

# Impacts des changements climatiques sur les productions de fourrages (prairies, luzerne, maïs) : variabilité selon les régions et les saisons

F. Ruget<sup>1</sup>, J.-L. Durand<sup>2</sup>, D. Ripoche<sup>3</sup>, A.-I. Graux<sup>4</sup>, F. Bernard<sup>2</sup>, B. Lacroix<sup>5</sup>, J.-C. Moreau<sup>6</sup>

1 : INRA UMR 1114 EMMAH, Site Agroparc, F-84914 Avignon cedex 9 ; ruget@avignon.inra.fr

2 : INRA, URP3F, F-86600 Lusignan

3 : INRA US 1116 Agroclim, Site Agroparc, F-84914 Avignon cedex 9

4 : INRA, UR874 Ecosystème prairial, 5, chemin de Beaulieu, F-63039 Clermont-Ferrand

5 : ARVALIS-Institut du végétal, Station expérimentale, F-31450 Baziège

6 : Institut de l'Élevage, F-31320 Castanet-Tolosan

## Résumé

Le présent travail a pour but de caractériser la variabilité du changement climatique et de ses effets sur les cultures fourragères selon les régions et les saisons. Récemment, plusieurs études sur ce thème, utilisant différents modèles et méthodes, ont été réalisées en France. Il s'agit donc de faire une synthèse de ces travaux qui, ayant utilisé des hypothèses de travail différentes, ont obtenu des résultats parfois différents. La multiplicité des méthodes a permis de montrer certains invariants dans le climat et les productions annuelles et saisonnières. L'avance printanière, l'existence de production hivernale et l'apparition ou l'accentuation du creux estival ont été mis en évidence - à des degrés divers - avec tous les modèles. La prévision d'une augmentation globale de production dans le futur proche fait également l'unanimité. Dans le futur, quelle que soit l'échéance, une augmentation est prévue principalement à cause des effets positifs du CO<sub>2</sub>, en particulier de la réduction de transpiration qu'il provoque. A long terme, les effets négatifs de la température et de l'augmentation de l'ETP risquent de dominer les effets positifs du CO<sub>2</sub> et de provoquer une diminution globale de production : ce sont l'occurrence de cette diminution et son échéance qui font débat. Après analyse, l'augmentation de production dans le futur lointain, trouvée systématiquement avec un modèle d'une seule des deux études dont il est question ici, pourrait provenir de l'augmentation du rayonnement vue et utilisée dans cette étude, ainsi que d'une fertilisation beaucoup plus favorable.

## Introduction

Les impacts des changements climatiques sur la production des cultures concernent tous les producteurs agricoles et les intéressent d'autant plus lorsque leurs productions sont très directement dépendantes des conditions du milieu, en raison de techniques peu variables comme pour les prairies permanentes. De plus, les éleveurs sont particulièrement attentifs aux changements qui peuvent être annoncés et à leurs effets, car ils sont les fournisseurs directs - et souvent pour la majeure partie - de l'alimentation de leurs animaux. Ils sont donc soumis à la nécessité de satisfaire quotidiennement les besoins de leurs troupeaux, quelles que soient les conditions climatiques. C'est ce qui explique leur grand intérêt pour les travaux permettant de "prédire" les effets du changement climatique, car une bonne anticipation doit permettre de surmonter les difficultés ou d'assurer la fourniture alimentaire du troupeau, en toutes conditions et à tout moment.

Pour déterminer les stratégies d'adaptation de systèmes fourragers et d'élevage les plus appropriées, il est donc nécessaire de connaître les évolutions possibles ou attendues des principales productions fourragères. L'effet du changement climatique sur les cultures peut être estimé à partir des connaissances des météorologistes qui emploient soit des générateurs climatiques, soit des modèles de circulation générale - pour fournir des séries climatiques pour le futur d'une part et des réponses des cultures aux facteurs climatiques calculées à partir de modèles culture, d'autre part. Étant donné la grande diversité du climat en France (de l'océanique au continental, en passant par les climats méditerranéens et de montagne soit, par exemple, 7 climats sur les 13 de la stratification environnementale de l'Europe, JONGMAN *et al.*, 2006), on peut facilement imaginer que les changements seront assez variables selon les zones climatiques.

L'objectif général du travail est de **d'analyser la variabilité des conséquences du changement climatique selon les régions, les cultures fourragères et les saisons.**

Plusieurs recherches ont récemment abordé i) les questions de productivité future, pour diverses cultures, tout en se posant la question de l'expression de l'effet de ces changements selon les conditions de milieu (sol) et les pratiques, ii) la question de la variabilité régionale qui pourrait résulter

de ces changements et iii) la question de l'effet des outils employés (modèles de climat, méthodes de régionalisation des climats et modèles de culture variés). **La comparaison des résultats de plusieurs modèles de culture permet de renforcer les conclusions sur la variabilité régionale et saisonnière**, en recherchant quelles évolutions sont concordantes ou ne le sont pas.

Le présent travail s'appuie sur les **contrats ACTA MIRES** "Sensibilité des systèmes de grandes cultures et d'élevage herbivore aux changements climatiques" (dénommé ici ACTA-CC) et **ANR Climator** "Changement climatique, agriculture et forêt en France", qui se sont déroulés respectivement de 2006 à 2008 et 2007 à 2010. Comme ils ont employé des options différentes, ils aboutissent à des résultats parfois semblables, parfois différents. Tenter de rassembler et confronter les résultats de ces différents travaux permettra de voir quels résultats sont stables quelles que soient les méthodes. L'article est centré sur l'analyse de la variabilité des effets du changement climatique entre régions, à partir des résultats de l'étude ACTA-CC (graminées fourragères, luzerne, maïs fourrage). Cette analyse est suivie de la comparaison de quelques résultats emblématiques sur la production des graminées fourragères des études ACTA-CC (obtenus avec STICS) et Climator (obtenus avec STICS et PaSim).

Rappelons que le CO<sub>2</sub> a deux effets positifs sur la production : augmentation de la production primaire et diminution de la transpiration du couvert par fermeture stomatique. La prise en compte et la formalisation de ces effets peuvent avoir une forte influence mais leur effet à long terme et leur amplitude sont assez controversés dans la bibliographie (LONG *et al.*, 2006 ; BETTS *et al.*, 2007) à cause l'atténuation possible de ces effets à long terme en raison de l'adaptation des plantes. Même s'il y a accord sur le caractère positif de l'effet du CO<sub>2</sub> pour la production végétale, on présentera, pour les graminées, les résultats avec et sans prise en compte de l'effet du CO<sub>2</sub>, de façon à illustrer cet effet et son ampleur, même si l'hypothèse d'absence totale d'effet est plus pessimiste que la réalité.

## 1. Matériel et méthodes

Les scénarios d'émission de gaz à effet de serre (GES) analysés à partir de ces 2 études et utilisés dans cette comparaison ne sont pas les mêmes : un scénario modéré et un scénario accentué (B1 et A2) pour ACTA-CC, et un scénario modéré (A1B) pour Climator (IPCC, 2007).

Les méthodes de "régionalisation" des sorties du modèle climatique, Arpège (CNRM), sont différentes entre les 2 études : c'est la méthode dite des anomalies, c'est-à-dire des différences (ou rapports) entre les estimations climatiques pour les différentes échéances du futur et pour le présent, anomalies calculées en moyenne trentenaire (RUGET *et al.*, 2010), dans ACTA-CC et "quantile-quantile" (QQ, respect de la distribution réelle de chaque variable climatique<sup>1</sup>) dans Climator, résultats présentés en moyenne trentenaire (TERRAY *et al.*, 2010). Cette dernière méthode présente l'intérêt de ne pas reproduire la variabilité observée entre jours (répartition des pluies) et permet de représenter l'augmentation de la fréquence et l'accentuation de l'intensité des événements extrêmes de type vagues de chaleur et sécheresse estivale.

Le Tableau 1 recense les principales différences entre les jeux de simulations sur graminées qui seront comparés dans la dernière partie du travail.

Les 2 études ont été réalisées à partir de données de stations météorologiques : 34 dans ACTA-CC (stations Météo-France) et 12 dans Climator (stations INRA, sauf Saint-Etienne). Parmi celles-ci, 6 sont très proches de 6 stations d'ACTA-CC : Mons-en-Chaussée et Saint Quentin, Versailles et Trappes, Rennes INRA (Le Rheu) et aéroport (St Jacques de la Lande), Bordeaux INRA (Villenave d'Ornon) et aéroport (Mérignac), Toulouse INRA (Auzeville) et aéroport (Blagnac), Dijon INRA (Epoisses) et aéroport (Longvic, Ouges). Trois seront comparées quoiqu'un peu plus distantes et dans des conditions topographiques différentes : Lusignan et la Roche-sur-Yon (cette dernière plus éloignée de la mer), Saint-Etienne (Andrézieux-Bouthéon) et Vichy (Charmeil), respectivement dans les Limagnes de Loire et d'Allier, ainsi qu'Avignon et Carpentras (vallée du Rhône et pied du Ventoux).

