., LUDWIG J.A., MANDERSCHIED R., MORGAN J.A., NEWTON P.C.D., NÖSBERGER J., OWENBY C.E., SOUSSANA J.F., TUBA Z., ZUCCHONG C. (2000) : "A synthesis of recent global change research on pasture and rangeland production: reduced uncertainties and their management implications", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 82, 39-55.
- 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. Vegetation Sci.*, 24, 113-126.
- CASELLA E., SOUSSANA J.F. (1997) : "Long-term effect of CO₂ enrichment and temperature increase on the carbon balance of a temperate grass sward", *J. Exp. Botany*, 48, 1309-1321.
- CASELLA E., SOUSSANA J.F., LOISEAU P. (1996) : "Long-term effects of CO₂ enrichment and temperature increase on a temperate grass sward. I. Productivity and water use", *Plant and Soil*, 182, 83-99.
- CIAIS P., REICHSTEIN M., VIOVY *et al.* (2005) : "Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003", *Nature*, 437, 529-533.
- COUMOU D., RAHMSTORF S. (2012) : "A decade of weather extremes", *Nature Climate Change*, 2, 491-496.
- ELLSWORTH D.S., REICH P.B., NAUMBURG E.S., KOCH G.W., KUBISKE M.E., SMITH S.D. (2004) : "Photosynthesis, carboxylation and leaf nitrogen responses of 16 species to elevated pCO₂ across four free-air CO₂ enrichment experiments in forest, grassland and desert", *Global Change Biology*, 10, 2121-2138.
- FAO (2010) : "*Climate-smart agriculture: policies, practices and financing for food security, Adaptation and mitigation*", FAO, Rome.
- GRAUX A.I., R. LARDY, G. BELLOCCHI, J.F. SOUSSANA (2012) : "Global warming potential of French grassland-based dairy livestock systems under climate change", *Regional Environmental Change*, 12, 751-763.
- GRAUX A.I., BELLOCCHI G., LARDY R., SOUSSANA J.F. (2013) : "Ensemble modelling of climate change risks and opportunities for managed grasslands in France", *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 114-131.
- HARMENS H., WILLIAMS P.D., PETERS S.L., BAMBRICK M.T., HOPKINS A., ASHENDEN T.W. (2004) : "Impacts of elevated atmospheric CO₂ and temperature on plant community structure of a temperate grassland are modulated by cutting frequency", *Grass and Forage Sci.*, 59, 144-156.

