

Prospective autour du changement climatique : adaptation de systèmes fourragers

MOREAU J.-C. (1), RUGET F. (2), FERRAND M. (1), SOUVERAIN F. (3), POISSON S. (1), LANNUZEL F. (1), LACROIX B. (4)

(1) Institut de l'élevage - BP18 - 31321 Castanet Tolosan Cedex - jean-christophe.moreau@inst-elevage.asso.fr

(2) UMR 1114 EMMAH - INRA, domaine Saint Paul - 84914 AVIGNON Cedex 9 - francoise.ruguet@avignon.inra.fr

(3) Météo France - division d'agrométéorologie - 42 Avenue G. Coriolis - 31057 Toulouse Cedex - franck.souverain@meteo.fr

(4) ARVALIS - Institut du végétal - 6 chemin de la côte vieille - 31450 Baziège - b.lacroix@arvalisinstitutduvegetal.fr

RESUME - Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet ACTA « Étude de la sensibilité des systèmes de grandes cultures et d'élevages herbivores aux changements climatiques », associant quatre partenaires : ARVALIS, l'INRA, l'Institut de l'élevage et Météo France. A partir des données climatiques simulées par Météo France à moyen (2020-2049) et long terme (2070-2099) selon deux scénarios sociodémographiques (A2 et B1) issus du quatrième rapport du groupe d'experts intergouvernemental (GIEC 4), des typologies de climat se basant sur des analyses multidimensionnelles spatialisées permettent de montrer la diversité géographique de l'évolution du climat au cours de ce siècle.

En parallèle à ces travaux, ont été menées des simulations utilisant le modèle de culture STICS pour évaluer les conséquences du changement climatique sur la production de biomasse de la luzerne, du maïs et de prairies à base de graminées. Ces simulations intègrent l'effet de l'enrichissement de l'atmosphère en CO₂ sur la photosynthèse et la transpiration. Par ailleurs, nous nous sommes penchés au travers du calcul de nombreux indicateurs agro-climatiques sur la disponibilité et l'accessibilité à ces ressources fourragères, et sur la fréquence de certains aléas climatiques.

En prenant appui sur des systèmes d'élevage caractéristiques de trois zones bien différentes quant à l'ampleur et l'impact du changement climatique tel que décrit dans le premier point (Lorraine, Bretagne, sud de l'Aquitaine), nous décrivons à l'aide de STICS les conséquences directes du changement climatique sur les cultures fourragères pratiquées dans ces systèmes, puis nous exposons comment les équilibres de ces systèmes sont modifiés. Avec l'appui des experts du dispositif « réseaux d'élevage » nous avons passé en revue des propositions permettant de revenir à des équilibres satisfaisants et sécurisés.

Forward-looking around the climate change: adaptation of fodder systems

MOREAU J.-C. (1), RUGET F. (2), FERRAND M. (1), SOUVERAIN F. (3), POISSON S. (1), LANNUZEL F. (1), LACROIX B. (4)

(1) Institut de l'Élevage - BP18- 31321 Castanet Tolosan Cedex - jean-christophe.moreau@inst-elevage.asso.fr

SUMMARY - This study is part of the ACTA project about the sensitivity of cash crop and livestock systems to climate change, which is implemented by four partners: ARVALIS, INRA, the Institut de l'Élevage and Météo-France. According to two scenarios for socio-demographic development (A2 and B1) from the 4th report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 4), simulated climatic data were calculated by Météo-France for the near (2020-2049) and distant (2070-2099) future. We describe the geographical variety of the evolution of climate during this century using multidimensional spatialised analysis.

Growth simulations were made using the STICS crop model to estimate the consequences of climate change on level and dates of production of alfalfa, silage maize and forage grass. These simulations take into account the effect of atmospheric CO₂ enrichment on photosynthesis and transpiration. Many agro-climatic indicators on the availability and accessibility to these forage resources supplement the study of the consequences of climate change.

We explain using STICS simulation results for farming systems in three very different areas how the balance of these systems, that is the extent and impact of climate change (Lorraine, Brittany, South of Aquitaine), will be disrupted. We sketch proposals that will make it possible to reach a new steady state using support from the experts of the "network of reference farms".

INTRODUCTION

Le nouveau rapport du GIEC (GIEC, 2007) indique une augmentation des températures terrestres de 0,74°C depuis la fin du XIX^{ème} siècle et de la concentration en CO₂ de 280 ppm à 360 ppm depuis la fin de l'ère préindustrielle. Toutes les projections climatiques concluent que les évolutions amorcées s'amplifieront dans l'avenir et conduiront, en l'absence de mesure de maîtrise des augmentations de gaz à effet de serre, à des élévations des températures et des modifications des régimes des précipitations. L'impact de ce changement sur la production agricole peut facilement s'imaginer sur la durée des cycles des cultures et les dates de récolte, mais aussi sur la pression en adventices, maladies et ravageurs ainsi que sur les besoins et la disponibilité en eau. Les impacts directs liés à l'enrichissement en CO₂ de l'atmosphère sont aussi à prendre en compte. L'ampleur de ces changements justifie des travaux de prospective par la recherche agronomique et les instituts techniques sur les voies d'adaptation des systèmes de culture et d'élevage au travers des évolutions des assolements et des itinéraires techniques. C'est pour prendre en charge cette problématique que ARVALIS – Institut du végétal et l'Institut de l'élevage ont

proposé, avec la collaboration de l'INRA et de Météo France, de travailler ce sujet lors d'un appel d'offres du ministère de l'agriculture via le conseil d'orientation scientifique et technique de l'ACTA (association de coordination des instituts techniques agricoles). Les conclusions de cette étude seront remises en mai 2009.

1. MATERIEL ET METHODES

Parmi ceux développés par le GIEC, deux scénarios de développement économique, technique et démographique de la planète ont été retenus : le scénario A2, dans lequel les émissions de GES sont insuffisamment maîtrisées et aboutissent à un taux de CO₂ dans l'atmosphère de près de 800 ppm à la fin de ce siècle, et le scénario B1, dans lequel un important effort de maîtrise aboutirait à un taux un important effort de maîtrise aboutirait à un taux d'environ 550 ppm seulement (360 actuellement). Ces scénarios et les émissions de GES qui s'y rapportent sont intégrés dans les modèles de simulation de climat de divers laboratoires du monde entier. En France, coexistent deux modèles, celui de l'IPSL (institut Pierre-Simon Laplace) et celui du CNRM (Météo France). Nous utilisons les résultats du modèle ARPEGE de ce dernier.

Météo France a fourni les données climatiques simulées avec ces deux scénarios pour chaque jour des trois périodes ciblées : une période de référence allant de 1980 à 2006, le futur proche (2020-2049), et le futur lointain (2070-2099). Ces données concernent, pour la France, des mailles d'environ 50 km de côté (235 points pour l'ensemble du territoire), dites mailles Arpège dans la suite du texte. De plus, Météo France a mis à notre disposition des données observées sur la période 1980-2006 dans trente-quatre stations météorologiques réparties sur l'ensemble de la France métropolitaine. Les variables retenues (données journalières observées et simulées) sont les températures mini et maxi, l'humidité relative, le vent, le rayonnement (Rg), les précipitations et l'ETP (évapotranspiration potentielle calculée par Météo France selon une équation dérivée de celle de Penman-Monteith).