La plupart des paramètres caractérisant la plante sont communs entre "modèle prairie" d'ACTA-CC et "modèle féтуque" de Climator. Les principales différences sont présentées dans le Tableau 1 ; les différences influentes seront commentées dans la comparaison des résultats.

---

<sup>1</sup> correction des variables climatiques simulées par le modèle de climat à l'aide d'une fonction, construite comme une probabilité conditionnelle sur les données observées (TERRAY *et al.*, 2010)

**TABLEAU 1 – Principales caractéristiques et différences des jeux de simulation des 2 études utilisés dans ce travail.**

	<b>STICS ACTA-CC graminées</b>	<b>STICS Climator fétuque</b>	<b>STICS Climator ray-grass</b>	<b>PaSim Climator fétuque</b>
<b>Climat</b>				
Climat présent	réel	Safran		Safran
Régionalisation <sup>(1)</sup>	anomalies	QQ		QQ <sup>(2)</sup>
Climat futur : - scénarios <sup>(3)</sup> utilisés - scénarios "équivalents" - différences de climat	ARPÈGE-CNRM B1 et A2 B1	ARPÈGE-CNRM A1B A1B rayonnement		ARPÈGE-CNRM A1B A1B rayonnement
<b>Modèle</b>				
	STICS 69 <sup>(4)</sup>	STICS 64-Climator <sup>(4)</sup>		PaSim
<b>Paramètres de STICS</b>				
Caractéristiques des plantes	- pas d'effet d'anoxie - reprise possible, même en l'absence de coupe	- pas d'effet d'anoxie - pas de reprise possible après une certaine durée sans fauche	- sensibilité à l'anoxie <sup>(5)</sup> - pas de reprise possible après une certaine durée sans fauche - plus forte sensibilité aux stress hydrique et azoté - durée vie feuilles et racines plus courte	<u>pas de comparaison de paramètres ni de processus</u>
Propriétés du sol	infiltration rapide	infiltrabilité réduite	infiltrabilité réduite	

1 : Régionalisation ou désagrégation : les **modèles de circulation générale** qui fournissent les séries climatiques futures 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 zone aussi petite que l'intérieur de la France. On utilise donc des méthodes dites « de régionalisation » ou « de désagrégation », qui permettent d'obtenir des résultats fiables à une résolution plus fine. Les méthodes possibles sont multiples (GIORGI, 2008).

2 : D'autres méthodes ont été utilisées ; seules sont commentées celles citées ici.

3 : Scénario : Les **scénarios d'émissions de gaz à effet de serre** (GES) définis par l'IPCC formalisent plusieurs hypothèses d'évolution des sociétés humaines (population, mode de consommation) sur l'ensemble de la Terre. Les scénarios A correspondent à un monde à objectifs plutôt économiques, tandis que les B mettent l'accent sur la réalisation d'objectifs environnementaux. Les scénarios 1 considèrent un monde tendant vers l'homogénéité et les 2, un monde maintenant une forte hétérogénéité de développement entre zones. Par conséquent, le scénario B1 est celui qui correspond à la plus faible émission de GES, donc au plus faible réchauffement (+1,8°C en 2100 par rapport à la température moyenne de 2000) ; le scénario A1B (qui est une variante de A1) est moins favorable, avec un réchauffement moyen plus fort, surtout à la fin du siècle (+2,8°C) ; le scénario A2 correspond à l'échauffement le plus fort (+3,6°C). A cette échelle (moyenne mondiale), A1B connaît un réchauffement presque aussi fort que A2 dans le futur proche ; ils se distinguent dans le futur lointain, où le réchauffement de A1B s'amortit légèrement.

Les simulations d'ARPÈGE-climat utilisées sont continues de 1950 à 2100. Les résultats sont analysés en regroupant les années en 3 périodes : le passé récent (1980-2006, dit présent), le futur proche (2020-2026, P), le futur lointain (2070-2096, L). On appelle séries climatiques les jeux de données climatiques correspondant à un scénario, une échéance et une méthode de désagrégation ; elles sont nommées par le nom du scénario et de l'échéance, par exemple A2 L ou A1B P. Exceptionnellement, lorsqu'elle sera objet d'étude, la méthode de désagrégation sera mentionnée.

4 : Les deux versions de STICS utilisées (64 et 69) sont très proches l'une de l'autre, celle de Climator (64) a été complétée pour quelques situations "particulières", par exemple enchaîner l'année de semis et les suivantes pour les prairies temporaires.

5 : Les différences sont signalées pour chaque colonne par rapport à la précédente

Il existe des différences entre les pratiques choisies pour chaque étude : le niveau de fertilisation (200 kg N/ha/an dans Climator au lieu de 50 dans ACTA-CC), le mode de déclenchement des fauches (à dates fixes dans Climator, dépendant de la température dans ACTA-CC). Les simulations sont continues, avec semis tous les 5 ans dans Climator, alors que les années sont individuelles et considérées comme des répétitions dans ACTA-CC.

Le Tableau 2 recense les effets des différents facteurs climatiques et leur prise en compte dans STICS ; il fournit une grille d'analyse des résultats qui sera utilisée dans le commentaire des productions simulées.

**TABLEAU 2 – Effets du changement climatique sur les principaux processus de la production et leur prise en compte dans STICS.**

Facteur	CO <sub>2</sub>	Température	Précipitations-ETP	Azote
Origine	climat	climat	climat	pratiques
Facteurs intermédiaires				climat & matière organique du sol
Processus	- photosynthèse - consommation d'eau	- vitesse des processus et durée des cycles - productivité (RUE)	- stress hydrique	- stress azoté - minéralisation
<b>Augmentation de production</b>				
condition*	toujours	sous seuil	bilan positif ou pas d'augmentation du déficit	fertilisation non limitante
<b>Diminution de production</b>				
condition*	jamais	au-dessus seuil optimal	bilan négatif ou augmentation du déficit	fertilisation insuffisante

\* conditions pour que l'action du facteur soit une augmentation ou une diminution

## 2. Résultats

### 2.1. Evolution du climat avec ACTA-CC

**TABLEAU 3 – Principales caractéristiques climatiques des sorties Arpège. Moyenne des données brutes (sans désagrégation) des 3 variables principales (température, précipitations, ETP). Moyenne pour l'ensemble des mailles couvrant la France et ses bordures (390 mailles).**

Scénario (années)	Situation actuelle 1980-2006	B1P 2020-2046	B1L 2070-2096	A2P 2020-2046	A2L 2070-2096
Température moyenne (°C)	9,5	10,6	11,5	10,5	13,3
Précipitations (mm)	1063	1036	971	1068	891
ETP (mm)	618 <sup>(1)</sup>	696	780	659	899

1 : Les valeurs ne doivent être utilisées que de façon relative entre périodes, puisque ce sont des valeurs brutes (non régionalisées) et moyennes sur toute la France (y compris les zones de montagne)

On constate (Tableau 3) une forte ressemblance entre les scénarios dans le futur proche (B1P et A2P), mais une forte différence de température et, dans une moindre mesure, de précipitations et d'ETP (calculée avec la méthode Penman) entre les scénarios B1L et A2L (futur lointain). A l'échelle de l'ensemble de la France, l'augmentation de température moyenne est nettement plus faible en B1 que A2 dans le futur lointain.



**FIGURE 1 – Zonage du climat français actuel (données du passé récent : 1980-2006) par AFMS (analyse factorielle multiple spatialisée (RUGET *et al.*, 2010).**

#### Zones climatiques

- Classe 1 : Pourtour des montagnes Massif Central, Pyrénées, Alpes, Jura
- Classe 2 : Montagnes moyennes et Alsace, sauf Vosges
- Classe 3 : Est, Centre-Est sauf Alsace
- Classe 4 : Hautes montagnes, Est des Alpes
- Classe 5 : Nord-Ouest, Bassin Parisien, Centre
- Classe 6 : Pourtour méditerranéen
- Classe 7 : Centre Bretagne + limites zone océanique
- Classe 8 : Ouest côtier de la Loire à l'Adour, dite zone océanique

## - Les zones de l'Analyse Factorielle Multiple Spatialisée

Les résultats régionaux de l'étude ACTA-CC seront présentés à partir des zones définies au sein de cette étude par une AFMS<sup>2</sup> (POISSON, 2009 ; RUGET *et al.*, 2010). Ce zonage élaboré spécialement définit des zones qui ressemblent aux zones climatiques classiques ainsi qu'au découpage de l'Europe de JONGMAN *et al.* (2006) : ce rapprochement permettra la comparaison de nos résultats avec ceux des indices agro-climatiques mis au point par OLESEN *et al.* (2011) et utilisés en conditions de changement climatique par TRNKA *et al.* (2011).

