

Conséquences possibles des changements climatiques sur la production fourragère en France.

I. Estimation par modélisation et analyse critique

F. Ruget¹, P. Clastre¹, J.-C. Moreau², E. Cloppet³,
F. Souverain³, B. Lacroix⁴, J. Lorgeou⁵

Les changements climatiques présentent des risques mais aussi des atouts pour la production fourragère. Les résultats d'un modèle de climat appliqué à différents scénarios d'évolution économique mondiale et à différentes échéances temporelles apportent des éléments de réflexion.

RÉSUMÉ

Les changements climatiques, maintenant certains, agissent non seulement sur les niveaux des productions de ressources fourragères, mais aussi sur leurs calendriers. Les résultats de modèles de climat de Météo-France (Arpege), sous divers scénarios d'évolution économique mondiale, ont permis d'alimenter le modèle de culture STICS, dans le cadre d'une étude nommée ACTA-CC. L'utilisation de STICS, combinée à une bonne connaissance des pratiques présentes et possibles, montre les évolutions possibles des productions de graminées fourragères, maïs et luzerne à différentes échéances temporelles du XXI^e siècle dans les principales régions fourragères françaises. Méthodes et résultats sont discutés. Un second article appliquera ces évolutions à différents ateliers de production animale.

SUMMARY

Possible consequences of climate changes on forage production in France. I. Estimation based on modelization and critical analysis

Climate changes carries a risk but also an advantage for forage production, it influences both forage production levels and forage calendar. The results of a single climate model (Arpege) applied to different scenarios of global economic growth, have helped develop the STIC crop model (ACTA-CC project). This model, combined with a thorough knowledge of present and possible practices, provides useful information. For instance, it can help determine possible changes affecting forage grass, maize and alfalfa crops in the main French forage production regions over determined periods of time in the future (21st century). Methods and results are discussed. A second study will apply these scenarios to different types of animal production.

Le but de cet article est de montrer quelles peuvent être les évolutions de production fourragère dans le futur en introduisant les climats prédits par un modèle météorologique dans un modèle de culture. Les modèles choisis sont le modèle Arpege du CNRM à Météo-France et le modèle STICS de l'INRA. Pour essayer de chiffrer les incertitudes liées à l'utilisation des modèles climatiques, l'étude porte sur 2 échéances temporelles,

avec 2 scénarios d'émission de gaz à effet de serre, c'est-à-dire 2 schémas de développement économique. Pour évaluer les incertitudes liées au modèle de culture, diverses options de pratiques, de type de sol et d'effet du CO₂ sont testées. Dans l'analyse, une importance particulière est donnée à l'évolution temporelle des réponses ainsi qu'à leur variation géographique.

AUTEURS

1 : INRA, UMR1114 EMMAH, F-84914 Avignon cedex 9 ; ruget@avignon.inra.fr

2 : Institut de l'Élevage

3 : Division d'Agrométéorologie du département Services Météo-France

4 : ARVALIS - Institut du végétal

MOTS CLÉS : Changement climatique, dioxyde de carbone, eau du sol, France, graminée, luzerne, maïs, mode d'exploitation, modèle de croissance, prairie, prévision, production fourragère, variations interannuelles, variations saisonnières.

KEY-WORDS : Carbon dioxide, climatic change, forage production, forecast, France, grass, grassland, growth model, inter-annual variations, lucerne, maize, seasonal variations, soil water, type of management.

RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE : Ruget F., Clastre P., Moreau J.-C., Cloppet E., Souverain F., Lacroix B., Lorgeou J. (2012) : "Conséquences possibles des changements climatiques sur la production fourragère en France. I- Estimation par modélisation et analyse critique", *Fourrages*, 210, 87-98.

1. Étude des effets de changements climatiques : quels outils ?

■ Les scénarios d'évolution économique et environnementale

Les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (en anglais : SRES, *Special Report on Emissions Scenarios*) formalisent plusieurs hypothèses d'évolution des sociétés humaines (population, mode de consommation) sur l'ensemble de la Terre pour les traduire en évolution des quantités de gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère. Ces informations renseignent les modèles météorologiques de circulation générale (en anglais : GCM, *General Circulation Model*) sur l'état de l'atmosphère, en particulier leur teneur en gaz à effet de serre permettant d'estimer l'évolution possible du climat.

L'évolution possible de l'activité humaine sur la Terre a été schématisée en deux types de processus (IPCC, 2000) : le développement économique et la durabilité environnementale qui, eux-mêmes, peuvent être homogènes à l'échelle mondiale ou seulement à l'échelle des grandes régions du monde (tableau 1). Ces deux familles d'hypothèses combinées, économie mondialisée (1) ou régionalisée (2) et priorité au développement économique (A) ou à la durabilité environnementale (B), donnent quatre familles de scénarios (A1, A2, B1, B2) qui correspondent à des émissions différentes de gaz à effet de serre, donc des réchauffements probables différents (GIEC, 2007). Nous avons utilisé les scénarios B1 et A2, c'est-à-dire ceux dont les émissions sont les plus différentes, B1 ayant les émissions les plus faibles et A2 les plus fortes.

■ Les modèles d'estimation du climat futur

• Principe et choix du modèle de circulation générale

Pour prévoir l'évolution du climat, on utilise des **modèles de circulation générale** qui fonctionnent à l'échelle mondiale. Le volume des calculs nécessaires fait que la résolution est trop petite pour qu'on puisse les utiliser de façon fiable dans une petite zone comme

l'intérieur de la France. On utilise donc des méthodes dites « de désagrégation », qui permettent d'obtenir une résolution plus fine. Les méthodes possibles sont multiples (GIORGI, 2008). Dans le cas présenté ici, nous utilisons les sorties du modèle Arpege-Climat de Météo-France (DÉGUÉ *et al.*, 1994). **Deux désagrégations successives** ont été emboîtées : d'abord, la maille du modèle mondial a été étirée sur l'Europe et la Méditerranée pour obtenir une maille de 50 km de côté sur la France ; ensuite, pour se rapprocher des séries climatiques présentes, on a utilisé la méthode des écarts ou **méthode des anomalies** (rapport pour les précipitations ; différence pour les autres variables climatiques), utilisée par les auteurs des simulations eux-mêmes (DÉGUÉ, 2007, *Delta method*). L'écart entre les données simulées dans le présent et le futur est ajouté aux données réelles (DÉGUÉ, 2007). Cela implique de choisir des stations à simuler où il y ait une bonne proximité entre point de grille (climat simulé) et station réelle. Ces appariements ont été faits selon la distance géographique et en associant des stations d'altitudes voisines. La méthode des anomalies a l'intérêt de créer un climat dont les différences avec le climat actuel sont explicites. Elle a le défaut de conserver la variabilité climatique présente dans le futur. Elle permet des comparaisons raisonnables de production dans le présent et le futur (GONZALEZ-CAMACHO *et al.*, 2008).

• Scénarios climatiques et données climatiques locales

A cause de l'intérêt de la connaissance du futur proche pour réfléchir à des adaptations des systèmes de production, nous avons choisi de travailler sur **deux périodes de 30 ans, l'une lointaine (L), de 2070 à 2100, l'autre proche (P), de 2020 à 2050**, malgré la moindre fiabilité de l'estimation du changement climatique dans le futur proche, annoncée par les climatologues (DÉGUÉ, 2007).

Les anomalies sont calculées pour chaque jour calendrier comme la moyenne des anomalies sur l'ensemble des années, mais aussi sur les 30 jours encadrant la date dont on veut estimer l'anomalie, de façon à éviter des irrégularités ou des sauts brusques dans les anomalies. De ce fait, on ignore l'évolution du climat au cours de

| | Objectifs plus économiques | Objectifs plus environnementaux |
|-------------------------------------|--|-------------------------------------|
| Globalisation | Scénario A1 | Scénario B1 |
| Monde homogène | Croissance économique rapide (trois groupes: A1T/A1B/A1FI) | Durabilité environnementale globale |
| Augmentation moyenne de température | 1,4 - 6,4 °C | 1,1 - 2,9 °C |
| Régionalisation (continent) | Scénario A2 | Scénario B2 |
| Monde hétérogène | Développement économique avec une orientation régionale | Durabilité environnementale locale |
| Augmentation moyenne de température | 2,0 - 5,4 °C | 1,4 - 3,8 °C |

TABLEAU 1 : **Scénarios d'évolution économique mondiale et variations attendues de la température moyenne au niveau du globe en fonction de 4 scénarios** (GIEC, 2007).

TABLE 1 : Scenario of global economic growth and expected changes in mean temperatures on the globe, based on 4 different scenarios (GIEC, 2007).

| Scénario | Futur proche 2020-2050 | | Futur lointain 2070-2100 | |
|--------------------|---------------------------|-----|-----------------------------|-----|
| | B1 | A2 | B1 | A2 |
| Début | 410 | 414 | 518 | 620 |
| Fin | 482 | 522 | 540 | 836 |
| Moyenne sur 27 ans | 441 | 458 | 532 | 709 |

TABLEAU 2 : Teneurs en CO₂ (ppm) de l'atmosphère correspondant aux scénarios utilisés, introduites dans les modèles de circulation générale et de culture.