1.1. ANALYSES DISCRIMINANTES

Le changement climatique a été caractérisé à l'aide de méthodes d'analyses multidimensionnelles. Une analyse factorielle multiple permet de discriminer les unités élémentaires, ici les mailles Arpège, selon les variables préalablement choisies pour représenter le climat. Elle permet de définir des « axes factoriels ». Une classification ascendante hiérarchique des mailles avec agrégation selon le critère de WARD est ensuite réalisée sur l'ensemble des axes factoriels et une typologie est proposée par coupure optimale de l'arbre construit. Les proximités entre centres de mailles ont été prises en compte en intégrant dans l'AFM un bloc « spatial » constitué des coordonnées Lambert de ces points.

1.2. STICS

STICS, (Simulateur multidisciplinaire pour les cultures standard, Brisson *et al.*, 1998) a été utilisé pour simuler l'effet du climat et du CO₂ sur la croissance et la production de la luzerne, du maïs et d'une prairie à base de graminées. C'est un modèle générique de fonctionnement des cultures développé depuis 1996 à l'unité de bioclimatologie de l'INRA d'Avignon. Il est possible de simuler l'effet de l'augmentation du taux de CO₂ atmosphérique sur la production et la consommation d'eau (modification de la conductance stomatique prise en compte dans une option de calcul spécifique, dite "modèle résistif", qui gère tous les échanges gazeux (gaz carbonique et eau) de la plante avec l'atmosphère, selon des résistances). STICS estime chaque jour l'évolution des productions, ainsi que des stress en eau et en azote et des consommations et pertes (drainage, lessivage) associées. Les dates auxquelles sont obtenues les productions sont aussi des variables de sortie.

Pour les prairies, STICS tient compte des techniques spécifiques liées à l'existence de coupes multiples et à la pérennité du couvert (Ruguet *et al.*, 2006). Les dates de récolte peuvent être commandées par l'atteinte de sommes de températures prédéfinies, mais peuvent aussi être fixées. Ces dates peuvent être repoussées si la matière sèche ou l'indice foliaire présents sont inférieurs à ceux qui doivent être présents pour assurer son redémarrage après la coupe. STICS nécessite en entrées le climat quotidien, les caractéristiques physiologiques de la plante choisie, des caractéristiques de sol (réserve en eau, azote organique) l'état initial de la culture et du sol, et des informations sur les techniques (choix de variété, dates des interventions, apports d'eau et d'engrais azoté, coupe ou récolte).

1.3. CONDITIONS DE SIMULATIONS SICC (SPATIALISATION DE L'INCIDENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE)

En ce qui concerne le climat, les séries futures ne sont pas utilisées telles quelles : des anomalies (différences ou rapports entre les climats simulés futurs et présents moyennés sur des périodes de vingt-sept ans) ont été calculées pour chaque jour de l'année (Brisson *et al.*, 2005), en moyenne glissante sur les trente jours entourant le jour à calculer, de manière à éviter les effets de seuil qu'on aurait en calculant des anomalies par mois calendaire. Ces anomalies sont appliquées au climat journalier présent réel, pour donner des séries futures comparables aux séries présentes. Elles ont l'inconvénient de conserver la variabilité du climat actuel (nombre de jours de pluie, ...)

Pour la physiologie de la plante, des formalismes ont été ajoutés récemment de façon à mieux reproduire l'effet de températures élevées sur le développement et la croissance, ou le remplissage des grains. Dans la mesure du possible, des valeurs logiques et cohérentes ont été attribuées aux nouveaux paramètres correspondant à ces fonctions, mais les travaux sur ces sujets sont peu nombreux. Pour la luzerne, les caractéristiques de plante ont été définies dans le cadre de ce projet (Ruguet, Abdessemed, Moreau, 2008). Pour les graminées productives (dactyle-fétuque) et le maïs, ces caractéristiques ont été testées et améliorées en vue d'obtenir des jeux de paramètres satisfaisants dans une grande gamme de conditions de milieu.

Pour les sols, les fourrages sont simulés sur deux sols de profondeurs différentes, l'un à faible, l'autre à forte réserve utile (respectivement 66 et 208 mm) et le maïs est simulé sur trois sols, à 105, 208 et 271 mm de réserve. Les conditions initiales sont un couvert établi et une réserve hydrique pleine en début de simulation (chaque année) pour les fourrages, une réserve hydrique au tiers pleine le 1^{er} août précédent le semis pour le maïs, de façon à tenir compte de la possibilité d'un remplissage incomplet de la réserve hydrique au cours de l'hiver.

Les techniques de culture constituent dans ce projet la partie la plus élaborée des données d'entrée. Pour la luzerne et la prairie, nous avons simulé des coupes définies par des sommes de températures mais quelques simulations à dates fixes ont été réalisées pour des sites particuliers dont nous connaissions les pratiques locales. Pour la luzerne, il n'y a ni fertilisation, ni irrigation, et les sommes de températures permettent de provoquer 3, 4 ou 5 coupes. Pour les graminées, deux itinéraires techniques principaux ont été définis, l'un de pâturage, l'autre de fauche (ensilage suivi de foin et pâturage), avec pour chacun des variantes (fertilisation, précocité des fauches). Seuls seront présentés les résultats du mode pâturage (coupes fréquentes, peu de fertilisation). Pour le maïs, nous avons combiné des groupes de précocité et des dates de semis adaptés au climat actuel, et d'autres adaptés au climat futur : semis plus précoce et groupe variétal plus tardif, qui sont adaptés aux stations traitées. On a simulé pour la plupart des stations le maïs en non irrigué et en irrigué dans le climat actuel et les climats futurs en utilisant le dispositif d'irrigation automatique de STICS. La fertilisation azotée est fixée à deux cents unités pour toutes les situations. On ne détaillera pas ici les résultats de l'irrigation ni l'effet de la fertilisation azotée.

Systématiquement, les simulations ont été réalisées en tenant compte d'abord du changement climatique seulement, puis en cumulant changement climatique et effet du CO₂, ce qui permet de bien identifier la part de chacun des processus et de relativiser les résultats, en fonction des connaissances et des incertitudes sur chacun des effets.

1.4. INDICATEURS AGRO-CLIMATIQUES

Contrairement aux simulations STICS, les calculs d'indicateurs agro-climatiques et d'occurrence des aléas climatiques ont été réalisés sur les séries de données brutes simulées ou observées, de façon à pouvoir comparer les fréquences d'événements accidentels (inchangés avec la méthode des anomalies). Les calculs d'indicateurs agro-climatiques s'appuient sur un découpage de la saison de pousse des fourrages en sept « saisons-pratiques » bornées à dire d'expert et de manière différente selon chaque série et les différentes classes de climat issues de l'AFM.