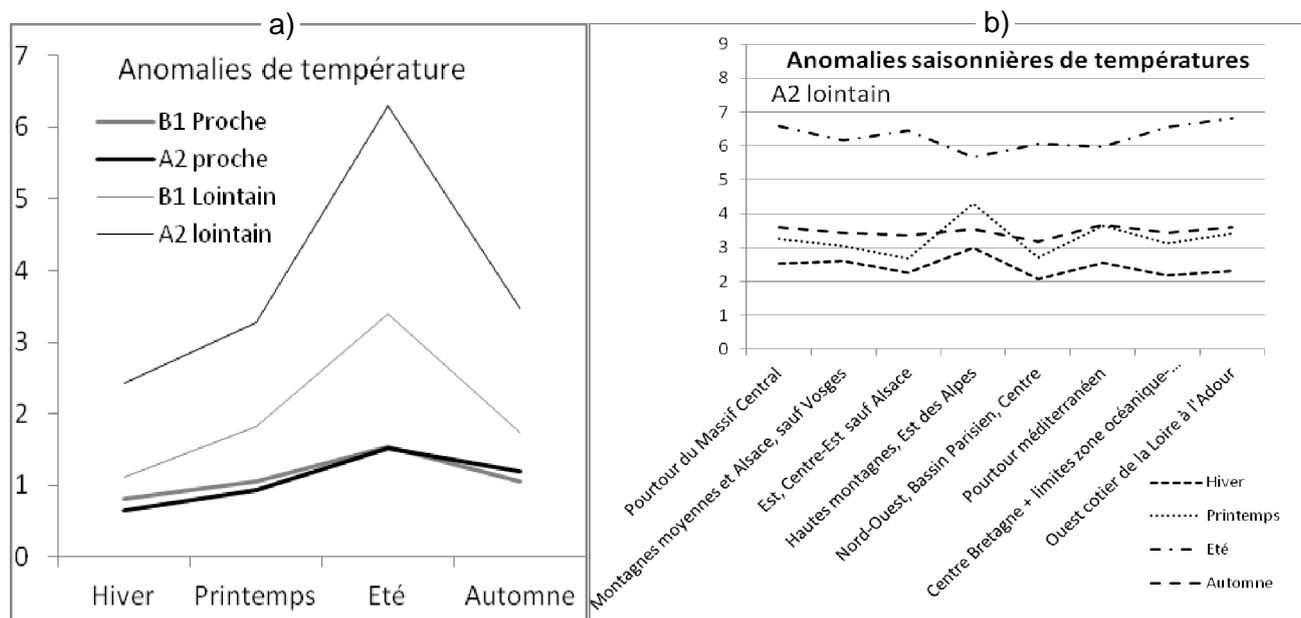
Les résultats seront présentés en "anomalies" (différence ou rapport entre le futur et le présent) pour les variables climatiques et en variation relative pour les rendements, avec un classement par zone climatique de l'AFMS.

## - Evolution de la température (scénario et régionalisation d'ACTA-CC)

L'augmentation de température est faible dans le futur proche (Figure 2a) : quelle que soit la saison, il y a peu de différences entre les 2 scénarios. Au contraire, l'augmentation de température est forte dans le futur lointain, tout particulièrement en été, et surtout dans le scénario A2. Pour les régions (Figure 2b), dans le futur lointain (scénario A2L), les anomalies sont positives en toutes saisons, mais elles sont plus fortes en été, quelle que soit la région. Dans la zone de haute montagne (classe 4), les différences entre saisons sont plus faibles qu'ailleurs. Les plus fortes augmentations de températures ont lieu dans les zones "ouest côtier" (classe 8) et pourtour des montagnes (classe 1).

En résumé, l'effet de la saison est très net, ainsi que l'effet de la région sur les températures estivales (Sud-Ouest) et les températures de toutes les saisons en haute montagne.

**FIGURE 2 – Répartition saisonnière et répartition spatiale des anomalies de température** (différence par rapport au présent, °C) **a) selon la saison** (valeurs moyennes pour l'ensemble des 235 mailles recouvrant la France), **b) selon la région de l'AFMS** (moyenne des mailles de chaque zone de l'AFMS).



## - Evolution des précipitations (scénarios et régionalisation d'ACTA-CC)

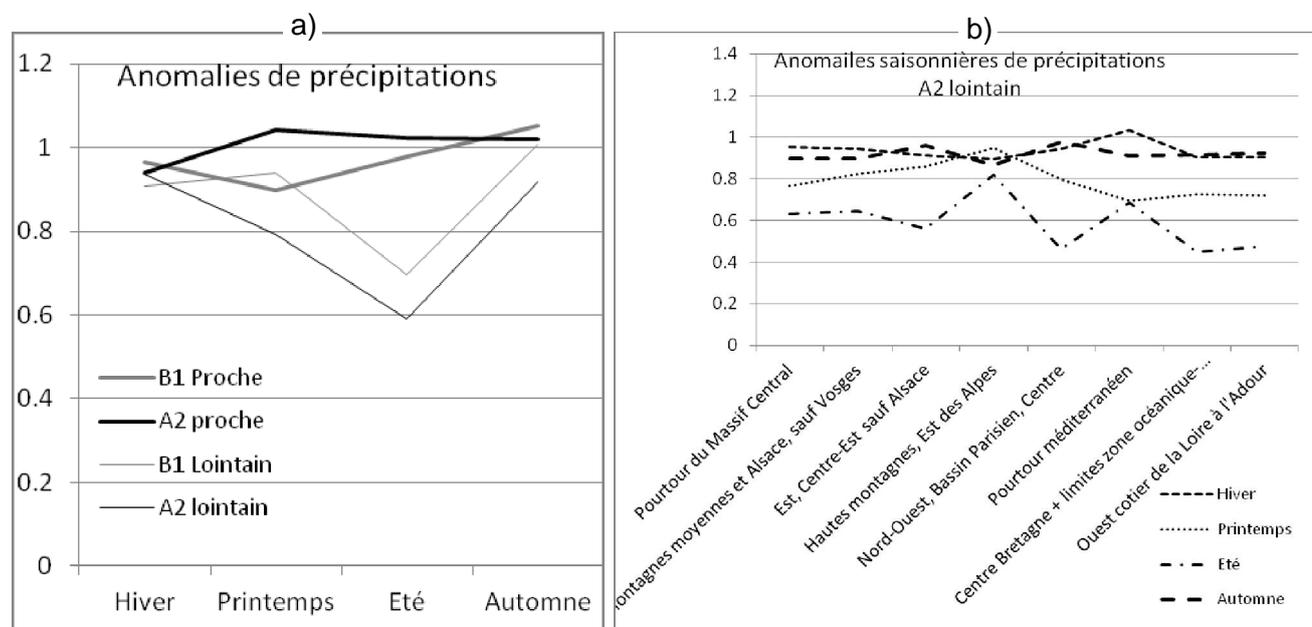
Les changements de précipitations sont très variables selon les saisons et selon l'échéance (Figure 3a). La très forte baisse des précipitations en été a lieu pour presque toutes les régions ; elle est moins marquée en haute-montagne et sur le pourtour méditerranéen, donc sur le quart Sud-Est de la France. Cette estimation est assez différente de ce qui est estimé dans des études sur le passé

<sup>2</sup> Analyse factorielle multiple spatialisée, méthode développée en France par ESCOFFIER et PAGES (1998)

récent (Climfourrel, LELIEVRE *et al.*, 2011) où aucune évolution n'est mise en évidence, peut-être en raison de la très forte variabilité interannuelle de précipitations, particulièrement dans cette région.

En résumé, l'effet de la saison est très net : la réduction de précipitations est plus forte (Figure 3a) et plus variable (Figure 3b) en été ; la réduction est forte dans toute la moitié Ouest (classes 5, 7 et 8) et particulièrement forte dans le quart Sud-Ouest (classe 8).

**FIGURE 3 – Répartition saisonnière et répartition spatiale des anomalies de précipitations** (facteur multiplicatif des valeurs du présent) **a) selon la saison** (valeurs moyennes pour l'ensemble des 235 mailles recouvrant la France) **b) selon la région de l'AFMS.**



## 2. 2. Evolution des productions dans l'étude ACTA-CC

En raison de la proximité des climats B1P et A2P, nous ne présentons ici que les résultats de production du scénario A2p.