TABLE 2 : CO₂ levels (ppm) in the atmosphere based on applied scenarios, introduced into the general circulation and agricultural models.

chacune des périodes ; on ignore également l'évolution de la teneur en CO₂ en utilisant la teneur moyenne de la période (tableau 2). Les années de chaque période sont donc considérées comme des répétitions simples.

En raison de la période de réalisation du projet (à partir de 2007), nous avons utilisé, comme base des séries futures, des **séries réelles de 27 années observées** (1980-2006) seulement, ce qui crée des séries futures de 27 années également. Les résultats concernant les productions sont toujours présentés en moyenne sur ces 27 années.

Les résultats sur le climat sont présentés avec les données brutes pour les 235 points de grille d'Arpege sur la zone métropolitaine, tandis que les **simulations de cultures**, réalisées avec des séries climatiques construites par la méthode des anomalies à partir des séries observées, sont faites **sur 34 stations réelles** choisies pour représenter les grandes zones d'élevage et de production de grandes cultures. Dans le futur proche, les teneurs en gaz à effet de serre étant peu différentes, les climats obtenus par le GCM Arpege sont assez semblables. Nous ne présenterons donc que des résultats correspondant aux scénarios A2P, A2L et B1L (aucun résultat du scénario B1P).

■ Le modèle de culture STICS. Pertinence de son utilisation

Pour estimer des productions, le modèle de culture utilisé est STICS (BRISSON *et al.*, 1998). Les fonctions nécessaires pour représenter les processus spécifiques au changement climatique que sont l'augmentation de la teneur en CO₂ et la diminution de la résistance stomatique sont présentes dans STICS (RUGET et BRISSON, 2007 ; BRISSON *et al.*, 2009) ; leur paramétrage a été contrôlé, dans la mesure du possible (COLLECTIF, 2009). Le chapitre suivant explique de façon détaillée les processus et leur prise en compte dans le modèle. Les paramètres utilisés pour la prairie ont été obtenus sur des parcelles de graminées et des prairies permanentes (RUGET *et al.*, 2006) - nous la nommerons « prairie de graminées » ou « graminées » -, ceux de la luzerne ont été calibrés par ABDESSEMED (2007) et RUGET (2009).

2. Fonctions physiologiques affectées par le changement climatique et représentations dans le modèle STICS

■ Les effets du CO₂ sur le climat et sur les plantes

Les principaux facteurs climatiques affectés par le changement climatique (lui-même provoqué par l'augmentation des gaz à effet de serre, dont le CO₂) sont la température et les précipitations. Les autres événements climatiques attendus, qualifiés d'extrêmes à cause de leur rareté et de leur intensité (pluies violentes, tempêtes, vagues de chaleur, sécheresses), ne sont pas abordés dans cette étude.

Bien que température et bilan hydrique soient classiquement à la base du fonctionnement des cultures et des modèles, **un point nouveau important est que le changement climatique annoncé déplace vers le haut la gamme des températures, rend plus fréquentes des températures très élevées et fait apparaître des sécheresses plus fortes et plus durables**. Les gammes de températures et de sécheresses prévues pour les zones tempérées au XXI^e siècle avaient peu été étudiées jusqu'à la fin du XX^e siècle - c'est-à-dire jusqu'à ce que le changement climatique soit vraiment reconnu par tous - puisqu'elles ne correspondaient pas aux conditions habituelles des cultures.

Pour ce qui est du CO₂ lui-même, les travaux sont assez nombreux depuis les années 70, parce que le CO₂ a été un outil important de la compréhension des mécanismes de la photosynthèse. Ce sont des chercheurs spécialisés sur la photosynthèse qui ont le plus travaillé sur la caractérisation et l'analyse des effets du CO₂, en s'intéressant essentiellement aux échanges gazeux de la plante, donc à la fixation de CO₂ et à la transpiration. L'effet principal et reconnu de **l'augmentation de la teneur en CO₂** consiste en une **fermeture stomatique**, donc une **diminution de la transpiration** et une **augmentation de l'assimilation de carbone, donc de la croissance primaire**.

Les effets sur les autres fonctions des plantes (phénologie et morphogenèse, pilotant les fonctions de développement et de répartition entre organes dans les modèles) ont été peu étudiés, essentiellement en raison de la difficulté et du coût de mise en place d'un enrichissement artificiel de l'atmosphère en CO₂ pour des plantes entières, bien que la question ait été posée précocement (MOUSSEAU et ENOCH, 1989 ; MOUSSEAU et SAUGIER, 1992).

Ces questions sont débattues actuellement, particulièrement au sein de méta-analyses assez nombreuses, sans que des accords nets se dégagent, hormis une certaine prudence par rapport à l'ampleur et à la pérennité des effets positifs du CO₂ : à long terme les stomates pourraient s'adapter, ce qui ferait perdre aux plantes le bénéfice de l'augmentation de CO₂.

En résumé, le sens des effets du CO₂ sur la restriction de transpiration et l'augmentation de production est

certain et les effets seront positifs. **Ce qui est moins sûr, c'est l'ampleur des effets** : au pire, les effets positifs seront imperceptibles ; c'est pourquoi nous présenterons un exemple des effets, sur la production, i) des changements des variables climatiques seules, puis ii) du cumul avec l'effet du CO₂, de façon à illustrer la gamme d'incertitude représentée par le manque de connaissances sur les effets du CO₂.

■ Prise en compte dans le modèle STICS

Le modèle STICS, construit à la fin des années 90, évolue régulièrement depuis pour introduire de nouveaux formalismes ; il permet de simuler les besoins en eau et en azote des cultures et leur production, y compris en conditions de manque d'eau ou d'azote. Le déroulement de la culture s'appuie sur un calendrier phénologique simple mais important pour les cultures à organes de stockage comme les grains (remplissage). Les grandes cultures et les fourrages (graminées, luzerne) peuvent être représentés, ce qui permet d'étudier le comportement des principales cultures présentes dans une exploitation d'élevage. Jusqu'à présent, les conditions de test et d'application du modèle étaient tempérées avec un niveau de stress faible. Le changement climatique conduit à observer et reproduire des conditions plus stressantes en température (températures plus élevées), en eau (stress plus forts et plus fréquents), ainsi qu'à introduire l'effet de la teneur en CO₂ de l'atmosphère sur les échanges gazeux (eau et CO₂).

• Températures élevées : introduction de seuils hauts pour tous les processus

Les seuils de température agissent sur le développement, la croissance des feuilles (et des racines) et la production de biomasse (RUGET et BRISSON, 2007). Ces seuils, appliqués aux températures moyennes journalières, ont une valeur optimale et une valeur létale au-delà desquelles les fonctions sont ralenties puis bloquées ; les valeurs - seuils hautes prémunissent contre un risque d'augmentation de production inconsidéré à des gammes de températures élevées, généralement défavorables et rarement testées jusqu'à présent. La fixation symbiotique de l'azote est limitée par la sécheresse du sol et par les températures élevées. Le remplissage des grains est bloqué chaque jour où la température maximale dépasse un seuil. La valeur de ce seuil a été revue, pour le maïs, même si les informations précises manquent pour attribuer des valeurs de façon très rigoureuse.

• Sécheresse forte : introduction de la mortalité de plantes

Le phénomène de mortalité de plantes est apparu dans les couverts prairiaux, alors qu'il n'était observé jusqu'à présent qu'en conditions méditerranéennes. Cela a conduit à la construction d'un nouveau module qui permet de reproduire les évolutions de densité de couvert liées à la mortalité - provoquée par la sécheresse - et à la reconstitution du couvert, variable selon son état de dégradation. Ce module, en cours de test lors de l'étude, n'a pas été utilisé.

• ETP : effet du CO₂ sur la transpiration et la production primaire

Le point le plus novateur a été d'introduire l'effet du CO₂ sur la résistance stomatique permettant de simuler l'augmentation de la fixation de CO₂ et la diminution de la transpiration (cf. RUGET et BRISSON, 2007). Il s'agit de l'option « modèle résistif », par laquelle l'ETP n'est plus une valeur calculée au préalable et provenant du fichier météorologique mais calculée dans le modèle selon la décomposition des différentes résistances aux échanges gazeux de la feuille à l'atmosphère. Le nouveau formalisme introduit permet de simuler l'effet d'une teneur variable en CO₂ dans l'atmosphère pour les espèces de types C3 et C4 sur la transpiration et la production. En l'absence de connaissances confirmées, aucun effet du CO₂ sur le développement, c'est-à-dire sur les durées de stades phénologiques et les nombres d'organes différenciés, n'a été appliqué.