1.5. VOIES D'ADAPTATION A L'ECHELLE DU SYSTEME

Pour l'étude des conséquences du changement climatique et des voies d'adaptation possible à l'échelle du système, nous nous sommes appuyés sur des cas-types élaborés par les Réseaux d'élevage pour le conseil et la prospective. Le système fourrager de chacun des cas a été modélisé pour calculer de manière interactive (outil « Simulait ») l'incidence de changements de rations, de dates de périodes d'affouragement, de niveaux de rendements ou de pressions de pâturage sur les équilibres entre cultures fourragères et entre fourrages stockés et pâturés. Nourries des résultats des autres volets de l'étude, des réunions ont été menées avec des experts de chaque zone pour imaginer les adaptations à prévoir. Des simulations à système constant ont également été réalisées pour mesurer, hors adaptations, l'incidence directe du changement climatique ou la faisabilité du maintien du système dans ses règles fondamentales.

2. NATURE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ATTENDUS ET VARIABILITE REGIONALE.

2.1. DESCRIPTION DE L'EVOLUTION DU CLIMAT

La température minimale a tendance à augmenter pour les deux périodes et plus l'été que l'hiver. Pour le scénario A2, l'augmentation est plus importante sur la période 2070-2099 alors que pour le scénario B1, la différence entre les deux périodes n'est pas très élevée.

La température maximale se comporte de la même façon que la température minimale pour le scénario A2 avec en moyenne une augmentation plus importante. Pour le scénario B1 dans le futur proche, la température maximale augmente plus en été qu'en hiver et cet accroissement est plus grand que pour la température minimale. De manière générale les températures croissent plus en A2 qu'en B1 (cartes 2 et 3).

Les précipitations diminuent sur la période 2020-2049 pour le scénario B1 alors que c'est plutôt sur la période 2070-2099 pour le scénario A2.

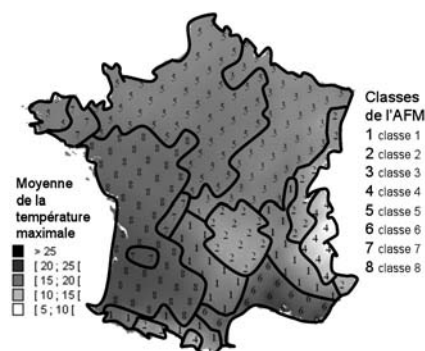
L'évapotranspiration augmente pour tous les scénarios et toutes les périodes, mais surtout en été. Cette élévation est plus importante dans le futur lointain pour A2 pour la majorité des points.

2.2. CARACTERISATION REGIONALE

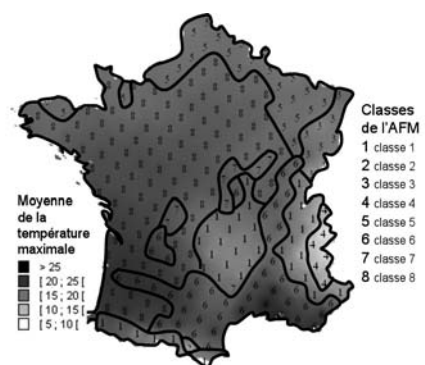
Les classes issues de l'AFM réalisée sur les données climatiques passées (1980-2006) montrent que les régions

définies actuellement (carte 1) par le climat évoluent peu dans leur contours pour le futur proche, mais ceci change radicalement pour le futur lointain notamment pour le scénario A2 (carte 3). On observe pour ce scénario, une coupure Nord / Sud dans le futur lointain. Le Nord sera caractérisé par une évapotranspiration, des températures, une vitesse du vent et un rayonnement élevés. Dans le Sud, les moyennes de ces variables seront encore plus élevées sauf pour le vent (tableau 1).

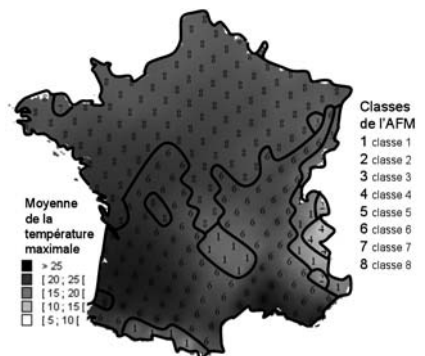
Une AFM réalisée cette fois sur les données climatiques du futur (A2, période 2070-2099) permet de caractériser des types de climat qui ne se rencontrent pas forcément actuellement sur le territoire national (carte 4). Le climat caractérisant actuellement la côte atlantique (carte 5) sera en fin de siècle localisé sur le pourtour de la Manche. La côte atlantique sera elle-même caractérisée par de nouveaux types de climat décrits dans le tableau 2, moins humides et plus chauds qu'actuellement. Dans le futur il y aura autant de précipitations en moyenne montagne qu'il y en a actuellement sur les plaines bordant ces montagnes. D'autre part l'évolution sera différente selon les saisons. L'hiver est la période qui reste la plus stable pour le scénario A2 même dans le futur lointain. Dans le cas du scénario B1 dans le futur lointain, le printemps devrait être proche de celui qu'on a actuellement dans les différentes régions.



Carte 1 : moyenne de la température maximale quotidienne sur la période de référence 1980 -2006 et classes climatiques définissables sur cette période



Carte 2 : moyenne de la température maximale quotidienne sur la période future 2070-2099 scénario B1 et répartition future des classes climatiques (telles que définies initialement sur période 1980 -2006)



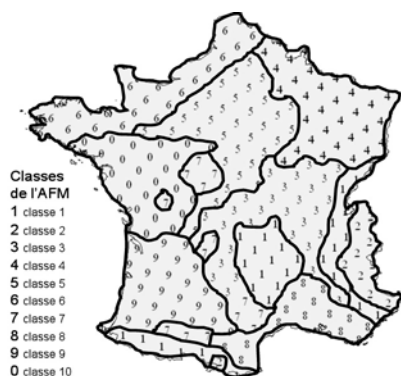
Carte 3 : moyenne de la température maximale quotidienne sur 2070-2099 (A2) et répartition future des classes climatiques (telles que définies sur 1980-2006)

Tableau 1 : caractérisation du climat dans le futur lointain pour A2 (Nord / Sud) par rapport à la situation de référence

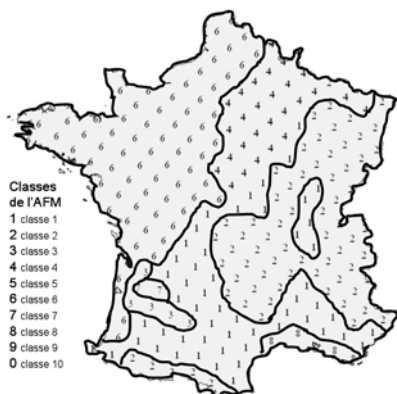
		Etp ¹ (mm)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Rr ¹ (mm)	Rg (MJ/m ²)	Vent (m/s)
Nord (cl. 8)	Futur	935	18,02	9,57	799	13,26	2,68
	Passé	600	16,40	7,66	973	13,64	2,47
Sud (cl. 6)	Futur	1020	19,47	10,3	802	14,67	1,76
	Passé	693	17,34	8,75	993	15,39	1,74
France entière	Futur	937	18,17	9,37	858	13,94	2,09
	Passé	624	14,17	5,74	1046	13,17	2,07