### - Production des prairies

La Figure 4 illustre les variations relatives de rendements moyens par lieu selon les scénarios et échéances, ainsi que l'effet de la non prise en compte des effets du CO<sub>2</sub>.

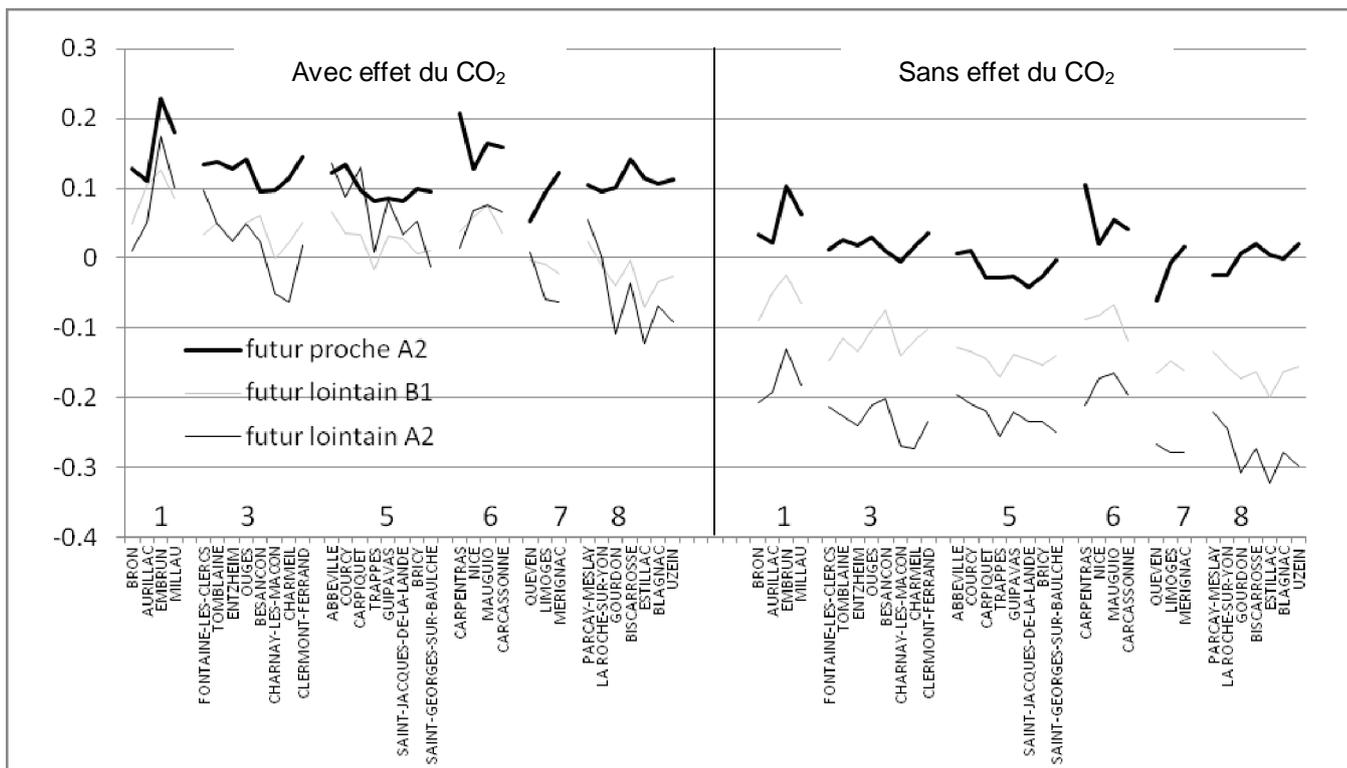
En prenant en compte l'effet du CO<sub>2</sub> (Figure 4, à gauche), il y a augmentation des rendements (10 à 20 % selon stations) dans le futur proche, et augmentation plus faible voire diminution (une dizaine de stations) dans le futur lointain avec des écarts plus forts en A2 qu'en B1. Les diminutions de rendements observées peuvent être expliquées par l'augmentation de l'ETP qui provient elle-même de celle la température, accentuant le stress hydrique. Dans le Sud-Ouest (Gourdon, Agen, Toulouse et Pau), où les augmentations de température sont particulièrement fortes (classe 8 de l'AFMS), les rendements sont également diminués par les effets défavorables des températures trop élevées (*cf.* Tableau 3). Notons néanmoins que ces effets sont rares : les températures moyennes sont rarement au-dessus du seuil de 25°C défavorable à la croissance végétale et exceptionnellement au-dessus du seuil de 30°C qui bloque toutes les fonctions (non illustré).

Si on ignore l'effet du CO<sub>2</sub> (Figure 4, à droite), le sens des résultats est opposé :

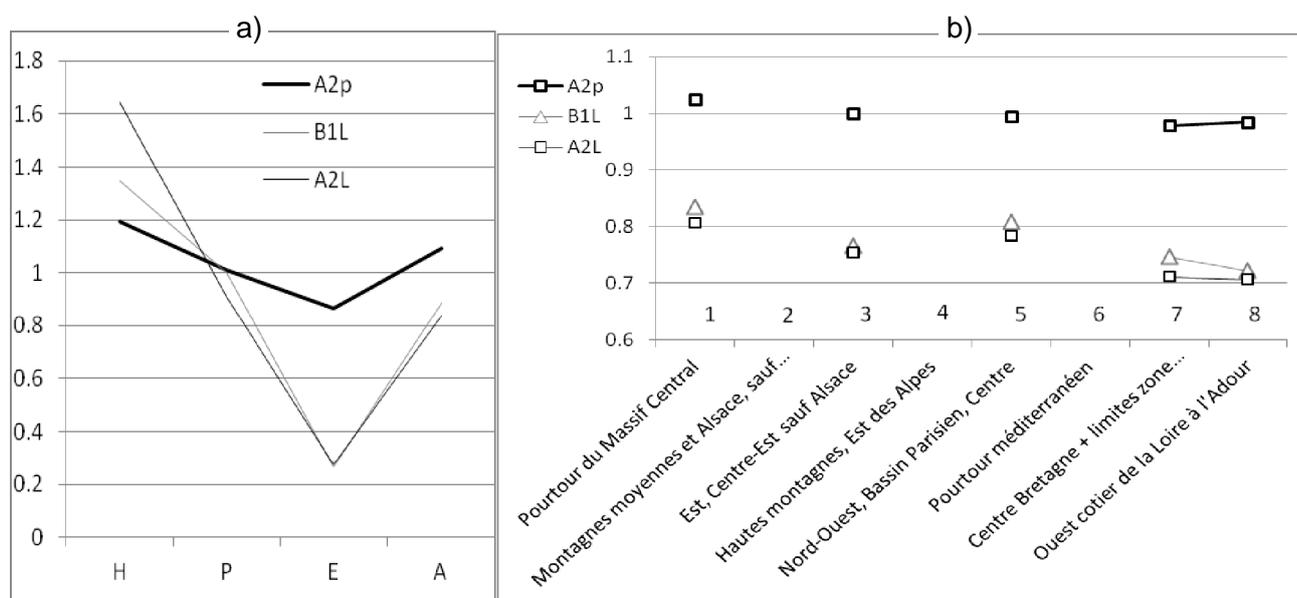
- il n'y a qu'une légère augmentation des rendements dans le futur proche et dans le Sud-Est, à Montpellier, Carpentras et Embrun, probablement grâce aux accroissements de températures hivernales avec un impact limité au printemps car ils deviennent plus secs.

- quel que soit le lieu et le scénario, les rendements estimés diminuent toujours dans le futur lointain.

**FIGURE 4 – Variations du rendement annuel de la prairie** (moyenne sur 27 ans, en variation relative par rapport au rendement local présent (similaire aux "anomalies" climatiques) **par station, pour 3 séries climatiques, avec ou sans prise en compte de l'effet du CO<sub>2</sub>.**



**FIGURE 5 – Rendement de la prairie a) selon la saison** (moyenne de 10 stations : Saint Quentin, Nancy, Besançon, Mâcon, Caen, Rennes, La Roche-sur-Yon, Limoges, Aurillac, Pau), **b) selon la zone AFMS** (d'après l'analyse des dynamiques de production journalière. Stations de chaque classe : classe 1 : Aurillac, classe 3 : Saint Quentin, Nancy, Besançon, Mâcon, classe 5 : Caen Rennes, classe 7 : Limoges, classe 8 : La Roche-sur-Yon, Pau).



La représentation saisonnière, en moyenne de 10 stations où les dynamiques ont été analysées, permet de montrer que la production estivale diminue pour tous les scénarios (Figure 5a), même quand la production annuelle ne diminue pas (scénario A2p en Figure 5b). Au contraire, la production hivernale augmente toujours (Figure 5a), mais en faible proportion, ce qui ne peut représenter que de faibles quantités.