■ Choix des conditions de simulation

• Pratiques

Pour les cultures pérennes, à coupes (ou pâtures) et repousses, les dates des coupes sont décidées lorsqu'une somme de températures est atteinte (RUGET *et al.*, 2001) : cette méthode permet d'obtenir des dates de « coupes » adaptées à toutes les régions. Une coupe prévue n'est réalisée que si la matière sèche présente dépasse une quantité minimale, que l'on peut choisir. Ces hypothèses simples conduisent à une précocité plus grande des premières coupes et à une augmentation du nombre de coupes, lorsque le climat se réchauffe sans réduire la production. Cette méthode est une adaptation automatique des pratiques aux changements climatiques ; les décisions prises par les éleveurs lors du printemps chaud de 2011 en étaient l'illustration concrète.

Pour les prairies de graminées, les simulations ont été réalisées pour **plusieurs itinéraires techniques**, dont seulement deux sont présentés ici. L'un (ITK1), dit itinéraire « pâture », consiste en des utilisations fréquentes, la première à 300 °C.jour (après le premier février), puis les suivantes tous les 500 °C.jour avec une fertilisation de 50 kg N/ha le 20 février. Le second (ITK3) est de type fauche ; il présente une fauche pour ensilage à 650 °C.jour puis une fauche de foin 900 °C.jour plus tard, et ensuite des coupes tous les 650 °C.jour, avec une fertilisation en fin d'hiver (50 kg N/ha le 20 février) et une autre (50 kg) après la première coupe.

Pour la luzerne, parmi les 3 itinéraires simulés (coupes à intervalles réguliers, tous les 800, 500 ou 400 °C.jour), seuls seront présentés ceux de l'itinéraire avec coupes tous les 400 °C.jour.

Pour le maïs, les itinéraires techniques ont été adaptés au climat attendu par deux modifications simples des pratiques habituelles : choix de génotypes à durée de cycle plus longue de 2 groupes de précocité que les groupes actuellement employés et avance de la date

de semis de 2 semaines pour quelques stations du nord-ouest de la France, où le semis actuel est le plus tardif (1^{er} mai) par rapport à l'ensemble de la France, et 4 semaines ailleurs, où la date actuelle est le 15 avril. Des irrigations ont été appliquées ou non selon les pratiques actuelles autour des stations. Le déclenchement de l'irrigation est fait classiquement lorsque l'indice de stress (offre/demande) passe en-dessous de 0,8. La fertilisation azotée est fixée à une dose unique pour toutes les simulations (200 kg N/ha). Nous ne présentons ici que les résultats avec les itinéraires techniques adaptés et ceux du maïs ensilage, qui concernent directement l'alimentation des troupeaux.

• **Sols**

Pour les graminées et la luzerne, les simulations ont été effectuées sur deux sols qui diffèrent par leur profondeur et leur niveau de réserve utile (faible : 66 mm et forte : 208 mm), de façon à couvrir une large gamme de réserves, d'une valeur réaliste et probable à une valeur optimiste, réduisant le plus possible le stress hydrique par l'intermédiaire du sol. Pour le maïs, nous présentons les résultats des simulations sur sol profond.

• **Traitement et présentation des données**

Pour la présentation des données climatiques, les cartes sont interpolées, en raison de la présence de stations fictives nombreuses (centres des mailles Arpege), tandis que pour les productions, elles sont présentées par points (un point=une station), en fait par des diagrammes

bâtons des évolutions normalisées des productions. Les cartes présentent aux emplacements des stations des bâtons représentant les écarts de la production future à la production actuelle en pourcentage de la production actuelle estimée. Les dynamiques de production au cours de l'année sont calculées pour chaque jour comme les moyennes des productions journalières sur les 27 années du jeu de données.

3. Principaux changements du climat futur

Comment va varier le climat ? Les cartes (figure 1) illustrent les principaux changements climatiques prévus, dans le scénario A2 pour le futur lointain, au printemps et en été, où les changements sont les plus marqués (pour les autres saisons, cf. COLLECTIF, 2009).

Alors que, dans le futur proche (non illustré), le réchauffement moyen pour l'ensemble des stations françaises n'est jamais supérieur à 2 °C et seulement en été et en automne, il devient beaucoup plus marqué dans le futur lointain pour le scénario A2, en particulier en été, avec une accentuation particulière sur le pourtour nord et ouest du Massif central (figure 1a).

Du point de vue des précipitations, seules certaines régions du quart nord-ouest ont une diminution sensible dans le futur proche (non illustré), tandis que dans le futur lointain (scénario A2, figure 1b), les réductions sont plus importantes, présentes partout au printemps et surtout en été, avec une réduction très forte en Bretagne et en Normandie en été.

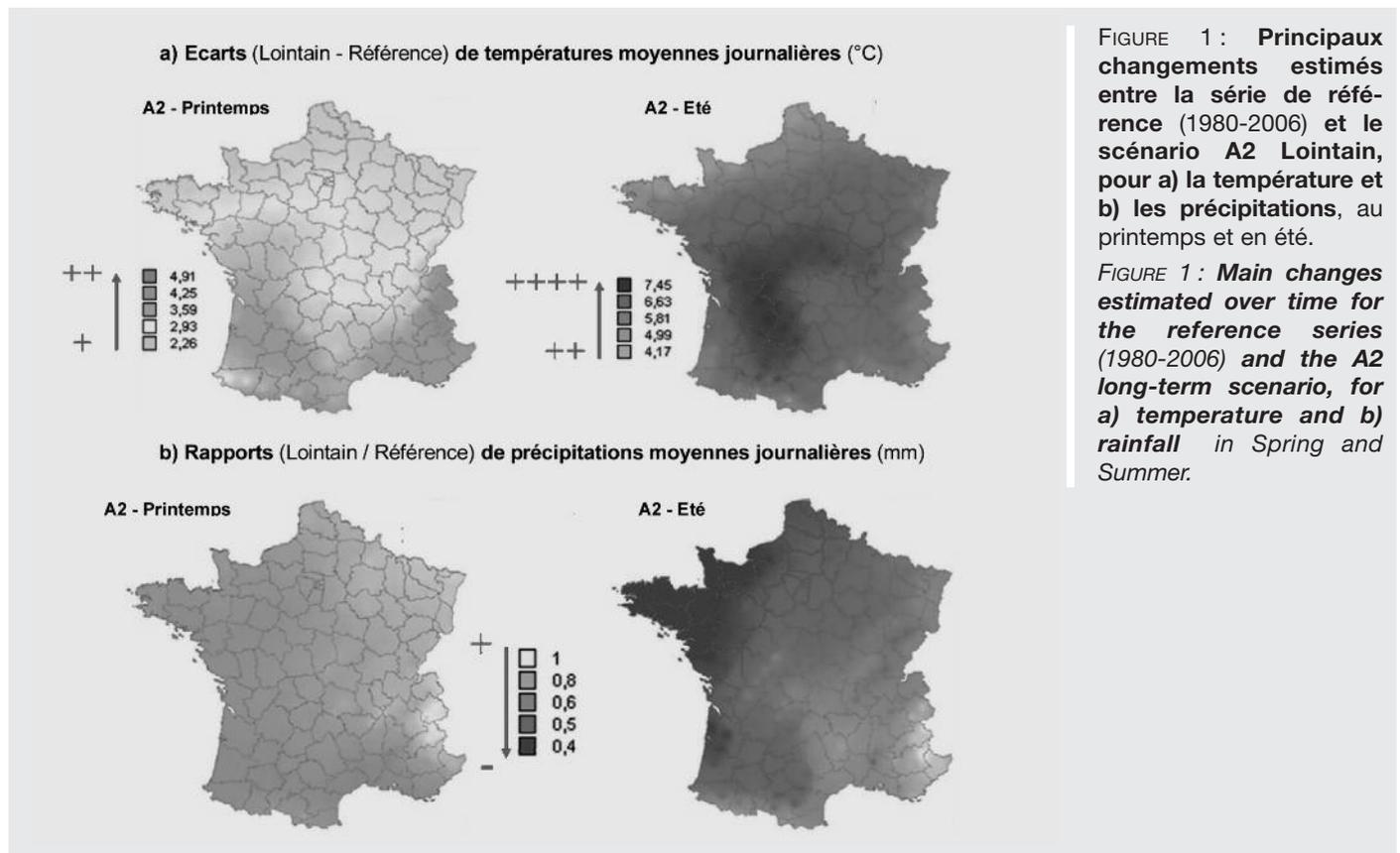
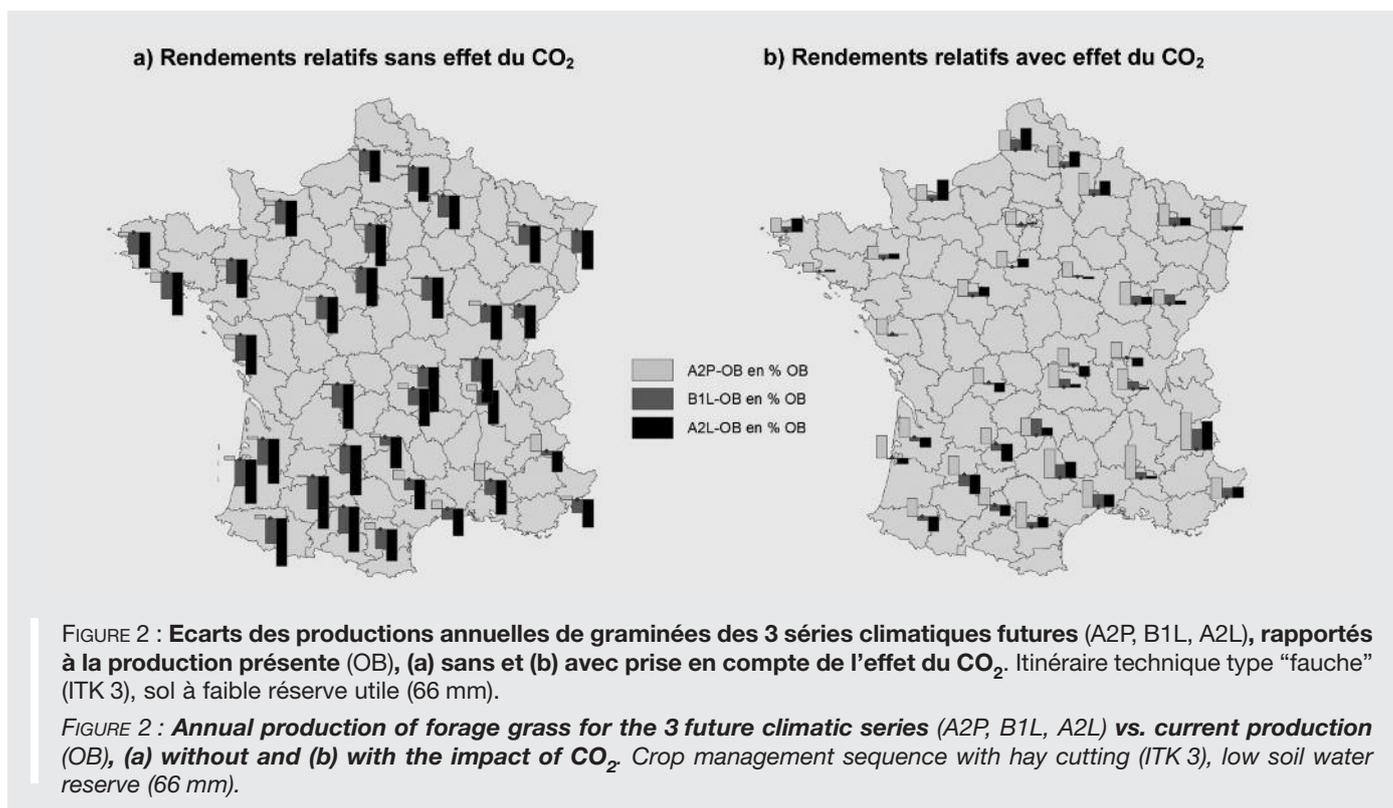