Tableau 2 : caractérisation du climat de la façade atlantique dans le futur lointain (A2L) par rapport à la situation de référence

		Etp ¹ (mm)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Rr ¹ (mm)	Rg (MJ/m ²)	Vent (m/s)
Sud-Ouest (9)	Futur	1188	21,54	11,98	642	14,88	2,08
	Passé	779	17,10	8,08	848	14,02	2,02
Nord-Ouest (10)	Futur	1144	19,71	10,94	695	14,07	3,01
	Passé	715	15,63	7,29	865	13,22	2,94
Moyenne générale	Futur	937	18,17	9,37	858	13,94	2,09
	Passé	624	14,17	5,74	1046	13,17	2,07



Carte 4 : classes climatiques définissables sur la période 2070 - 2099 (A2)



Carte 5 : localisation dans le passé des classes climatiques telles que définissables sur A2 2070 - 2099

2.3. SPECIFICITES CLIMATIQUES DES TROIS SITES RETENUS (PAU, NANCY, RENNES) POUR L'ETUDE A L'ECHELLE DU SYSTEME

Pau se caractérise aujourd'hui par les températures les plus élevées, Rennes est juste en dessous et Nancy se situe comme Rennes au printemps et en été, mais avec un automne et un hiver beaucoup plus rigoureux. La hausse des températures sur ces sites sera conforme à la tendance générale : davantage au sud (Pau) qu'au nord (Nancy, Rennes) et plus l'été que l'hiver. Le régime de précipitations de Nancy se démarque des deux autres par une belle régularité, tandis que Rennes, la station la moins arrosée des trois, connaît un net recul des précipitations en été. Pau connaît des cumuls de précipitations supérieurs aux autres

¹ L'évapotranspiration (etp) et les précipitations (rr) sont en cumulés sur l'année et non en moyenne journalière comme les autres variables.

sites en toutes saisons, avec cependant un net recul estival. Alors que les précipitations hivernales seraient peu modifiées, celles de l'été seraient dans les trois sites en forte baisse, surtout dans le scénario A2 lointain et surtout à Rennes (jusqu'à -60 %). Au printemps c'est surtout Pau et Rennes qui seraient affectés (-15 à -30 % selon les scénarios), et à l'automne, les niveaux de précipitation pourraient rejoindre ceux du passé, voire même les dépasser (B11, à Nancy). L'augmentation de l'ETP aggrave et rend plus précoces les phases de déficit hydrique.

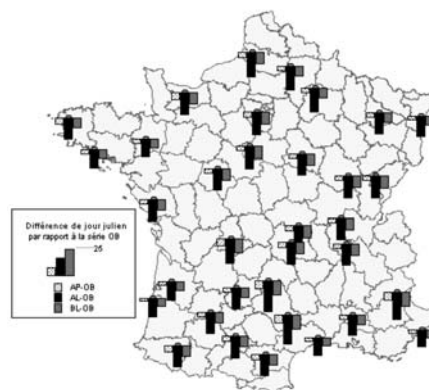
3. SPATIALISATION DE L'INCIDENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE A L'AIDE DE STICS

3.1. DATES DE RECOLTE DE LA LUZERNE

Toutes les dates sont avancées indépendamment de l'effet CO₂ : c'est un effet de l'augmentation de température.

A la première coupe, il n'y a pas de retard provoqué par le manque de matériel végétal, qui pourrait provenir de la sécheresse : les coupes ne sont repoussées pour cette raison qu'à partir de la troisième coupe. Pour la même raison, il n'y a pas d'effet significatif du sol sur la première coupe.

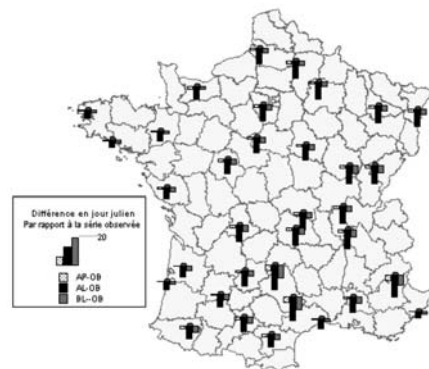
Les coupes sont avancées de cinq jours en moyenne pour l'ensemble des années et les trente-quatre stations étudiées pour le climat A2 proche (AP), de 11 jours pour le B1 lointain (BL) et de vingt et un jours pour le A2 lointain (AL).



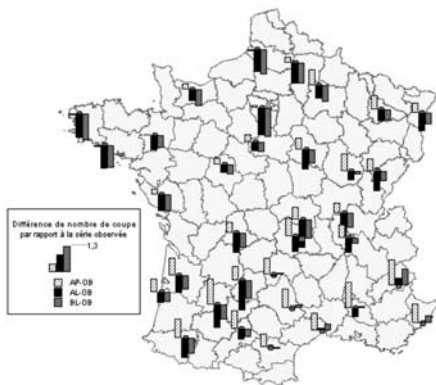
Carte 6 : différence de date de première coupe (soit 500 °C jour) en culture de luzerne dans chacun des scénarios futurs par rapport à la période de référence (OB), pour sol à faible réserve utile. (Les valeurs négatives représentent un avancement de date)

3.2. DATES DE COUPE DE LA PRAIRIE

La date pour une première exploitation très précoce (soit 300°C jour) est avancée partout (moyenne générale d'avancement : 2,5 jours en A2 proche, 5 jours en B1 lointain et 12 jours en A2 lointain), mais moins que celle de la luzerne qui est plus tardive. L'avancement est plus marqué dans la moitié sud-est, c'est-à-dire, semble-t-il, dans les zones de moyenne montagne.



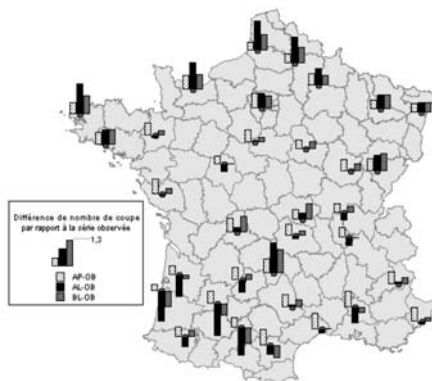
Carte 7 : différence de date pour une mise à l'herbe précoce en prairie de graminée dans chacun des scénarios futurs par rapport à la période de référence, pour sol à faible réserve utile. (Les valeurs négatives représentent un avancement de date)



Carte 8 :
évolution du nombre de coupes possibles dans un itinéraire de type pâturage (passage des animaux tous les 500 °C jour) pour un sol à faible réserve utile

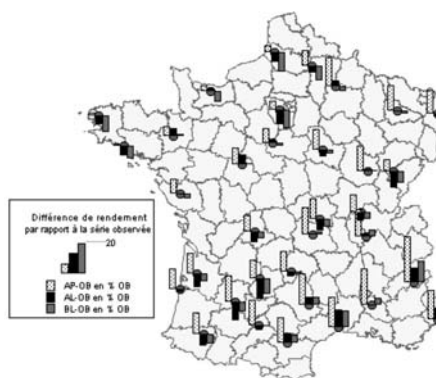
Sur sol superficiel (carte 8), le nombre de coupes est légèrement augmenté dans le futur proche, il est sensiblement diminué dans le futur lointain, plus nettement dans le scénario A2, plus chaud et plus sec, sauf sur le pourtour méditerranéen où le nombre de coupes est déjà faible (de l'ordre de 5 coupes sur le pourtour Méditerranéen contre 7 en bordure nord atlantique).