La forte diminution de la production estivale dans le futur lointain (Figure 5a) peut être expliquée par la diminution des précipitations, tandis que l'augmentation de température n'est défavorable que dans les cas extrêmes (forte augmentation de température du quart Sud-Ouest).

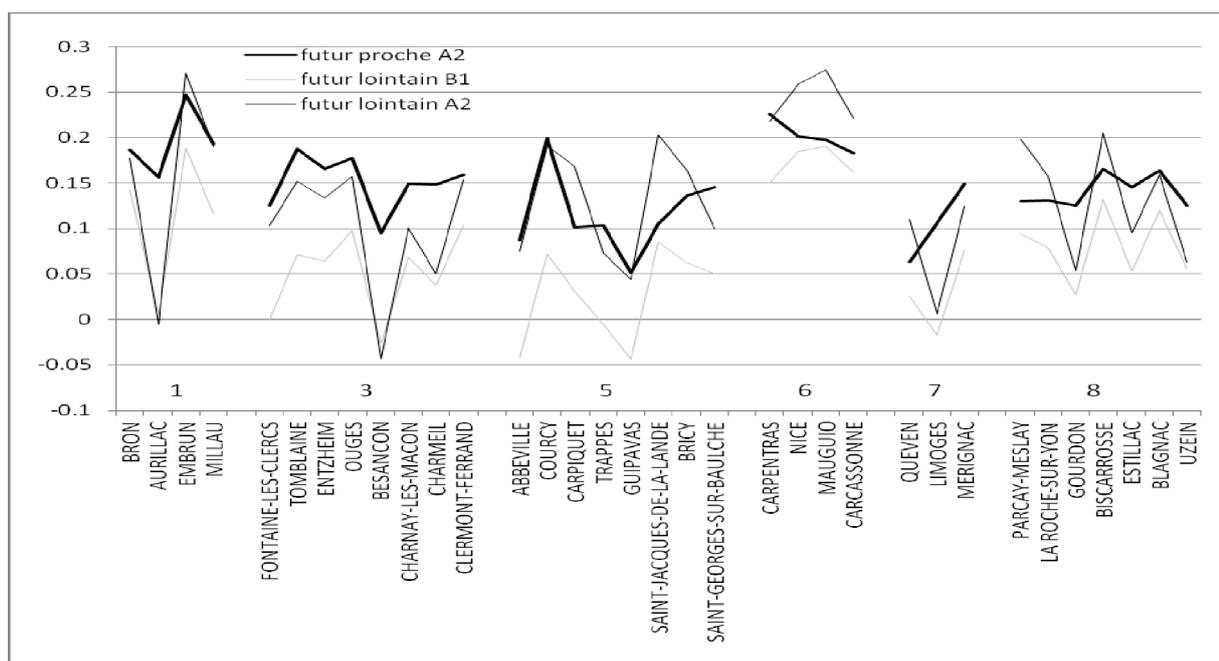
### - Production du maïs

Il y a toujours augmentation des rendements du maïs (RUGET *et al.*, 2012a, non illustré ici) car les semis sont avancés de 2 à 4 semaines (les plus tardifs, correspondant aux régions plus froides, sont moins avancés), comme on le constate dans la pratique depuis une quarantaine d'années. Les variétés employées sont plus tardives de 2 groupes de précocité, donc adaptées aux nouvelles conditions. L'augmentation de rendement se réduit dans le futur lointain en conditions non irriguées, surtout dans la moitié Ouest à cause de la réduction des précipitations sur la zone océanique (classes 5 et 8).

### - Production de la luzerne

Avec prise en compte des effets du CO<sub>2</sub> (Figure 6), il y a presque toujours une augmentation de production, quels que soient l'échéance et le scénario : dans seulement 4 cas (sur 34 stations), la production est légèrement diminuée, et très faiblement, dans le futur lointain ; c'est le cas à Abbeville, Brest, Limoges, Aurillac, Besançon, caractérisées par un climat humide qui favorise les rendements, même actuellement.

**FIGURE 6 – Variations du rendement annuel de la luzerne** (moyenne sur 27 ans par station), pour 3 séries climatiques.



La différence de comportement entre luzerne et graminées subsisterait - le climat serait plus favorable dans le futur lointain pour la luzerne que pour les graminées (*cf.* RUGET *et al.*, 2012a) ; cette différence serait liée à l'absence de stress azoté chez la luzerne au printemps, période potentiellement très productive (car sans stress hydrique), grâce à la fixation symbiotique, tandis que les graminées subiraient un stress azoté à cette période, qui pourrait ne pas être défavorable avec une fertilisation plus élevée.

### 2.3. Cohérence des estimations ACTA-CC avec les résultats de Climator : quelles similitudes, quelles différences et pourquoi ?

Les climats sont comparés en termes de température moyenne annuelle et de précipitations pour 6 stations très voisines et 3 un peu plus éloignées.

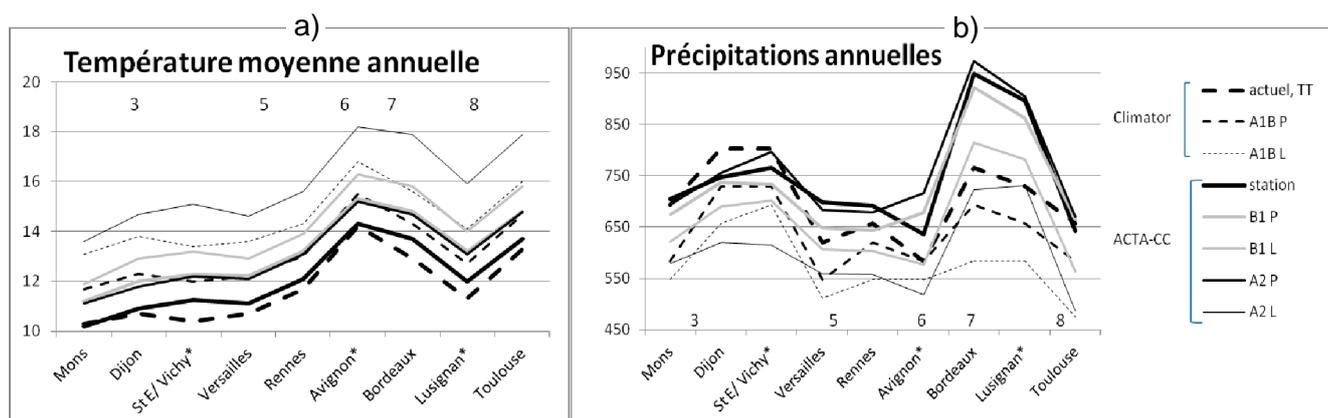
## - Analyse des évolutions climatiques

### \* Température et précipitations

Dans le futur proche, il apparaît peu de différences entre les deux études pour chacun des 3 scénarios. Dans le futur lointain, la température est sensiblement plus élevée dans le scénario A2 (toutes stations) que pour les autres scénarios.

Les analyses de la répartition spatiale des changements de précipitations (TERRAY *et al.*, 2010) avec Climator sont assez semblables à celles de l'étude ACTA-CC (POISSON, 2009), avec par exemple une augmentation des pluies hivernales dans le Sud-Est. La Figure 7 illustre les températures moyennes et des précipitations cumulées annuelles pour les différentes échéances dans les stations communes (ou proches). Les précipitations paraissent sensiblement plus fortes dans ACTA-CC que dans Climator, pour toutes les échéances et les lieux, même dans le présent (rôle de la désagrégation (Climator) ou de la localisation précise des stations observées (ACTA-CC) ?). De plus, elle sont également plus variables entre échéances pour certaines stations dans ACTA-CC que dans Climator.

**FIGURE 7 – Températures moyennes annuelles (a) et précipitations annuelles cumulées (b) pour les 9 sites communs aux 2 études et pour les différents scénarios.** En trait plein : ACTA-CC (noir épais : "station", passé récent (1980-2006), noir : A2, gris : B1, trait moyen : futur proche, P (2020-2046), trait fin : futur lointain, L (2070-2100)). En pointillés : Climator (trait épais : passé récent (nommé actuel TT), trait moyen : scénario A1B P, futur proche (2020-2046), trait fin : futur lointain, L (2070-2100)). ACTA données recalculées avec anomalies, Climator données du livre vert chapitre A1. L'astérisque signale les stations appariées bien que non situées dans la même agglomération.