FIGURE 1: Principaux changements estimés entre la série de référence (1980-2006) et le scénario A2 Lointain, pour a) la température et b) les précipitations, au printemps et en été.
 FIGURE 1: Main changes estimated over time for the reference series (1980-2006) and the A2 long-term scenario, for a) temperature and b) rainfall in Spring and Summer.



Les rayonnements évoluent assez peu (moins de 10 %) entre les différents scénarios et échéances (POISSON, 2009, non illustré).

Les ETP ne sont pas illustrées sous forme de carte, car elles sont calculées par STICS et ne sont donc pas des données d'entrée du modèle. Les combinaisons des évolutions des différents facteurs vont conduire à des climats et des délimitations de zones climatiques assez différents des climats actuels, comme l'a montré une autre partie du travail réalisé dans ce projet (POISSON, 2009 ; RUGET *et al.*, 2010b).

4. Changements possibles des niveaux et conditions de production

Nous présentons dans ce chapitre les estimations obtenues pour des graminées, la luzerne et le maïs, en montrant leur variabilité en fonction des choix de simulation, donc les incertitudes liées à ces choix. Une analyse de variance (non illustrée) des productions annuelles pour les graminées et la luzerne, avec comme facteurs la prise en compte ou non de l'effet propre du CO₂ sur les plantes, le scénario (2 niveaux), le sol (2 niveaux), le lieu (34 niveaux) donne des effets significatifs à 1 % (au moins) pour tous. Ce sont ces effets et l'effet des pratiques qui seront présentés dans le présent chapitre.

■ Graminées

Comme prévu, le choix de déclencher les coupes à des sommes de températures et non à des dates fixes rend les dates de coupes adaptées au climat (non illustré) ; elles

sont plus précoces dans le futur et cela permet d'annuler les diminutions de production qui découleraient de la sénescence plus précoce (températures plus élevées), en cas de coupes à dates fixes. Ceci constitue une adaptation « automatique » des pratiques au climat et va dans le sens des évolutions de pratiques déjà en cours (MOREAU, 2008).

• Effet du CO₂

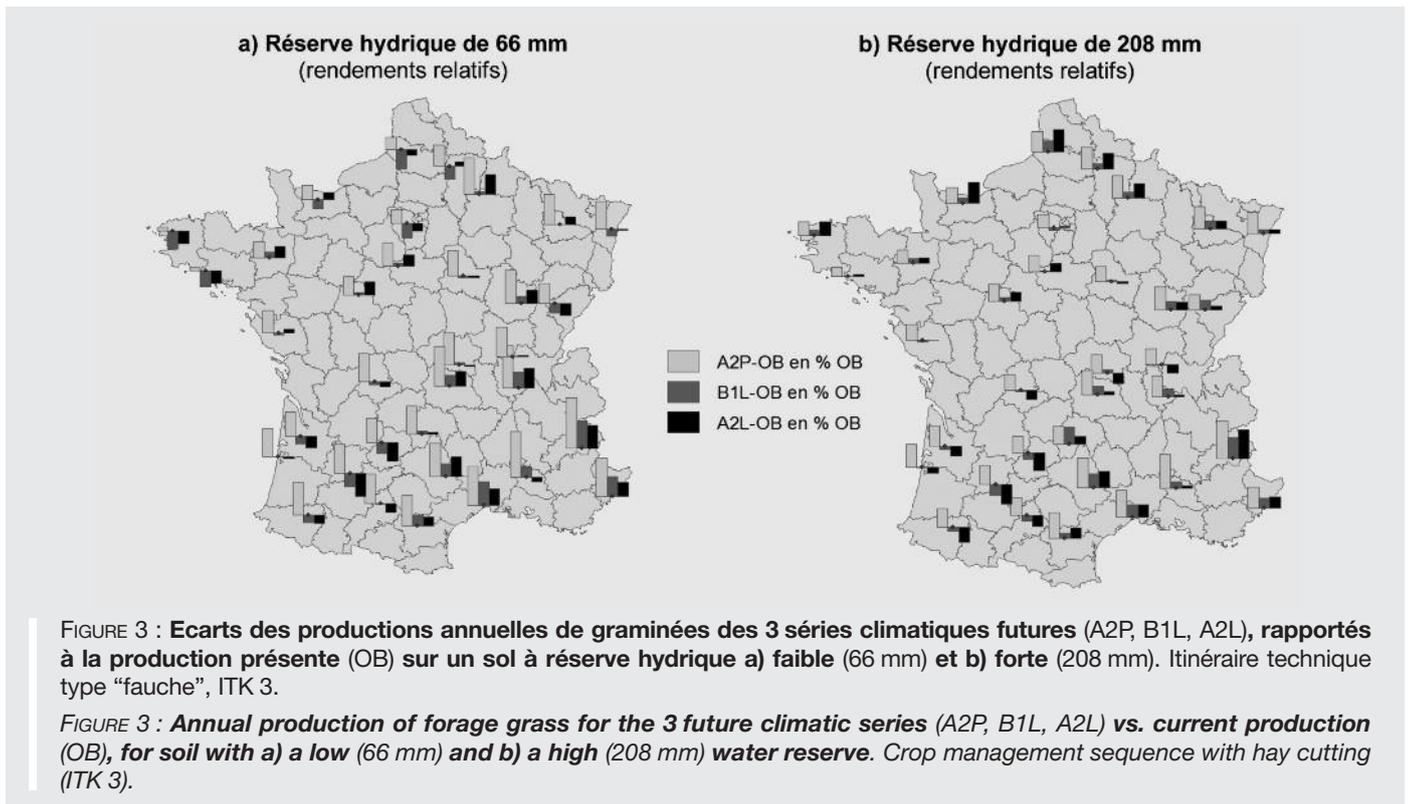
Dans le futur proche, même si on ne prend pas en compte l'effet du CO₂, **les productions sont légèrement augmentées** partout, sauf en Bretagne et le long des côtes de la Manche (figure 2 pour le sol à faible réserve, résultats identiques pour le sol à forte réserve). Mais elles sont très fortement diminuées partout dans le futur lointain, quel que soit le scénario.