Sur les sols à forte réserve utile (carte 9), le nombre de coupes est augmenté sur les côtes de la Manche et dans le Massif Central et au contraire diminué dans le grand Sud-Ouest, zone la plus affectée par la hausse des températures.

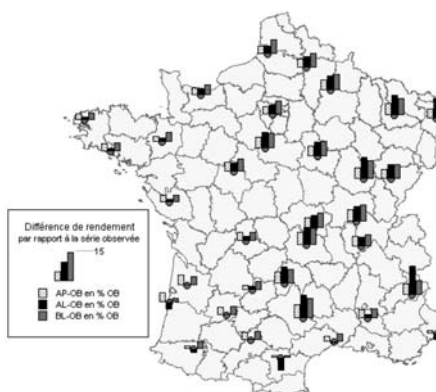


Carte 9 :
évolution du nombre de coupes possibles dans un itinéraire de type pâturage (passage des animaux tous les 500 °C jour) pour un sol à réserve utile élevée

3.3. PRODUCTION NETTE (EFFET CO₂ INCLUS) DE LA PRAIRIE



Carte 10 :
évolution de la production annuelle d'une prairie de graminée sur sol à faible réserve utile dans un itinéraire de type pâturage (passage des animaux tous les 500 °C jour)



Carte 11 :
évolution du rendement d'une coupe à ensilage (précoce) pour un sol à faible réserve utile

En sol à faible réserve utile (carte 10), le rendement annuel est augmenté de façon assez importante partout dans le futur

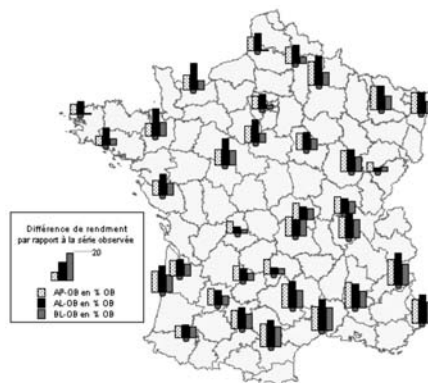
proche. Dans le futur lointain, il est diminué, sauf en Languedoc-Roussillon et Provence-Alpes-Côte d'Azur. En sol profond, il serait moins nettement augmenté dans le futur proche, mais dans le futur lointain, il ne progresserait qu'en bordure nord atlantique et ailleurs serait stable ou diminuerait (Sud-Ouest). Les prairies pourraient donc valoriser des sols plus profonds (interaction série climatique*sol significative, tableau 3), mais ce ne sont pas les sols sur lesquels elles sont d'habitude.

Pour une première coupe de type ensilage le rendement est presque toujours augmenté, quelle que soit la période et le type de sol, (carte 11).

Ces résultats vont dans le même sens que ceux recensés par Soussana et Lüscher (2007), mais il ne faut pas oublier, comme le soulignent ces auteurs, que la production est en partie liée à l'azote organique du sol (dont nous avons négligé l'évolution ici), ainsi qu'à de possibles évolutions des équilibres graminées-légumineuses.

3.4. PRODUCTION NETTE (EFFET CO₂ INCLUS) DE LA LUZERNE

Les rendements annuels en luzerne (pour un objectif de 4 coupes) sont systématiquement augmentés, quel que soit le scénario et pour presque tous les lieux en sol superficiel.



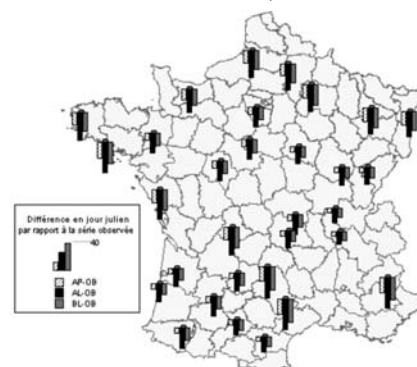
Carte 12 :
évolution du rendement annuel (cumul des coupes) d'une luzerne pour un sol à forte réserve utile

L'augmentation est encore un peu plus marquée en sol profond (carte 12) dans la moitié nord-ouest. Il y a là aussi interaction du sol avec l'effet du scénario

Tableau 3 : résumé des résultats de l'ANOVA : facteurs significatifs = S (ns = non significatifs)

facteur	Luzerne ITK 4 coupes		Prairie ITK 1	
	Date de 1 ^{ère} coupe	Rdt cumulé	Date de 1 ^{ère} coupe	Rdt cumulé
série (scénario)	S à 1 %	S à 1 %	S à 1 %	S à 1 %
Effet CO ₂	/	S à 1 %	/	S à 1 %
sol	ns	S à 1 %	ns	S à 1 %
station	S à 1 %	S à 1 %	S à 1 %	S à 1 %
Série*effet CO ₂	/	S à 1 %	/	S à 1 %
Série*sol	ns	S à 1 %	ns	S à 1 %

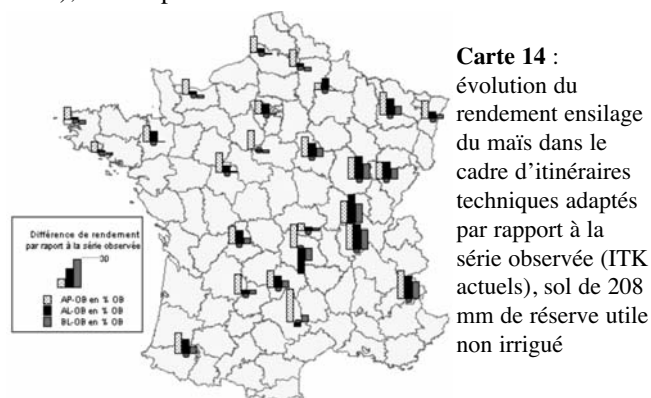
3.5. MAÏS ENSILAGE, CULTURE SECHE



Carte 13 :
différence de date de récolte ensilage du maïs (itinéraires techniques actuels) par rapport à la série observée pour les trois scénarios futurs sur un sol de 208 mm de réserve utile

Les dates de récolte d'ensilage sont elles aussi sensiblement avancées si on ne change pas de groupe de précocité, toujours plus dans le futur lointain, scénario A2 (carte 13). En l'absence d'adaptation, les rendements sont augmentés dans le futur proche et diminués dans le futur lointain. Avec adaptation (carte 14), c'est-à-dire avec semis plus précoce (un mois) et utilisation d'un génotype plus tardif (deux groupes de précocité), le rendement moyen serait augmenté dans tous les sites, avec un sol à 208 mm de RU.