### \* Rayonnement

TERRAY *et al.* (2010) signalent une petite différence de rayonnement (environ  $10 \text{ W/m}^2$  en moyenne annuelle par jour pour toutes les stations entre chacune des échéances) soit environ 7 % entre chacune des périodes. Cette différence est proche de celle d'environ 10 % calculée sur les rayonnements moyens des mois d'été des mêmes séries entre le présent et le futur lointain. Cette augmentation devrait entraîner une augmentation du même ordre de grandeur des productions journalières. Aucune différence n'a été signalée ni appliquée dans l'étude ACTA-CC, alors que la différence citée a été prise en compte dans Climator.

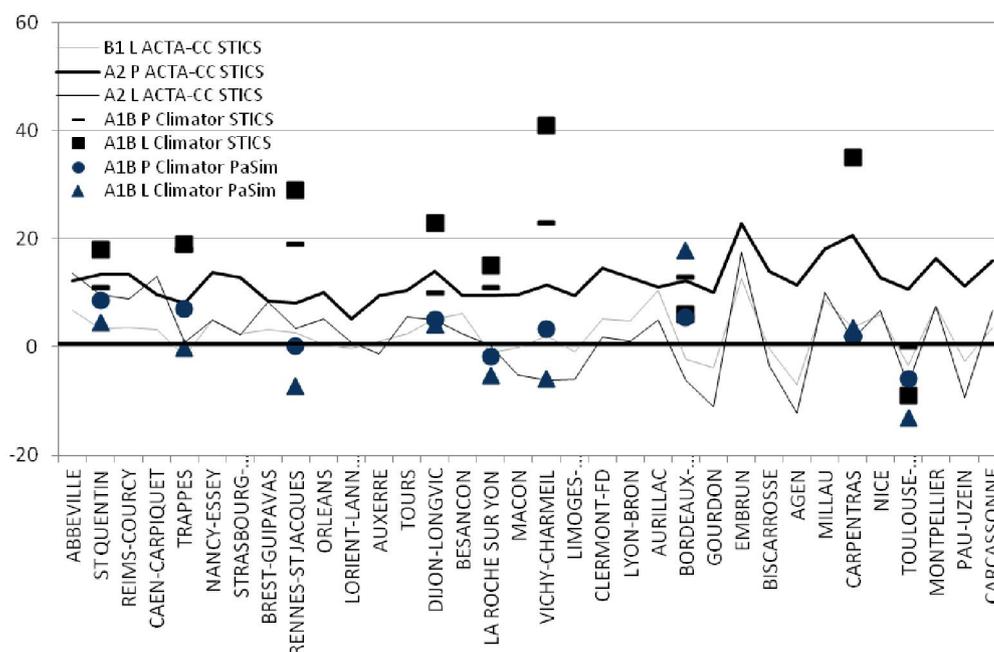
En conclusion, pour ce qui est du climat, les grandes tendances des changements sont communes : il s'agit de l'augmentation des températures, surtout les maximales et surtout l'été, ainsi que d'une diminution des précipitations, surtout nette dans le futur lointain. Dans le futur proche, il y a parfois peu de changement (- de 10 %), mais seulement une préfiguration du futur avec un début de diminution des précipitations estivales.

Finalement, le scénario utilisé dans ACTA-CC le plus comparable au scénario de Climator est le scénario B1, qu'il s'agisse des températures ou des précipitations. Ce résultat est cohérent avec les émissions de GES prévues dans chacun de ces scénarios (IPCC, 2007 non illustré). Par conséquent, c'est le scénario B1 qui sera utilisé pour la comparaison des productions faites avec STICS dans ACTA-CC et Climator pour le futur lointain.

## - Analyse des évolutions de productions annuelles

Avec STICS et dans l'étude Climator (DURAND *et al.*, 2010), on observe une augmentation très nette de la production de la fétuque dans les futurs proche et lointain, qu'il s'agisse de moyennes entre stations ou de résultats locaux. Pour le ray-grass, l'augmentation est beaucoup plus faible. Dans cette même étude, PaSim prévoit une augmentation de la production dans le futur proche plus faible que celle de STICS pour la fétuque et pour le ray-grass. Dans le futur lointain, la production fourragère simulée par PaSim est inférieure à la production du futur proche et même de la période actuelle dans 4 des sites étudiés ici.

**FIGURE 8 – Variations relatives des rendements de prairie dans les différents climats en fonction des rendements dans le passé récent** (lignes continues : ACTA-CC, sol profond, pas de frein à l'infiltration ; points : Climator, sol profond, faible frein à l'infiltration).



La comparaison des variations de rendements annuels cumulés estimés par STICS dans Climator et dans ACTA-CC pour les stations semblables ou voisines fait apparaître des variations systématiquement plus fortes dans Climator que dans ACTA-CC. Les variations de rendements sont même toujours positives dans Climator sauf dans un cas (Toulouse), alors qu'elles sont souvent négatives (par rapport au présent) dans le futur lointain pour ACTA-CC. La différence la plus importante entre les résultats d'ACTA-CC et ceux de Climator est le sens de variation des rendements entre le futur proche et lointain : tandis que, dans ACTA-CC, le rendement, qui a d'abord augmenté dans le futur proche, diminue dans le futur lointain par rapport au futur proche et peut même diminuer par rapport au présent, les rendements augmentent encore plus dans le futur lointain dans Climator.

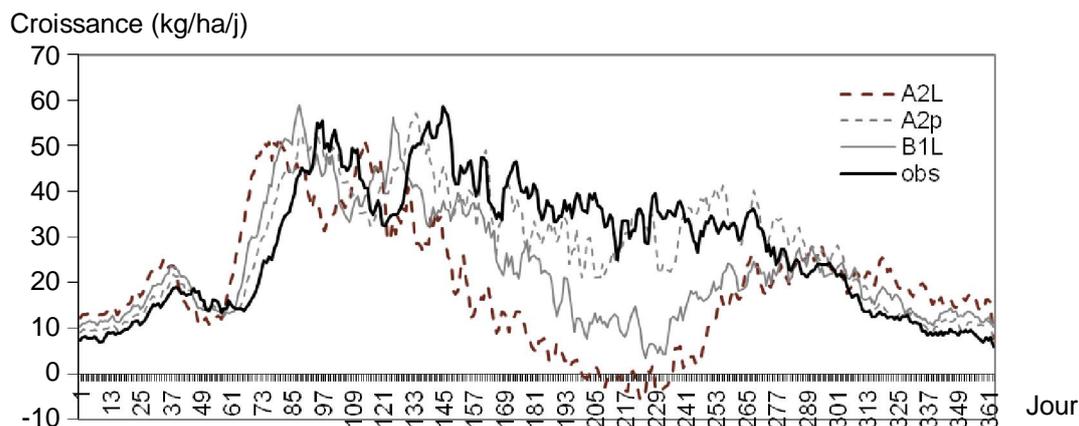
Les productions annuelles estimées par PaSim Climator suivent des évolutions un peu plus proches de celles de STICS - ACTA-CC que de STICS - Climator. Sauf pour Bordeaux, dont la production augmente encore dans le futur lointain, la production diminue toujours entre le futur proche et le futur lointain et souvent aussi par rapport au passé récent. Pour PaSim, comme pour STICS - ACTA-CC, les productions sont généralement sensiblement diminuées dans le futur lointain pour le scénario A2 (non représenté). Toujours pour les cumuls annuels de production obtenus avec PaSim, les différences entre espèces (fétuque et ray-grass) sont peu importantes. Le choix de la méthode de régionalisation (QQ ou anomalies) dans le cas du scénario A1B influe peu sur l'ordre de grandeur des cumuls annuels de production dans le futur. Mais les sens d'évolution sont souvent inverses entre les 2 méthodes de désagrégation dans le futur lointain.

Pour le maïs, les résultats de Climator sont contradictoires avec ceux d'ACTA-CC : l'absence d'augmentation de rendement dans le cas de Climator peut être reliée à l'absence d'adaptation des pratiques (date de semis fixe et pas de changement de variété).

## - Croissance journalière (prairies de graminées)

La dynamique de croissance, illustrée Figure 9, montre les grandes étapes de la production au cours de l'année. Le changement de la dynamique de production est systématique pour tous les jeux de simulation ; il se retrouve dans les 3 jeux de simulation ACTA-CC/STICS, Climator/STICS (RUGET *et al.*, 2012a et b ; DURAND *et al.* 2010) et dans une moindre mesure dans Climator/PaSim (GRAUX *et al.*, 2013). Il peut être décliné pour chacune des 3 grandes périodes de la production :

**FIGURE 9 – Evolution de la production journalière d'une prairie de graminées en situation actuelle (obs) et dans les 3 séries climatiques (exemple de Pau).**



- **Au printemps : la production est plus précoce**, à cause de l'élévation de température, qui accélère le développement et la mise en place des feuilles mais aussi augmente la production primaire (STICS). Dans le futur proche, production printanière journalière et cumulée sont augmentées, que ce soit avec STICS (dans les 2 études) ou avec PaSim. Ces faits sont d'autant plus marqués dans STICS-ACTA-CC que la réduction de précipitations, sensible seulement pour le futur lointain en A2 dans la moitié ouest (zones 7 et 8) et le pourtour méditerranéen (Figure 3), reste à un niveau faible par rapport à celle de l'été ; ce déficit peut être compensé par l'effet réducteur de transpiration du CO<sub>2</sub>. Aucun stress hydrique n'apparaît donc au printemps avec STICS, quel que soit le rythme des utilisations printanières. Dans le futur lointain, même si la production est encore plus précoce, la production printanière cumulée diminue (par rapport au présent) en scénario B1, sauf à Rennes, Caen, Nancy et Saint Quentin, et plus nettement en scénario A2. Avec PaSim, la production printanière est stimulée dans le futur lointain, sous réserve d'une disponibilité des ressources en eau (réserve des sols, pluviométrie) suffisante à cette période (GRAUX *et al.*, 2013).