La prise en compte de l'effet du CO₂ annule ou atténue fortement les effets négatifs du changement climatique : l'effet du CO₂ permet de compenser les pertes liées à la réduction des précipitations.

Dans la suite du texte, ne seront plus présentés que des résultats de simulations prenant en compte cet effet CO₂, donc l'option la plus favorable à la production (en quantité).

• Effet de l'échéance temporelle et du scénario

Dans le **futur proche**, sur sol profond (figure 3b), les niveaux de production sont augmentés partout, particulièrement dans le sud des Alpes et sur le pourtour méditerranéen, ce que l'on peut relier à l'augmentation de 10 à 20 % des précipitations printanières et surtout estivales dans cette zone.



Dans le **futur lointain, pour le scénario A2, les productions sont très modifiées** par rapport aux productions actuelles **mais différemment selon les régions** : elles sont fortement réduites dans le Sud-Ouest, mais légèrement augmentées le long des côtes de la Manche (du Cotentin au Pas-de-Calais) et dans le Sud-Est (sud du Massif central et des Alpes). Dans le scénario B1, elles sont modifiées dans le même sens, mais de façon plus modérée.

Ces évolutions peuvent être expliquées par l'amplitude des augmentations de températures : dans le Nord, où elles sont modérées, la température reste dans des gammes où son augmentation a un effet positif, tandis que dans le Sud-Ouest, les augmentations très fortes font atteindre des gammes de températures à effet néfaste, accompagnées d'ETP élevées.

• Effet de la réserve hydrique du sol

Les productions sont augmentées, sur les 2 types de sols, **dans le futur proche** (figure 3a et b). C'est le long du littoral de la Manche, sur sol à faible réserve, qu'elles le sont le moins. L'eau apportée par les précipitations limite l'augmentation possible de production provoquée par la hausse de la température.

Sur les 2 types de sol toujours, **dans le futur lointain**, quel que soit le scénario, **les productions sont diminuées dans une large bande transversale s'étendant du Sud-Ouest au Jura**. A long terme, dans le Nord-Ouest, la production est augmentée sur un sol à forte réserve et diminuée sur un sol à réserve faible : tout se joue alors sur le niveau de réserve ; la diminution de

production est bien liée à la restriction des précipitations. Dans le Sud-Ouest, la production est peu diminuée sur sol à faible réserve et beaucoup sur sol à forte réserve : le niveau élevé de réserve ne suffit plus pour surmonter les manques d'eau ; les diminutions relatives sont fortes sur des sols à forte réserve à cause de leurs forts potentiels actuels. Cela conduit à nuancer fortement les résultats d'augmentation apparente de production, surtout à long terme, où la réserve joue un rôle déterminant.

Dans la suite, les résultats présentés seront ceux de simulations sur sols à forte réserve hydrique, où l'apparition du stress hydrique est plus tardive.

• Effet du mode d'exploitation

Pour le mode d'exploitation à utilisation plus fréquente (pâturage, figure 4a) et fertilisation plus faible (un seul apport d'azote au lieu de 2), les diminutions sont un peu plus marquées et plus étendues qu'en mode fauche (coupes moins fréquentes, fertilisation plus forte, figure 4b) : cette diminution pourrait être l'effet des apports d'azote faibles (50 kg N/an).

■ Production annuelle de luzerne et de graminées

La comparaison entre graminées et luzerne (figure 5) porte sur deux itinéraires techniques voisins, de type fauche. Pour la luzerne, dans toutes les régions, la production estimée dans le futur est augmentée, quelle que soit l'échéance (cf. RUGER *et al.*, 2008), tandis que la production des graminées augmente ou diminue selon les régions et surtout les échéances, le futur lointain leur étant souvent défavorable.

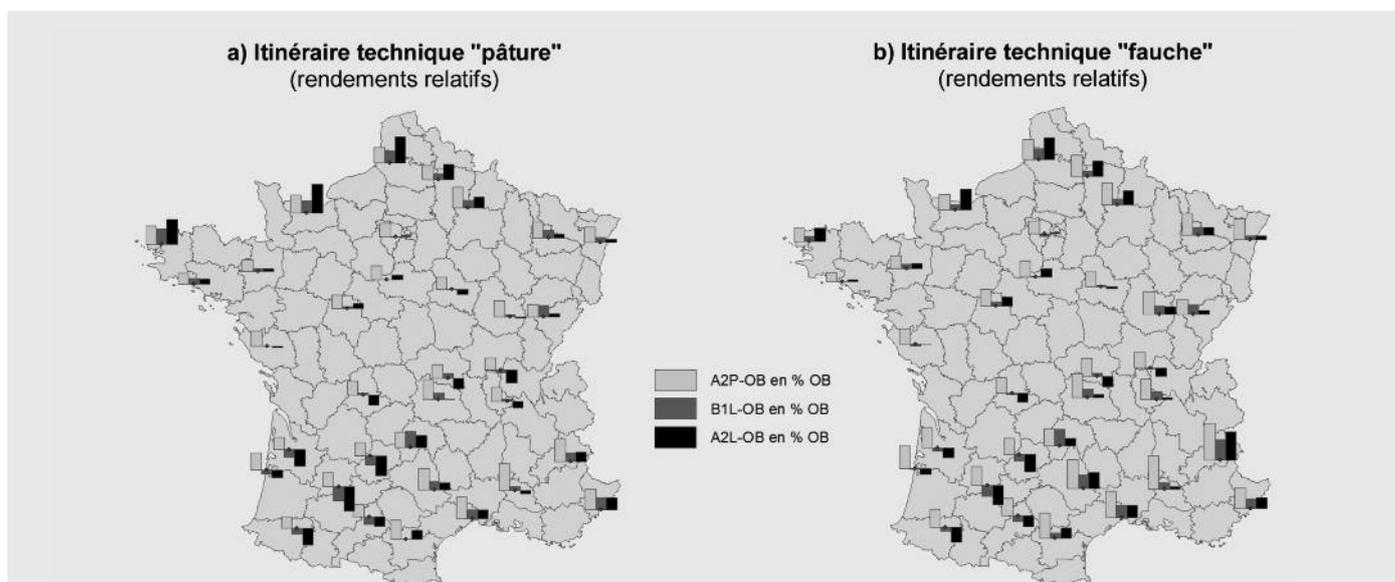


FIGURE 4 : **Ecarts de production annuelle de graminées des 3 séries climatiques futures (A2P, B1L, A2L), rapportés à la production présente (OB), pour les itinéraires techniques “pâturation” (ITK 1) et “fauche” (ITK 3).** Sol à forte réserve utile (208 mm) ; référence : carte 3b.

FIGURE 4 : **Annual production of forage grass for the 3 future climatic series (A2P, B1L, A2L) vs. current production (OB), for pasture (ITK 1) and hay cutting (ITK 3) management sequences.** High soil water reserve (208 mm) ; reference: map 3b.

La différence de comportement entre les 2 couverts pose question. Qu'est-ce qui peut expliquer une différence aussi marquée ? L'analyse des dynamiques annuelles de production montre que, dans le futur lointain, la production des coupes de fin de printemps et de début d'été est nettement plus élevée pour la luzerne que maintenant, alors qu'elles sont à peine plus élevées pour les graminées, et pas suffisamment pour compenser les diminutions estivales (non illustré). La différence de comportement printanier provient elle-même de l'absence

totale de stress azoté pour la luzerne dans la première moitié de l'année, en raison de la fixation symbiotique qui reste active car le sol n'est pas sec, tandis que les graminées présentent un stress azoté, faible mais continu dans toute la première moitié de l'année, qui peut être expliqué par l'absence de modification des pratiques de fertilisation des prairies de graminées dans ce jeu de simulations. Autrement dit, pour les graminées, le stress azoté de printemps ne diminue pas dans le futur, puisque la fourniture d'azote n'augmente pas, tandis que la fixation