Notons enfin, sans les détailler, que les résultats des simulations sont rarement positifs à long terme si on néglige l'effet réducteur du CO₂ sur la transpiration (Bethenod *et al.*, 2001), encore peu confirmé.



Carte 14 : évolution du rendement ensilage du maïs dans le cadre d'itinéraires techniques adaptés par rapport à la série observée (ITK actuels), sol de 208 mm de réserve utile non irriguée

4. L'ACCES A LA RESSOURCE, LES ALEAS CLIMATIQUES

Dans le cas de la prairie vue comme l'un des éléments d'un système fourrager, il est intéressant d'avoir une estimation de l'évolution des rendements et dates de coupe (STICS), mais il est également nécessaire de repérer dans quelles conditions l'éleveur pourra par exemple réussir la mise à l'herbe, maintenir le pâturage en été, ou le faire durer en fin de saison. Pour l'agronome et le zootechnicien, cela revient à définir ensemble des saisons-pratiques et pour chacune d'entre elles des événements climatiques impactants, comme les épisodes sans pluies, les précipitations saturantes, les déficits hydriques ou les gelées...

Tableau 4 : exemple d'indicateurs définis pour l'une des sept saisons-pratiques : le début de printemps

Intitulé de l'indicateur	Intérêt
A = Episode sans pluie : 15 jours consécutifs sans précipitations	facilite la mise à l'herbe, mais souvent avec une pousse ralentie
B = Précipitations saturantes : 5 j consécutifs avec plus de 60 mm	provoque des problèmes de portance : ne facilite pas la mise à l'herbe
C = Gelées : nombre de jours de gelées > 20 % de la période	si trop de gelées blanches, certains éleveurs préfèrent attendre

Tableau 5 : occurrence de l'événement (en nombre d'années sur dix) des trois indicateurs de début de printemps du tableau 4, dans les zones de l'AFM réalisée sur la période de référence 1970-2006 (classes 1 à 8)

scénario- indicateur	Ref (1970-2006)			A2 (2020-2049)			B1 (2070-2099)			A2 (2070-2099)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Classe 3	0,3	9,1	8,2	0,1	8,9	6,8	0,4	7,8	6,2	0,8	8,1	6,2
Classe 1	0,4	7,5	7,9	0,6	7,5	6,5	0,7	9,1	6,5	0,7	5,1	5,0
Classe 2	0,0	9,2	9,0	0,2	8,4	7,8	0,1	8,3	7,5	0,1	7,4	6,6
Classe 5	0,4	8,3	7,5	1,3	8,1	7,5	1,0	7,1	5,8	0,2	7,5	4,4
Classe 8	0,8	7,8	5,6	1,7	7,9	4,6	1,0	6,0	4,2	0,5	6,7	2,8
Classe 6	2,8	2,6	5,5	3,3	3,0	4,4	5,2	4,1	5,2	2,3	2,2	2,7

NB : ces calculs sont effectués pour chacun des 235 points ARPEGE, ce qui permet une cartographie plus fine

Ainsi, par rapport au début de printemps, les calculs présentés tableau 5 permettent d'estimer que pour la zone Piémonts des Alpes et des Pyrénées et une grande partie du Massif Central (classe 1), les conditions de mise à l'herbe seront plus difficiles dans le cadre du scénario B1 du fait des précipitations saturantes. Du point de vue de ce même indicateur, ce serait plutôt une amélioration en Pays de Loire, Poitou-Charentes, Sud-Ouest (classe 8), ce qui laisse à penser que la mise à l'herbe pourrait être réellement plus précoce, indépendamment de la biomasse disponible (qui à date égale serait en hausse dans les deux zones)

Cette partie du travail est en cours de valorisation, mais l'ensemble des indicateurs pour les sites de Pau, Nancy et Rennes a pu être discuté.

5. INCIDENCE A L'ECHELLE DE SYSTEMES LAITIERS DE TROIS ZONES CONTRASTEES, VOIES D'ADAPTATIONS ENVISAGEABLES

5.1. TROIS ZONES, TROIS SYSTEMES FOURRAGERS DIFFERENTS POUR PRODUIRE DU LAIT

A titre d'exemple nous avons retenu trois systèmes de production bovine laitière : l'un situé en Lorraine (système Lo, données climatiques de Nancy) est peu intensif et son système fourrager maximise la contribution du pâturage, le maïs n'étant utilisé que pour l'alimentation hivernale des vaches. Par ailleurs ce système élève à l'herbe l'ensemble des jeunes (génisses et mâles sous forme de bœufs). Le système breton retenu (Br, données climatiques de Rennes) est un système dans lequel l'alimentation des vaches repose sur une contribution du pâturage qui reste assez élevée, mais avec de l'ensilage de maïs distribué dès juin, en quantité variable selon la pousse de l'herbe, et bien sûr aussi l'hiver. Le troisième système est un système classique du sud aquitain (Aq) basé principalement sur le maïs, la contribution du pâturage n'étant jamais dominante dans l'alimentation des vaches, y compris au cœur du printemps.

Tableau 6 : quelques caractéristiques des systèmes retenus

Système	chargement (UGB/ha de SFP)	% maïs sur MS totale valorisée	rendement maïs au silo (TMS/ha)	rendement valorisé des prairies (TMS/ha)	% pâturage sur MS totale valorisée de la SFP
Lo	1,35	28 %	11	5,5	42 %
Aq	1,89	54 %	15	6,1	25 %
Br	1,91	40 %	12	7,7	50 %

5.2. INCIDENCE SUR LE SYSTEME DECRIT, VOIES D'ADAPTATION ENVISAGEES

5.2.1. Importance en prairie de l'évolution différenciée du rendement selon les saisons

Il apparaît (tableau 7) que dans le scénario A2 et pour le futur proche, le rendement de la prairie serait en toutes saisons plutôt à la hausse, sauf en été à Rennes. Pour le même scénario maïs en fin de siècle, les rendements pourraient être mieux que maintenus au printemps, mais s'effondreraient l'été voire aussi en automne (Nancy) dans le type de sol pris en exemple. A Rennes et Pau, un potentiel non négligeable apparaîtrait l'hiver (jusqu'à 15 % de la biomasse produite annuellement). Au delà des évolutions de rendement annuel, cette différenciation saisonnière va peser lourd sur les équilibres de système.