- **En été : creux estival accentué, quel que soit le lieu, pour STICS** : à toutes les échéances, quel que soit le scénario, la production estivale est nettement diminuée par rapport au présent, que ce soit dans ACTA-CC pour les 10 stations étudiées ou dans Climator (une seule dynamique étudiée : Rennes).

Avec le scénario A2L (en moyenne sur 27 ans), dans l'étude ACTA-CC, une période à production journalière nulle existe dans la plupart des lieux dont la production journalière a été analysée ; cette période est assez courte en moyenne montagne (Besançon, Aurillac) et plus forte dans la zone Sud-Ouest (La Roche-sur-Yon, Limoges, Pau, zone 8 et même Rennes, zone 7), où les précipitations estivales sont particulièrement réduites (Figure 3), et à Mâcon (extension de la zone 6, région méditerranéenne, comme le suggèrent LELIEVRE *et al.*, 2011). À Caen, Nancy et Saint-Quentin, la production moyenne journalière devient très faible sans atteindre une valeur nulle.

Pour PaSim, dans la plupart des cas, la production estivale se maintient à des niveaux de production non significativement différents des niveaux actuels, mais pourrait chuter dans le futur lointain, jusqu'à -30% ou -40% de la production actuelle, dans des conditions d'extrême aridité, selon la classification de E. de Martonne (GRAUX *et al.*, 2013).

- **En hiver, l'existence d'une pousse hivernale** est mise en évidence dans toutes les études. Même si le pourcentage d'augmentation (Figure 5) est fort, le tonnage représenté est assez faible. De plus, les estimations sont incertaines, car elles dépendent beaucoup des seuils thermiques fixés pour le développement et la croissance à basse température, qui sont à la fois mal connus et peuvent évoluer avec les espèces et variétés cultivées (résistance à la sécheresse et sensibilité au froid, *cf.*

DURAND *et al.*, dans ce document). Donc, si une augmentation de production est indéniable, son ampleur est incertaine. Sans permettre la constitution de stocks, cette augmentation pourra néanmoins réduire les besoins des stocks d'hiver. C'est en zone méditerranéenne (où les températures hivernales deviennent vraiment favorables) que la pousse hivernale acquiert le plus d'importance, d'autant moins négligeable que celle d'été est faible.

Une caractéristique importante des évolutions de production est la durée des périodes où l'on doit recourir aux stocks. MOREAU *et al.* (2009) ont suggéré une définition des saisons par les vitesses journalières de production et la possibilité de satisfaire les besoins du troupeau sans stocks. Plus récemment, SAUTIER *et al.* (cet ouvrage) définissent à l'échelle annuelle la durée des saisons fourragères à partir de l'analyse des profils de croissance de l'herbe en comparaison des besoins d'un troupeau, durée qui pourrait varier largement dans le futur. Le positionnement des périodes où les animaux sont affouragés en complément de l'herbe pâturée pourrait varier largement dans le futur, avec une redistribution possible en été des fourrages conservés, habituellement stockés pour l'alimentation hivernale (GRAUX *et al.*, 2013) : les besoins de l'hiver diminueraient (pâturage plus tardif à l'automne et plus précoce au printemps) tandis que ceux d'été augmenteraient (apparition ou allongement de la période d'alimentation sur stocks). Les durées de ces différentes périodes seront un terme d'analyse important des systèmes futurs.

### **3. Discussion : convergences et divergences entre les 4 approches (STICS ACTA/STICS-Climator fétuque/STICS ray-grass/PaSim fétuque)**

Des points d'accord apparaissent entre tous les jeux de simulation : i) l'augmentation de production dans le futur proche, qui peut être reliée à l'augmentation modérée de température et à la stabilité des précipitations, et ii) l'évolution saisonnière de la production journalière est semblable pour tous.

Du point de vue de l'évolution saisonnière, il y a :

- augmentation de la production en période froide, c'est-à-dire en hiver et au début de printemps, à cause de l'augmentation de température, ce qui conduit à une avance de la production printanière. Cet avantage est particulièrement sensible dans les zones où l'hiver est doux, c'est-à-dire où une petite augmentation de température permet d'atteindre des températures où la production devient non négligeable, comme en zone méditerranéenne ;

- diminution de la production en période estivale, d'abord à cause de l'augmentation du stress hydrique, lié à l'augmentation d'ETP (elle-même liée à l'augmentation de température) puis à la diminution significative des précipitations (partout dans le futur lointain) et, enfin, dans les cas les plus pessimistes, à l'augmentation des températures, qui atteignent des gammes où leur effet devient néfaste ;

- allongement ou apparition d'une période non productive en été pouvant se poursuivre en début d'automne. Cet effet est moins net avec PaSim, où la diminution estivale de production n'est pas toujours significative, sauf dans le futur lointain en conditions de forte aridité. Mais l'absence de netteté de l'effet provient sans doute de la multiplicité des conditions traitées (scénarios, régionalisation, pratiques, sols... ; GRAUX *et al.*, 2013) et incite à relativiser encore les variations observées. Les origines des différences observées entre STICS-ACTA-CC et PaSim-Climator n'ont pas été recherchées, en raison des multiples sources possibles, dont les principes de modèles (*cf.* GRAUX *et al.*, dans ce document).

A une échelle plus globale, ces résultats sont cohérents avec ceux - moins nuancés - obtenus pour l'ensemble de l'Europe par des indices agroclimatiques par TRNKA *et al.* (2011) qui montrent, dans nos régions, à échéance de 2030, une augmentation de la sécheresse estivale, accompagnée d'un raccourcissement de la saison productive, particulièrement dans les régions les plus méridionales.

Un désaccord important entre les résultats des 2 études se maintient sur le sens de variation des rendements estimés avec STICS dans le futur lointain : dans ACTA-CC, il y a une fréquence importante de stations où le rendement des prairies diminue dans le futur lointain, tandis que, dans Climator, les rendements augmentent toujours plus dans le futur.

Une première constatation sur les résultats de STICS est que, quand le changement climatique devient plus marqué, dans le lointain, les productions sont plus faibles que dans le présent, même dans Climator : une diminution est vue dans Climator précisément dans les stations et les zones où les augmentations de températures sont les plus fortes (Bordeaux, Toulouse, ce qui correspond à la

zone côtière de l'Ouest). On pourrait donc interpréter les différences apparentes comme une différence d'équilibre entre facteurs favorables et défavorables, avec une évolution à plus ou moins long terme vers des situations défavorables.

La divergence actuelle des résultats de STICS entre les 2 études peut être reliée à quelques différences qui existent entre les 2 jeux de simulation. Une première raison si l'on compare A2 à A1B est l'anomalie de température projetée beaucoup plus forte (échauffement approximativement deux fois plus fort). Avec de telles valeurs, les stress tant hydriques que thermiques pris en compte par STICS peuvent fortement limiter le rendement annuel, ce qui explique le sens de variation très différent des productions en A1B et A2 dans le futur lointain. La seconde raison - qui peut expliquer la différence entre A1B de Climator et B1 d'ACTA-CC dont les températures sont proches - pourrait être l'évolution du rayonnement présente dans le climat de Climator ; en effet, l'augmentation du rayonnement doit avoir comme conséquence une augmentation presque proportionnelle du rendement, ce qui réduirait sensiblement les écarts entre les résultats des 2 études.

La fertilisation élevée dans Climator (quatre fois plus que dans ACTA-CC) minimise l'augmentation du stress azoté engendré par l'augmentation de la production potentielle, donc autorise une production plus élevée.