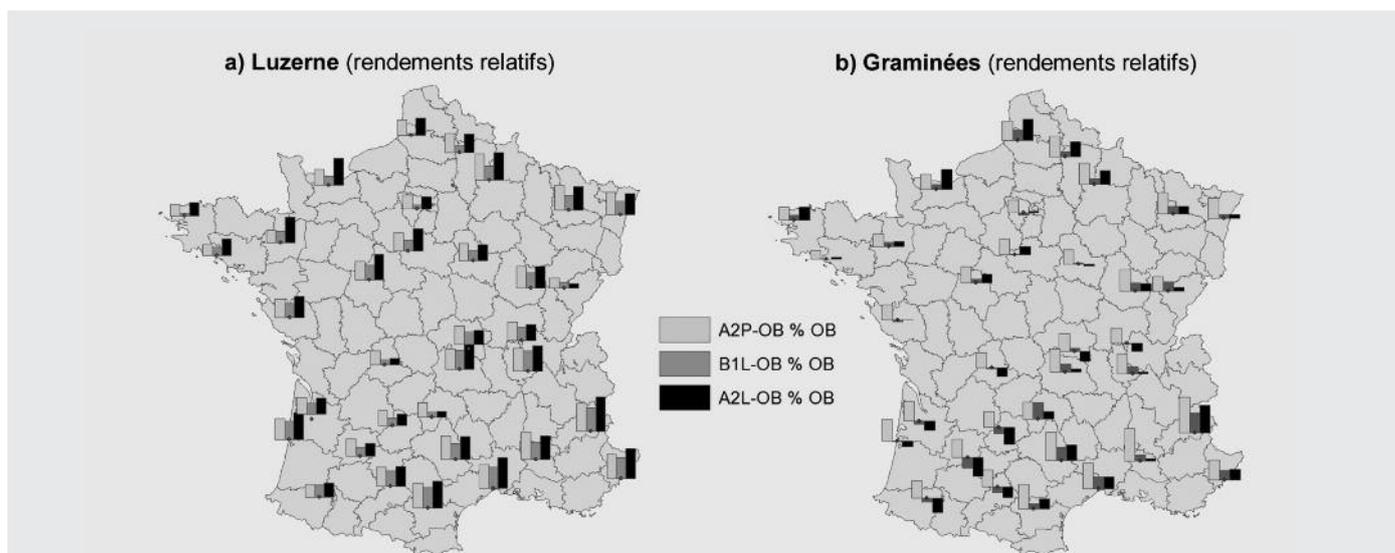


FIGURE 5 : **Ecarts de production annuelle a) de luzerne et b) de graminées des 3 séries climatiques futures (A2P, B1L, A2L), rapportés à la production présente (OB).** Sol à forte réserve utile (référence : carte 3b), itinéraires techniques proches (environ 5 utilisations (ITK 3) pour les graminées et coupe tous les 400°C jour pour la luzerne).

FIGURE 5 : **Annual production of a) alfalfa and b) forage grass for the 3 future climatic series (A2P, B1L, A2L) vs. current production (OB).** High soil water reserve (208 mm) ; reference: map 3b ; similar management sequences, approx. 5 cuts (ITK 3) for forage grass, while alfalfa is cut at 400 GDD (Growing Degree Days).

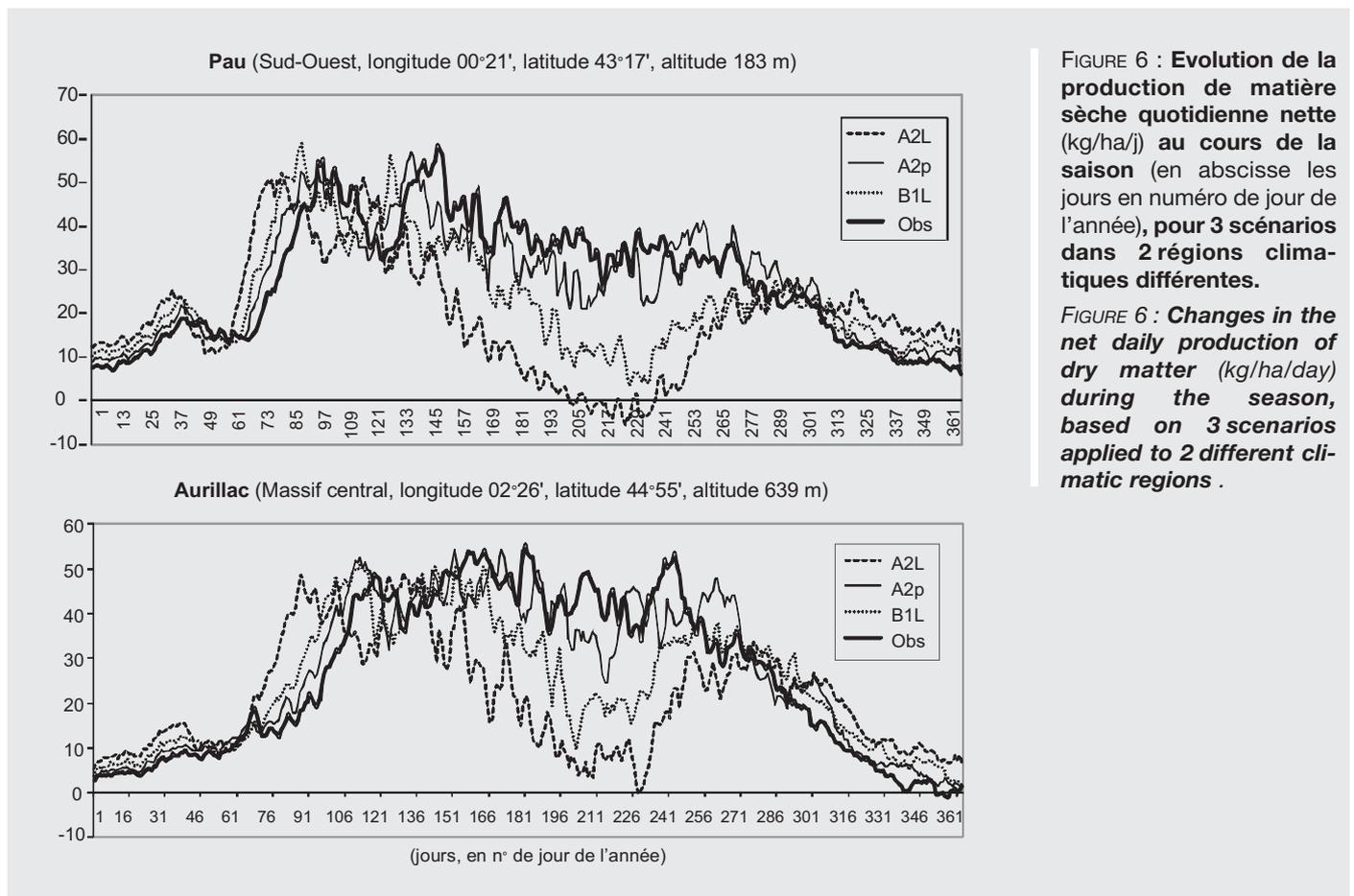


FIGURE 6 : Evolution de la production de matière sèche quotidienne nette (kg/ha/j) au cours de la saison (en abscisse les jours en numéro de jour de l'année), pour 3 scénarios dans 2 régions climatiques différentes.

FIGURE 6 : Changes in the net daily production of dry matter (kg/ha/day) during the season, based on 3 scenarios applied to 2 different climatic regions .

symbiotique de la luzerne augmente - dans le modèle - avec la température, maintenant ainsi l'absence de stress et permettant l'augmentation de production (due au CO_2).

■ Dynamique annuelle de production des graminées

La forme de l'évolution annuelle de la production quotidienne (figure 6) évolue peu entre le présent et le futur proche, mais beaucoup plus pour le futur lointain, et de façon plus accentuée pour le scénario A2. Trois points sont importants à noter : (i) **une avance de plus en plus marquée de la production** - dont l'utilisation peut être gênée dans certaines zones à cause des précipitations printanières (cf. RUGET *et al.*, 2010a) - ; (ii) **un creux estival de plus en plus accentué**, même dans les régions où il était faible, et (iii) **une production hivernale faible mais non négligeable**, de plus en plus marquée vers la fin du siècle.

Les diminutions de productions estivales sont liées essentiellement au stress hydrique, sauf dans le Sud-Ouest où le nombre de jours à température très élevée (s'approchant des seuils qui bloquent totalement la production) augmente sensiblement en scénario A2 dans le futur lointain. Ces points sont essentiels en raison de l'importance du calendrier de production au cours de l'année, qui conditionne l'organisation de l'alimentation des troupeaux et souvent le choix des ateliers possibles, comme on le verra dans l'article suivant.