Tableau 7 : rapport entre production attendue dans le scénario de changement climatique et production sur données climatiques 1980-2006, pour un sol à faible RU, dans un itinéraire à coupes rapprochées, par saison

scénario	A2 (2020-2049)				B1 (2070-2099)				A2 (2070-2099)			
	Hiv	Pr	Été	Aut	Hiv	Pr	Été	Aut	Hiv	Pr	Été	Aut
Nancy	**	1,19	1,20	0,97	**	1,19	0,35	0,45	**	1,29	0,35	0,23
Pau	1,27	1,09	1,00	1,23	1,50	1,05	**	0,89	1,85	0,96	**	0,97
Rennes	1,17	1,11	0,61	0,97	1,30	1,10	**	0,97	1,66	1,09	**	0,79

** = production insignifiante les dates de saisons sont adaptées à chaque site

5.2.2. Sud aquitain, données climatiques de Pau

Le climat des années 2020 - 2046 (scénario A2p) permettrait d'augmenter la part de pâturage dans l'alimentation au printemps et en automne, au prix d'une augmentation de la surface mobilisée en été. Corrélativement, avec en plus une augmentation de son rendement, ceci permet de réduire la surface en maïs ensilage. Le système s'en sortirait donc plutôt bien avec une augmentation de chargement de 5 % et une occurrence des aléas climatiques majeurs peu modifiée, si ce n'est un accroissement des périodes de fortes pluies continues au début du printemps et en automne.

Dans un deuxième temps (2070 - 2096 = scénario A2L), la production estivale des prairies devenant anecdotique, avec forte baisse du rendement annuel, il faudrait s'adapter en apportant des fourrages stockés à tous les types d'animaux, vaches et génisses, ce qui aurait pour incidence de faire baisser la part de pâturage de 28 à 18 % de l'ensemble des besoins. Le maïs en culture sèche gardant un potentiel de rendement élevé, voire meilleur en passant à des semis précoces de variétés ultra tardives, le chargement de la SFP ne baisserait que de 10 %. La pratique du pâturage hivernal pour certains lots d'animaux serait dans ces systèmes une innovation intéressante, avec une possible réduction de la SFP de 5 % (diminution des surfaces en prairie fauchées en premier cycle). Au total, dans ces conditions, les performances et les équilibres de ce système seraient peu modifiés, mais avec peut-être une plus grande variabilité du rendement du maïs (en culture sèche). L'autre hypothèque serait les possibilités de reprise de la végétation des prairies à l'automne sachant qu'à Pau les épisodes caniculaires du type de celui vécu en 2003 pourraient survenir six années sur dix à la fin du siècle : il faudra sans doute rendre les espèces prairiales plus résistantes à des sécheresses estivales sévères.

5.2.3. Lorraine, données climatiques de Nancy

Dans un premier temps (scénario A2p), le rapport production de printemps / production totale de la prairie étant beaucoup augmenté, le rééquilibrage de ce système, dans lequel on cherche à distribuer le moins possible de fourrages de complément en été et automne, passe à la fois par un accroissement des surfaces fauchées en premier cycle et une augmentation de la distribution d'ensilage de maïs aux vaches en automne. Ces modifications peu favorables au niveau de l'organisation du travail pourraient permettre néanmoins au système de perdurer dans ses grands équilibres, avec même, comme conséquence, une possible augmentation de chargement de 10 %, les rendements du maïs pouvant augmenter.

Cinquante ans plus tard (scénario A2L 2070 - 2096), alors que la production des prairies en été et automne pourrait être divisée par plus de trois (tableau 7), l'objectif de passer ces périodes en pâturage exclusif ne sera plus tenable, et le rééquilibrage du système devra passer par des surfaces d'élaboration de stocks à redistribuer pendant l'été et l'automne. Ces surfaces pourraient être en maïs (le rendement se maintiendrait à son niveau actuel, voire augmenterait en changeant de groupe de précocité), mais la zone est déjà propice à la culture de la luzerne, laquelle pourrait voir son rendement augmenté de près de 15 à 20 % selon le sol. En conjuguant les deux, on devrait pouvoir

équilibrer un système fourrager pour un niveau de chargement presque équivalent à ce qu'il était au départ, mais avec une part de pâturage passant de 42 % à 26 % de l'ensemble des fourrages consommés : nous ne serions alors plus très loin des équilibres fourragers actuels des systèmes peu économes (charges proportionnelles et charges de mécanisation élevées) du bassin de la Garonne.

A noter aussi qu'en Lorraine, les épisodes de précipitations saturantes pouvant contrarier la mise à l'herbe ou la prolongation du pâturage en automne seront plutôt à la hausse dans le futur proche, ce qui plaiderait pour la constitution de stocks de sécurité plus importants.

5.2.4. Bretagne, données climatiques de Rennes

Pour le futur proche (A2p) dans cette zone, la première conséquence au niveau système sera l'apparition d'un important déficit estival de surface à pâturer et d'un déficit beaucoup plus réduit en automne. Accroître encore la part du fourrage distribué aux vaches laitières en été est donc nécessaire en même temps qu'assez facile, le maïs présentant dans le futur proche une perspective de rendement supérieur.

Dans le même scénario A2 mais sur la période 2070 - 2096, avec les coefficients de redressement de la production des surfaces affectées au pâturage (y compris le fait qu'il n'y ait plus rien en été), la conséquence au niveau du système serait la nécessité d'affourager tous les animaux en été, ce qui ferait augmenter le besoin de surface en maïs de 15 % (par rapport au cas initial), une petite partie de cet accroissement étant liée à la baisse du rendement de cette culture. Dans cette conjonction de baisse des rendements à la fois en maïs et avec les prairies, la baisse du chargement est inévitable et serait la plus forte des trois systèmes étudiés, de l'ordre de -23 %. Dans le même temps, la contribution du pâturage diminuerait de 12 % bien qu'il puisse commencer dix jours plus tôt et se terminer plus tard, et le taux de fauche des prairies en premier cycle augmenterait de 18 %, tout en restant inférieur à ce qui se ferait en Lorraine. Enfin, le rendement du maïs non irrigué deviendrait plus aléatoire, et les conditions de pâturage et de récolte au printemps pourraient ne pas être toujours favorables (davantage d'épisodes à fortes précipitations continues).

Sous réserve que puissent être gérés les problèmes de portance, une adaptation pourrait consister là aussi à jouer la carte du pâturage hivernal pour certains lots d'animaux : ainsi, le prélèvement de 50 % de la biomasse produite en hiver (de l'ordre de 900 kg / ha), permettrait de réduire la SFP de près de 7 %.

Compte tenu de la bonne réponse de la luzerne au changement climatique (+18 % de rendement en quatre coupes), son introduction dans un tel système en substitution d'une partie des prairies temporaires pourrait permettre de limiter la baisse du chargement, mais au prix d'une nouvelle baisse de la contribution du pâturage. Les conseillers locaux croient également au renforcement de la capacité productive de fin d'hiver et début de printemps que pourraient permettre des espèces précoces et productives telles que le *ray-grass* d'Italie.

5.2.5. Traits communs, et divergences

L'ensemble de cette prospective repose sur l'hypothèse d'un matériel végétal et animal constant. Ce ne sera pas le cas, car des progrès génétiques seront peut-être proposés pour les espèces cultivées en prairie temporaire, les flores des prairies permanentes vont naturellement évoluer, et les vaches vont sans doute encore voir progresser leur potentiel de production et donc leurs exigences alimentaires. En maïs le progrès génétique va se poursuivre avec une adaptation au changement climatique.