- HOPKINS A., DEL PRADO A. (2007) : "Implications of climate change for grassland in Europe: impacts, adaptations and mitigation options: a review", *Grass and Forage Sci.*, 62, 118-126.
- IPCC (2007a) : *Climate change 2007: the scientific basis. Contribution of Working Group I to the third assessment report of the IPCC*, Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC (2007b) : *Climate change: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the fourth Assessment Report of the IPCC*, Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC (2012) : *Special report on managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation (SREX)*, Field C.B. edit., Cambridge University Press.
- KIMBALL B.A., KOBAYASHI K., BINDI M. (2002) : "Responses of agricultural crops to free-air CO₂ enrichment", *Advances in Agronomy*, 77, 293-368.
- LOBELL B., SCHLENKER W., COSTA-ROBERTS J. (2011) : "Climate trends and global crop production since 1980", *Science*, 333, 616-620.
- LOISEAU P., SOUSSANA J.F. (2000) : "Effects of elevated CO₂, temperature and N fertilization on nitrogen fluxes in a temperate grassland ecosystem", *Global Change Biology*, 6, 953-965.
- LÜSCHER A., AESCHLIMANN U. (2006) : "Effects of elevated [CO₂] and N fertilisation on interspecific interactions in temperate grassland model ecosystems", *Managed ecosystems and CO₂: case studies, processes, and perspectives*, Nösberger J., Long S.P., Norby R.J., Stitt M., Hendrey G.R., Blum H. eds, Berlin (Germany), Springer, 337-348.
- LÜSCHER A., HEBEISEN T., ZANETTI S., HARTWIG U.A., BLUM H., HENDREY G.R., NÖSBERGER J. (1996) : "Differences between legumes and non-legumes of permanent grassland in their responses to free-air carbon dioxide enrichment: its effect on competition in a multispecies mixture", *Carbon dioxide, populations and communities*, Körner C., Bazzaz F. eds, San Diego, CA, USA: Academic Press, 287-300.
- LÜTHI D., LE FLOCH M., BEREITER B. et al. (2008) : "High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present", *Nature*, 453, 379-382.
- MARCOTT S.A., SHAKUN J.D., CLARK P.U. et al. (2013) : "A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years", *Science*, 339, 1198-1201.
- MARTIN G., FELTEN B., DURU M. (2011) : "Forage rummy: A game to support the participatory design of adapted livestock systems", *Environmental Modelling and Software*, 26, 1442-1453.
- NOWAK R.S., ELLSWORTH D.S., SMITH S.D. (2004) : "Functional responses of plants to elevated atmospheric CO₂ do photosynthetic and productivity data from FACE experiments support early predictions?", *New Phytologist*, 162, 253-280.
- VAN OIJEN M., BEER C., CRAMER W., RAMMIG A., REICHSTEIN M., ROLINSKI S., SOUSSANA J.F. (2013) : "A novel probabilistic risk analysis to determine the vulnerability of ecosystems to extreme climatic events", *Env. Research Letters*, 8 (1), article number 015032 .
- PARTON W.J., SCURLOCK J.M.O., OJIMA D.S., SCHIMEL D.S., HALL D.O. et al. (1995) : "Impact of climate change on grassland production and soil carbon worldwide", *Global Change Biology*, 1, 1, 13-22.
- PELLERIN S., BAMIÈRE L., ANGERS D., BÉLINE F. et al. (2013) : *Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ?*, INRA (France), 92 p.
- PICON-COCHARD P., TEYSSONNEYRE F., BESLE J.M., SOUSSANA J.F. (2004) : "Effects of elevated CO₂ and cutting frequency on the productivity and herbage quality of a semi-natural grassland", *Europ. J. Agronomy*, 20, 363-377.
- POIRIER M., DURAND J., VOLAIRE F. (2012) : "Persistence and production of perennial grasses under water deficits and extreme temperatures: importance of intraspecific vs. interspecific variability", *Global Change Biology*, 18, 3632-3646.
- REICH P.B., KNOPS J., TILMAN D., CRAINE J., ELLSWORTH D., TJOELKER M., LEE T., WEDIN D., NAEEM S., BAHAUDDIN D., HENDREY G., JOSE S., WRAGE K., GOTH J., BENGSTON W. (2001) : "Plant diversity enhances ecosystem responses to elevated CO₂ and nitrogen deposition", *Nature*, 410, 809-812.
- RIEDO M., GYALISTRAS D., FISCHLIN A., FUHRER J. (1999) : "Using an ecosystem model linked with GCM-derived local weather scenarios to analyse effects of climate change and elevated CO₂ on dry matter production and partitioning, and water use in temperate managed grasslands", *Global Change Biol.*, 5, 213-223.
- ROCKSTRÖM J. et al. (2009) : "A safe operating space for humanity", *Nature*, 461, 472-475.
- ROSS D.J., NEWTON P.C.D., TATE K.R. (2004) : "Elevated [CO₂] effects on herbage production and soil carbon and nitrogen pools and mineralization in a species-rich, grazed pasture on a seasonally dry sand", *Plant and Soil*, 260, 183-196.
- SCHNEIDER M.K., LÜSCHER A., RICHTER M., AESCHLIMANN U., HARTWIG U.A., BLUM H., FROSSARD E., NÖSBERGER J. (2004) : "Ten years of free-air CO₂ enrichment altered the mobilization of N from soil in *Lolium perenne* L. swards", *Global Change Biology*, 10, 1377-1388.
- SOUSSANA J.F., HARTWIG U.A. (1996) : "The effects of elevated CO₂ on symbiotic N₂ fixation: a link between the carbon and nitrogen cycles in grassland ecosystems", *Plant and Soil*, 187, 321-332.
- SOUSSANA J.F., CASELLA E., LOISEAU P. (1996) : "Long-term effects of CO₂ enrichment and temperature increase on a temperate grass sward. II. Plant nitrogen budgets and root fraction", *Plant and Soil*, 182, 101-114.
- SOUSSANA J.F., GRAUX A.I., TUBIELLO F.N. (2010) : "Improving the use of modelling for projections of climate change impacts on crops and pastures", *J. Exp. Botany*, 61, 2217-2228.
- SOUSSANA J.F., FERERES E., LONG S.P., MOHREN F.G., PANDYA-LORCH R., PELTONEN-SAINIO P., PORTER J.R. et al. (2012) : "A European science plan to sustainably increase food security under climate change", *Global Change Biology*, 18 (11), 3269-3271.
- SOUSSANA J.F. et al. (2013) : *S'adapter au changement climatique. Agriculture, écosystèmes et territoires*, Quae éd., Versailles, 273 p (sous presse).
- STERN N. (2006) : *Stern Review on The Economics of Climate Change. Executive Summary*, HM Treasury, London.
- STOCKER T.F. (2013) : "The Closing Door of Climate Targets", *Science*, 339, 280-282.
- TEYSSONNEYRE F., PICON-COCHARD C., FALCIMAGNE R., SOUSSANA J.F. (2002) : "Effects of elevated CO₂ and cutting frequency on plant community structure in a temperate grassland", *Global Change Biology*, 8, 1034-1046.
- THORNLEY J.H.M., CANNELL M.G.R. (2000) : "Dynamics of mineral N availability in grassland ecosystems under increased [CO₂]: hypotheses evaluated using the Hurley Pasture Model", *Plant and Soil*, 224, 153-170.
- TUBIELLO F.N., SOUSSANA J.F., HOWDEN S.M. (2007) : "Crop and pasture response to climate change", *PNAS*, 104, 50, 19686-19690.
- ZAVALETA E.S., SHAW M.R., CHIARIELLO N.R., THOMAS B.D., CLELAND E.E., FIELD C.B., MOONEY H.A. (2003) : "Additive effects of simulated climate changes, elevated CO₂, and nitrogen deposition on grassland diversity", *PNAS*, 100, 7650-7654.
- ZWICKE M., ALESSIO G., 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 Biology* (sous presse).



Association Française pour la Production Fourragère

La revue *Fourrages*

est éditée par l'Association Française pour la Production Fourragère

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

Association Française pour la Production Fourragère