■ Maïs ensilage

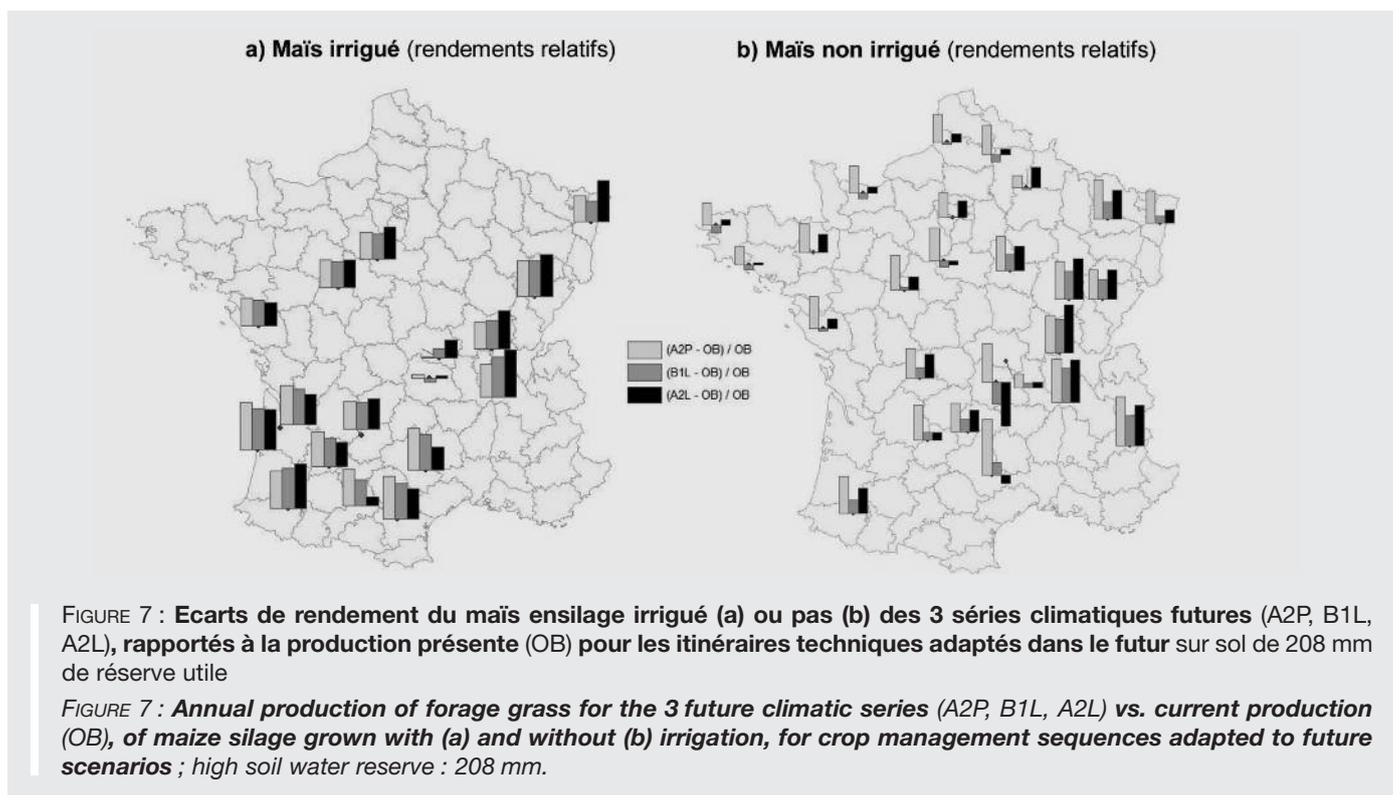
Pour le **maïs irrigué** sur sol profond (figure 7), les rendements futurs estimés sont presque toujours supérieurs aux rendements actuels, quel que soit le scénario : les effets de raccourcissement de cycle par la température sont compensés par l'adoption des géotypes plus tardifs, l'avancement de la date de semis et l'augmentation de production primaire.

En sec, et toujours sur sol profond, les rendements dans le futur lointain sont très peu augmentés (voire diminués pour toute la moitié ouest de la France) par rapport au présent. La diminution de production signifie que l'augmentation d'efficacité de l'eau ne compense pas la diminution des ressources (précipitations plus faibles), bien que les besoins soient peu augmentés (calcul de l'ETP tenant compte des teneurs élevées en CO_2).

A noter aussi que, **dans le futur proche, les rendements seraient augmentés grâce à l'avancée des dates de semis, mais celle-ci sera plus risquée dans le futur proche que dans le futur lointain** (températures basses de printemps).

Discussion générale et conclusion

Les travaux sur les effets des changements climatiques sont nombreux. Les **résultats** peuvent sembler **variables** ; ils le sont en effet. **Ces différences ont des origines multiples** : chacune des étapes de l'estimation



(scénarios socio-économiques, modèles de circulation générale, méthodes utilisées pour passer des estimations de climat à petite échelle à des estimations locales, modèles de culture, options de fonctionnement du modèle de culture) peut être faite avec **plusieurs outils et les résultats de leurs combinaisons peuvent diverger**.

Dans cette étude, nous avons utilisé un seul modèle de circulation générale (Arpege), deux extrêmes du point de vue des scénarios, un seul scénario de régionalisation et un seul modèle de culture (STICS).

Les performances des modèles de climat et des outils de régionalisation peuvent donner des résultats assez variés. Dans le travail du CSIRO (SWSY Report, 2009), les grandeurs climatiques les plus variables sont les précipitations et le ruissellement. Les précipitations, moyennées sur 13 bassins de nappes peu profondes du sud-ouest de l'Australie, varient de -2 à -18 % par rapport à la situation présente selon le modèle climatique (GCM) employé. L'incertitude liée à l'étape de régionalisation, pour la France, des données climatiques venant d'Arpege a été étudiée par DURAND *et al.* (2010) : l'emploi de plusieurs méthodes provoque une variation de plus de 10 % de la production moyenne des graminées sur la France, cette différence provenant essentiellement d'estimations de précipitations très différentes.

Les résultats les plus marquants d'**Arpege-Climat** concernent le futur lointain : il s'agit de fortes augmentations de températures estivales (bordure ouest du Massif central) et de fortes réductions de précipitations (Bretagne et côtes de la Manche). Ces changements forts dans des régions différentes vont conduire à des combinaisons différentes de facteurs climatiques, donc des climats futurs inédits, comme l'a montré l'étude de RUGET *et al.* (2010b),

ce qui justifie des études spécifiques des adaptations et non de simples glissements géographiques des pratiques (cf. le 2^e volet de notre travail, à paraître).

Du point de vue des défauts ou insuffisances possibles du **modèle STICS** (et des modèles de culture en général), il faut souligner que, comme le stress hydrique fort sera de plus en plus fréquent, la qualité de la représentation de la colonisation du profil et de l'accessibilité à l'eau prendra une très grande importance (localisation et quantité de racines) : si, dans le modèle, les racines sont trop abondantes, la consommation d'eau sera facile - et pourra masquer l'occurrence d'un stress sur culture annuelle - ou sera trop rapide et épuisera vite la réserve, ce qui conduira à des stress pour les cultures pérennes, à consommation plus économe ; si elles ne sont pas assez abondantes ou profondes, la mauvaise exploitation de la ressource hydrique présente fera aussi apparaître des stress plus précoces que dans la réalité. Ce point dont l'importance est apparue avec les difficultés de simulation de survie en conditions très sèches (dans les travaux d'un projet ANR¹) souligne la nécessaire plasticité des formalismes pour réussir à représenter la grande variété du comportement des espèces de graminées. La faible souplesse du modèle pour représenter des comportements variés en conditions très sèches doit rendre prudent sur l'utilisation des résultats. Il faut souligner également les risques associés à la mauvaise connaissance des seuils thermiques hauts, au-delà desquels les processus sont ralentis ou stoppés, mais dont les valeurs sont mal connues, en particulier pour le remplissage des grains (céréales pour grains).

1 : Projet ANR VMCS Validate, 2007-2011

En dehors de ces faiblesses possibles du modèle lui-même, nous allons résumer les choix de simulation et leurs conséquences, pour analyser les risques de défauts des estimations de production. Dans un souci de simplification, nous n'avons **pas cherché à donner une représentation des sols** et nous avons **considéré les séries d'années** de chaque période **comme des répétitions, en ignorant l'évolution de la teneur en CO₂**, au cours de chacune des périodes de simulation. Nous n'avons **pas simulé les évolutions du stock de matière organique du sol, ni** les conditions initiales de chaque simulation : **le risque que la réserve hydrique ne se remplisse pas pendant l'hiver** - risque qui va grandir, sans aucun doute - n'est pas considéré. Ces deux derniers points (stock de matière organique et eau dans le sol en fin d'hiver) peuvent rendre les simulations plus favorables que la réalité, au moins pour l'eau dont les réserves risquent de ne pas se reconstituer systématiquement. Nous avons adapté les pratiques, de façon simple (coupes plus fréquentes, génotypes à cycle plus long), sans chercher à voir ce qui se passerait en l'absence totale d'adaptation (situation peu vraisemblable) mais qui peut minorer les effets négatifs possibles du manque d'eau ou des températures élevées du changement climatique.

Nous avons centré nos commentaires sur le scénario A2 dans le futur lointain, le plus différent du climat actuel (plus chaud et plus sec), mais en sol profond, le moins défavorable possible, en tenant compte de l'effet du CO₂ qui améliore les productions, peut-être plus que cela ne sera dans la réalité. Nous donnons donc une image du scénario le plus défavorable à la production, modéré par l'emploi d'un sol profond et l'ignorance de la dégradation possible des conditions initiales.