A ce stade de l'étude, nous pouvons donc seulement estimer que les trois systèmes se verraient plutôt favorisés dans le futur proche du scénario A2, au moins en termes de productivité de la SFP. Dans le futur plus lointain ce serait probablement le système sud aquitain qui se verrait le moins pénalisé, et aussi celui qui aurait le moins d'effort à faire pour s'adapter, sans doute parce qu'il est déjà configuré pour gérer une forte différence de rendement entre maïs et prairie, avec une faible contribution du pâturage. Le système lorrain pourrait s'en sortir très bien en termes de productivité (coup de pouce du changement climatique au maïs et à la luzerne), mais au prix d'une très importante évolution et d'une remise en cause de ses spécificités (pâturage exclusif d'avril à octobre). L'exemple de système breton étudié pourra difficilement échapper à une baisse du chargement, mais avec dans son jeu un atout à conforter et à préciser dans son mode d'emploi : le pâturage hivernal.

CONCLUSION

Le territoire national sera diversement touché par le changement climatique, mais les phénomènes décrits ne sont pas linéaires : dans le futur proche, il y a de nombreux avantages au changement (augmentation de température modérée, peu de diminution de précipitations), tandis que plus tard, ça se dégraderait ... et davantage dans le scénario A2 que dans le scénario B1.

Malgré ce contexte, les résultats des simulations STICS sur maïs permettent d'être optimiste pour le futur proche, même en culture sèche. Vers la fin du siècle, en adaptant les itinéraires techniques (dates de semis et groupes de précocité) et en considérant les sols les plus propices, les rendements ne seraient que légèrement affectés dans le quart nord-ouest (et plus dans le scénario B1 que A2), mais pourraient progresser à l'est.

Dans le futur proche (2020 - 2046) et à ce stade de l'étude, se confirment la bonne tenue des rendements annuels de la prairie à base de graminée et l'intérêt de la luzerne, notamment dans le sud de la France. Dans le futur lointain (2070-2096), dans certaines zones les rendements de la prairie se dégraderont très vite : de +15 % (A2 futur proche) par rapport à leur valeur actuelle à -16 % (A2 futur lointain) dans le Lot par exemple.

On pourrait se réjouir des résultats de cette projection dans le futur proche, mais à terme, cette évolution non linéaire présente un fort risque d'endormissement de la vigilance des milieux professionnels et donc de prise de retard dans les adaptations, qui pourtant devront être de très forte amplitude (qualitativement et quantitativement, au niveau du travail comme au niveau des charges) dans certaines zones, comme en Lorraine dans nos exemples de systèmes laitiers.

Les commentaires portés dans cet article sur l'évolution des productions correspondent à des simulations tenant compte du changement climatique et de l'effet du CO₂. Ce dernier a un effet significatif sur les rendements, (un peu moins pour le maïs que pour les graminées et la luzerne), mais aussi diminue sensiblement les besoins en eau : ces effets positifs qui contrebalancent les effets négatifs du climat dépendent de coefficients sur lesquels il y a forte discussion : aussi bien le pourcentage d'augmentation de production primaire (rarement étudiée à long terme sur des plantes entières) que celui de modification de transpiration. Il faut donc rester prudent et penser que des travaux complémentaires incluant des incertitudes sur ces paramètres donneraient une idée de la fiabilité (ou de l'intervalle de confiance) de ces résultats. Par ailleurs, nous n'avons pas pris en compte l'effet de très fortes températures ou sécheresses sur la densité de talles et de plantes, alors que nous savons que l'occurrence des événements caniculaires va augmenter : il faut donc rester prudent sur les calculs de biomasse permise après de tels épisodes.

Du côté des éléments positifs, il apparaît que des opportunités de pratique du pâturage hivernal pourront s'ouvrir dans certaines zones dès le futur proche, élargissant la gamme des outils à la disposition des éleveurs pour réduire le coût alimentaire, mais aussi pour sécuriser les systèmes fourragers. Par contre, il faudra dans de nombreuses zones rentrer les animaux l'été, dans des bâtiments pas toujours conçus pour cet usage, ou du moins les affourager à l'extérieur. Par rapport à ces nouvelles pratiques, des modes d'emploi devront être précisés et les capacités adaptatives des animaux mobilisées.

Nous remercions pour leur collaboration les équipes des réseaux d'élevage pour le conseil et la prospective de L'Est (animation : D Caillaud), du Sud-Ouest (animation : J. Fagon), le pôle herbivore des chambres d'agriculture de Bretagne (animation : B. Le Lan) et F. Launay (Institut de l'élevage) qui a modélisé les systèmes fourragers des cas-types pour cette étude.

Bethenod O, Ruget F, Katerji N, Combe L. and Renard D., (2001). *Impact of atmospheric CO₂ concentration on water use efficiency of maize MAYDICA*, 46, 2, 75-80

Brisson N., Déqué M., Diaz R., Ducharne A., Juin S., Lebonvallet S., (2005). "Utilisation des scénarios de changement climatique dans un modèle de culture", Actes Séminaire STICS, 17-18 mars 2005, Carry-le-Rouet, France, 6 p.

Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoulaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Dürr C., Richard G., Beaudoin N., Recous 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 parametrization applied to wheat and corn. Agronomie*, 18, 311-346.

Escoffier B., Pages J. (1998). Analyses factorielles simples et multiples. DUNOD, Paris, 284 p

GIEC (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Résumé à l'intention des décideurs, Paris, 29 Janv. - 1^{er} Févr. 2007, 25 p

Lebart L., Morineau A., Piron M., (1995). Statistique Exploratoire Multidimensionnelle. DUNOD, Meauce, 439 p

Levet T., (2006). Impacts des changements climatiques sur la production des prairies en France, mémoire de fin d'études ENITA, 35 p + annexes

Leger F., Bellon S., Guerin G., (2000). "Outils et méthodes pour analyser les ressources au pâturage", Options Méditerranéennes, 39, 205-215

Moreau J.C., Lorgeou J., (2007). Premiers éléments de prospective sur les conséquences des changements climatiques, Fourrages, 191, 285-296

Réseaux d'élevage pour le Conseil et la Prospective du Sud Ouest, collectif animé par J-C Moreau (2005). Cas-Type N°1, « En Sud Aquitain, un système associant lait et maïs grain, avec un système fourrager mixte », 10p

Réseaux d'élevage de Bretagne, collectif animé par B. Le Lan (2007). « Cas concret N°1, du lait par vache avec du pâturage », 8p

Réseaux d'élevage de Lorraine Champagne-Ardenne Alsace, collectif animé par D. Caillaud (2005). Cas-Type N°5, «Système laitier en zone herbagère avec du maïs et des bœufs », 4p

Ruget F., Abdessemed A., Moreau J.C., (2008). *Impact of global climate change scenarios on alfalfa production in France.* Congrès EGF, Uppsala, 3p

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, pp 241-256

Soussana J.F., Lüscher A., (2007). *Temperate grasslands and global atmospheric change: a review Grass and Forage Science*, 62 (2), 127-134