Une autre différence imprévue entre résultats de STICS dans les 2 études vient de la propriété de macroporosité du sol, qui s'accompagne d'une valeur d'infiltrabilité : l'emploi de cette option dans Climator fait que l'eau séjourne plus longtemps dans le sol, ce qui a deux conséquences. La première est que le sol est moins vite drainé, ce qui laisse plus d'eau disponible pour la culture ; cet effet est visible sur les niveaux de stress hydrique, un peu plus faibles dans Climator que dans ACTA-CC et a pour conséquence une augmentation de production. La seconde est que le sol est aussi plus souvent engorgé, donc en état d'anoxie, et cette propriété pourrait expliquer une grande partie des réductions de rendement observées sur ray-grass, puisqu'il est sensible à l'anoxie.

Enfin, la production estimée dans Climator est perturbée par un événement non souhaité lié au paramétrage du modèle : la fabrication de nouvelles feuilles ne se produit plus lorsqu'un certain stade a été atteint. Seule la coupe permet au couvert de fabriquer de nouvelles feuilles et de "redémarrer". Si aucune coupe ne peut être faite (production ralentie à cause de la sécheresse) pendant un temps assez long, il se peut que toute la matière sèche présente disparaisse par sénescence et que le cycle de la plante soit terminé, donc que le couvert meure, ce qui entraîne une production nulle jusqu'au semis suivant... donc pendant plusieurs années puisque le couvert n'est installé que tous les 5 ans. Ce défaut, dont les occurrences et les conséquences n'ont pas été estimées, diminue les productions de Climator, ce qui réduit l'écart entre Climator et ACTA-CC ; son impact n'a pas été estimé.

En conclusion, **plusieurs différences expliquent le comportement plus "optimiste"** (augmentation continue de la production) **constaté dans Climator avec STICS**. En effet, plusieurs conditions sont plus favorables dans Climator que dans ACTA-CC : l'élévation plus modeste des températures, l'augmentation du rayonnement, la fertilisation azotée choisie plus élevée, ainsi que le maintien de l'eau dans le sol grâce à une infiltrabilité ralentie qui réduit le stress hydrique.

## Conclusion

L'augmentation modérée de la production à moyen terme dans la plupart des situations peut rendre optimiste, mais il est important de souligner qu'elle est beaucoup plus incertaine dans le futur lointain pour les raisons suivantes : l'augmentation dans le futur s'appuie essentiellement sur l'effet positif du CO<sub>2</sub> sur la production (à peu près sûr) et sur la diminution de transpiration, dont les conséquences sur l'ensemble d'un cycle de culture sont moins sûres (échauffement de la plante, vieillissement plus rapide ?), ce qui rend ces prévisions moins certaines. De plus, **les prévisions climatiques vont vers des températures plus hautes qui, au-delà d'un certain seuil, deviennent défavorables** : à terme, **malgré les effets positifs du CO<sub>2</sub>**, les facteurs négatifs doivent l'emporter.

Les changements sont donc différents selon les régions : les diminutions annuelles de production interviendront plus ou moins tôt. Elles peuvent être mises en relation avec les diminutions de précipitations. Diminutions de précipitations et de production annuelle seront plus fortes pour toute la moitié Ouest, ces diminutions seront accentuées par les températures défavorables dans le quart Sud-Ouest. Le quart Sud-Ouest (classe 8) devrait être touché plus tôt, à cause des augmentations de températures, qui y atteignent des valeurs défavorables plus tôt qu'ailleurs.

A court terme, si la production annuelle augmente dans toutes les régions, des diminutions ont déjà lieu en été et - même si elles sont faibles - sont déjà systématiques pour STICS, dans toutes les régions. Ce qui est commun à toutes les régions et à toutes les échéances (quel que soit le scénario et les outils employés) est le **changement des calendriers de production, qui nécessitera la constitution généralisée de stocks pour l'été**, stocks dont l'usage interviendra de plus en plus tôt en saison (exemple des vaches laitières en Lorraine : RUGET *et al.*, 2012b). Ces changements peuvent aller jusqu'à des changements de type de fourrages, de dimensionnement de la sole fourragère, voire de changement d'ateliers (MARTIN *et al.*, 2012).

L'ensemble de ces résultats conduit essentiellement à constater qu'au-delà de l'aspect favorable sur les niveaux de production dans l'immédiat, des réductions de production se profilent à un terme plus ou moins éloigné. Ces éléments incitent à une grande vigilance par rapport à l'évolution du climat, de façon à préparer des réactions suffisamment précoces à ces effets défavorables.

## Références bibliographiques

- BETTS R.A. *et al.* (2007) : "Projected increase in continental runoff due to plant responses to increasing carbon dioxide." *Nature*, 448, 1037-1041.
- DURAND J.-L., BERNARD F., LARDY R., GRAUX A.-I. (2010) Changement climatique et prairie : l'essentiel des impacts, *Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le Livre Vert du projet CLIMATOR (2007-2010)*, N. Brisson, F. Levraut éd., ADÈME, 181-190.
- ESCOFFIER B., PAGÈS J., 1998. Analyses factorielles simples et multiples, DUNOD, Paris, 284 pp., 1998.
- 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.
- IPCC, 2007: *Climate Change: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the 4<sup>th</sup> Assessment, Report IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, UK & New York, 996 pp.,
- JONGMAN R.H.G., BUNCE R.G.H., METZGER M.J., MUCHER C.A., HOWARD D.C., MATEUS V.L. (2006) : Objectives and applications of a statistical environmental stratification of Europe, *Landscape Ecology*, 21, 409-419
- LELIEVRE F., SALA S., RUGET F., VOLAIRE F. (2011) : *Evolution du climat du Sud de la France 1950-2009*, Projet Climfourrel PSDR-3, Régions L-R, M-P, R-A. Série les Focus PSDR-3, 12p, <http://www1.montpellier.inra.fr/PSDR/?page=climfourrel&rub=realisation>.
- LONG S.P., AINSWORTH E.A., LEAKEY A.D.B., NÖSBERGER J., ORT D.R. (2006) : Food for thought: Lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO<sub>2</sub> concentrations, *Science*, 312, 1918-1921.
- MARTIN G., FELTEN B., MAGNE M.-A., PIQUET M., SAUTIER M., THEAU J. -P., THENARD V., DURU M. (2012) : Forage Rummy: A board game for developing forage system scenarios with livestock farmers and agricultural consultants, *Fourrages*, 210, 119-128.
- MOREAU J.-C., RUGET F., LACROIX B., LORGEOU J., GATE P., POISSON S., CLOPPET E., SOUVERAIN F. (2009) : *Changement climatique, Conséquences et enseignements pour les grandes cultures et l'élevage herbivore*. 22 oct. 2009, Paris, Recueil de communications, ACTA Institut de l'Élevage-Arvalis (ed.), 144 p.
- OLESEN J.E., TRNKA M., KERSEBAUM K.C., SKJELVAG A.O., SEGUIN B., PELTONEN-SAINIO P., ROSSI F., KOZYRA J., MICALE F. (2011) : Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change, *Eur. J. Agron.*, 34, 96-112.
- POISSON S. (2009) : Caractérisation des climats à venir, spatialisation sur le territoire français métropolitain et application en agronomie, *Changement climatique, Conséquences et enseignements pour les grandes cultures et l'élevage herbivore*. 22 oct. 2009, Paris, Moreau éd., ACTA Institut de l'Élevage-Arvalis (ed.), 59-69.
- RUGET F., MOREAU J.-C., FERRAND M., POISSON S., GATE P., LACROIX B., LORGEOU J., CLOPPET E., SOUVERAIN F. (2010) : 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/](http://www.adv-sci-res.net/4/99/2010/).
- RUGET F., CLASTRE P.; MOREAU J.C., CLOPPET E., SOUVERAIN F.; LACROIX B., LORGEOU J. (2012a) : Conséquences possibles des changements climatiques sur la production fourragère en France. I. Estimation par modélisation et analyse critique. *Fourrages*, 210, 87-98.
- RUGET F., CLASTRE P., MOREAU J.C., CLOPPET E., SOUVERAIN F., LACROIX B., LORGEOU J. (2012b) : Conséquences possibles des changements climatiques sur la production fourragère en France. II. Exemples de quelques systèmes d'élevage. *Fourrages*, 211, 243-251.
- SAUTIER M., MARTIN-CLOUAIRE R., PIQUET M., DURU M. (2013) : Caractérisation du changement et de la variabilité climatique en vue de l'adaptation des systèmes fourragers à base d'herbe, dans ce numéro.
- TERRAY L., PAGÉ C., DÉQUÉ M., FLÉCHER C. (2010) : L'évolution du climat en France au travers de quelques indicateurs agroclimatiques, *Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le Livre Vert du projet CLIMATOR*, N. Brisson, F. Levraut éd., ADÈME, 19-32.
- TRNKA M. J.E. *et al.* (2011) : Agroclimatic conditions in Europe under climate change, *Global Change Biology*, 17, 2298-3218.