Par ailleurs, on sait, avec l'expérience d'ISOP (RUGET *et al.*, 2001 ; RUGET *et al.*, 2006), que le modèle donne de bonnes estimations des variations interannuelles, mais pas toujours des valeurs absolues justes ni une bonne représentation de la variabilité géographique absolue. C'est pourquoi, nous avons donc toujours représenté les estimations de production exprimées en valeurs relatives, c'est-à-dire rapportées aux valeurs du présent.

Les résultats les plus sûrs sont ceux qui concernent les effets de la température sur les durées des processus, malgré les critiques possibles sur la modélisation du développement des plantes. En effet, on a fait l'hypothèse que l'accélération des processus de développement et de croissance avec la température (en-dessous d'un optimum) doit rester vraie dans les gammes de température prévues, même en A2, en fin de siècle. Ces résultats sont confirmés par l'avance déjà observée des cycles phénologiques et des dates de récolte. Le changement de la saisonnalité des productions est une conséquence de ces effets de température ; c'est donc un des effets prévus les plus sûrs, aussi annoncé par DURAND *et al.* (2010).

Le **projet Climator** (BRISSEON et LEVRAULT, 2010), travail sur le changement climatique réalisé juste après le projet ACTA-CC, dont on présente les résultats ici,

annonce des productions pour les prairies fauchées toujours plus élevées dans le futur lointain que maintenant, alors que notre travail fait apparaître parfois des diminutions de production : outre le fait que nous avons utilisé un scénario plus « sévère » (A2 au lieu de A1B (GIEC, 2007) dans Climator), nous avons aussi utilisé des sols moins profonds que ceux de DURAND *et al.* (2010), qu'il s'agisse du sol profond ou du sol superficiel (66 mm de réserve dans notre étude, au lieu de 103 dans le cas le plus sévère de Climator prairie). Il est donc possible que les résultats plus optimistes de Climator proviennent de la conjonction de scénarios moins pessimistes et du choix de sols plus favorables : les deux travaux illustrent deux points d'une large gamme de possibles. Notons que si l'amplitude des effets positifs du CO₂ - qui est similaire dans les deux études - est exagérée, les résultats de la présente étude sont également trop optimistes.

Les évolutions de production observées seront utilisées dans un deuxième article qui traite des adaptations possibles des systèmes d'alimentation animale : adaptations des fourrages choisis et des calendriers correspondants notamment.

Accepté pour publication,
le 9 mars 2012.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABDESSEMED A. (2007) : *Modélisation de l'impact des changements climatiques sur la production de la luzerne*, diplôme de Master en Agronomie et Agro-alimentaire, SupAgro, Montpellier, 57 p. + 10 annexes.
- BRISSEON N., LEVRAULT F. (2010) : *Livre vert du projet Climator*, Ademe, 334 p.
- BRISSEON N., MARY B., RIPOCHE D., JEFFROY M.H., RUGET F., NICOLLAUD B., GATE P., DEVIENNE-BARRET F., ANTONIOLETTI R., DÜRR C., RICHARD G., BEAUDOIN N., RECOURS S., TAYOT X., PLÉNET D., CELLIER P., MACHET J.-M., MEYNARD J.M., DELÉCOLLE R. (1998) : "STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn", *Agronomie*, 18, 311-346.
- BRISSEON N., LAUNAY M., MARY B., BEAUDOIN N. (2009) : *Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the Stics Crop Model*, Quae éd., Paris, 304 p.
- COLLECTIF (2009) : *Étude de la sensibilité des systèmes de grandes cultures et d'élevages herbivores aux changements climatiques*, Compte-rendu du projet ACTA-MIRES, 06/09, 33 p+annexes, Institut de l'Élevage, Toulouse.
- CSIRO (2009) : *SWSY Main report Surface Water, Executive summary*, <http://www.csiro.au/partnerships/SWSY.html>, i-xx.
- DÉQUÉ M. (2007) : "Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values", *Global and Planetary Change*, 57, 16-26.
- DÉQUÉ M., DREVETON C., BRAUN A., CARIOLLE D. (1994) : "The ARPEGE-IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling", *Climate Dynamics*, 10, 249-266.
- DURAND L.L., BERNARD F., LARDY R., GRAUX A.-I. (2010) : *Changement climatique et prairie : l'essentiel des impacts*", *Présentation des méthodes et des résultats du projet CLIMATOR*, 17-18 juin 2010, INRA Versailles, 36-37.

- GIEC (2007) : *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, Equipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger A. éd., GIEC, Genève (Suisse), 103 p., http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf.
- GIORGI F. (2008) : "Régionalisation de l'information sur els changements climatiques pour les évaluations des incidences et l'adaptation", *Bulletin de l'OMM*, 57, 86-92.
- GONZALEZ-CAMACHO M., MAILHOL J.-C., RUGET F. (2008) : "Impacts locaux attendus de l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère sur la productivité de l'eau du maïs dans la Drôme, France", *Irrigation and Drainage*, 57, 2, 229-243, Published Online: Jul 27 2007 5:40AM, Online ISSN: 1531-0361, DOI: 10.1002/ird.332
- IPCC (2000) : *IPCC Special Report Emissions Scenarios, Summary for Policymakers*, WMO, UNEP, 27 p., www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf
- MOREAU J.C. (2008) : *Impacts des sécheresses de 2003, et 2005 sur les résultats des exploitations ovines et bovines allaitantes du Limousin, évolution en cours*, Compte rendu étude CRAL/RECP, 49p.
- MOUSSEAU M., ENOCH H.Z. (1989) : "Carbon-dioxide enrichment reduces shoot growth in sweet chestnut seedlings (*Castanea-Sativa* Mill.)", *Plant Cell and Environment*, 12, 927-933, doi: 10.1111/j.1365-3040.1989.tb01972.x
- MOUSSEAU M., SAUGIER B. (1992) : "The direct effect of increased CO₂ on gas-exchange and growth of forest tree species", *Int. scientific meet. on effects of climatic change on agricultural and natural ecosystems*, San Miniato (Italy), Sep 1990, *J. Exp. Bot.*, 43, 1121-1130 doi 10.1093/jxb/43.8.1121
- POISSON S. (2009) : "Caractérisation des climats à venir, spatialisation sur le territoire français métropolitain et application en agronomie", *Colloque Changement climatique : Conséquences et enseignements pour les grandes cultures et l'élevage herbivore*, Paris Octobre 2009, 59-69.
- RUGET F. (2009) : "Impact du changement climatique sur la luzerne et la prairie, disparités régionales", *Changement climatique, Conséquences et enseignements pour les grandes cultures et l'élevage herbivore*, 22 oct. 2009, 103-111, Moreau, Ruget, Lacroix., Lorgeou, Gate, Poisson, Cloppet, Souverain éd. sc., Paris, ACTA Institut de l'Élevage-Arvalis (éd.), 144 p.
- RUGET F., BRISSON N. (2007) : "Modéliser l'impact de la sécheresse sur la production fourragère par le modèle STICS", *Productions fourragères et adaptations à la sécheresse, Actes des Journées de l'AFPF*, 27-28 mars 2007, 47-57.
- RUGET F., NOVAK S., GRANGER S. (2006) : "Du modèle STICS au système ISOP pour estimer la production fourragère. Adaptation à la prairie, application spatialisée", *Fourrages*, 186, 241-256.
- RUGET F., ABDESSEMED A., MOREAU J.C. (2008) : "Impact of global climate change scenarios on alfalfa production in France", *Biodiversity and Animal Feed, 22th Gen. Meet. EGF*, Uppsala (Sweden), 9-12 June 2008, 3262, 745-747.
- RUGET F., MOREAU J.-C., CLOPPET E., SOUVERAIN F. (2010a) : "Effect of climate change on grassland production for herbivorous livestock systems in France", *23th Gen. Meet. EGF, Grassland in a changing world*, Kiel (Germany), Aug. 29th-Sept 2th 2010, 75-77.
- RUGET F., MOREAU J.-C., FERRAND M., POISSON S., GATE P., LACROIX B., LORGEOU J., CLOPPET E., SOUVERAIN F. (2010b) : "Describing the possible climate changes in France and some examples of their effects on main crops used in livestock systems", *Adv. Sci. Res.*, 4 : 99-104, www.adv-sci-res.net/4/99/2010/, doi:10.5194/asr-4-99-2010.
- RUGET F., DELÉCOLLE R., LE BAS C., DURU M., BONNEVIALE N., RABAUD V., DONET I., PÉRARNAUD V., PANIAGUA S. (2001) : "L'estimation régionale des productions fourragères", *Colloque Ager-Mia*, 31 août 2000, *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision*, éd. Cirad-INRA, Montpellier, Collection Repères, Malézieux, Trébuil, Jaeger éd., 263-282.



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