Université de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :
Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Discipline ou spécialité :

Agrosystèmes, Écosystèmes et Environnement

Présentée et soutenue par :
Mme MARION SAUTIER

le : jeudi 12 décembre 2013

Titre :

OUTILLER L'ADAPTATION DES ÉLEVAGES HERBAGERS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE : DE L'ANALYSE DE LA VULNÉRABILITÉ À LA CONCEPTION PARTICIPATIVE DE SYSTÈMES D'ÉLEVAGE

Ecole doctorale :
Sciences Ecologiques, Vétérinaires, Agronomiques et Bioingénieries (SEVAB)

Unité de recherche :
Agrosystèmes et développement territorial (A.G.I.R.)

Directeur(s) de Thèse :
M. MICHEL DURU
M. ROGER MARTIN CLOUAIRE

Rapporteurs :

M. DIDIER STILMANT, CENTRE WALLON DE RECHERCHES AGRONOMIQUES
M. PIERRE-YVES LE GAL, CIRAD MONTPELLIER

Membre(s) du jury :

M. STEPHANE INGRAND, INRA CLERMONT FERRAND, Président
M. MICHEL DURU, INRA TOULOUSE, Membre
M. ROGER MARTIN CLOUAIRE, INRA TOULOUSE, Membre

Remerciements

Au risque de décevoir ma famille, cette thèse n'est pas *mon* travail. Elle est le fruit de nombreuses collaborations et rencontres ainsi que de plusieurs coups de pouce.

Je pense d'abord à Michel Duru et Roger Martin-Clouaire, mes encadrants, qui m'ont fait partager leurs recherches, leurs visions de la science et leurs façons de travailler. Les cinquante versions de mon premier article et les dix versions en moyenne de chacun de mes chapitres de thèse témoignent de l'attention qu'ont portée Michel et Roger à mon travail. Quelle chance j'ai eu de vous voir toujours vous rendre disponible pour n'importe quelle de mes interrogations ! Je vous remercie pour votre bienveillance, votre implication, votre clairvoyance et surtout… pour votre patience ! Vous avez été complémentaires l'un à l'autre, et ça a été un plaisir et un honneur de travailler avec vous.

Michel, merci d'avoir toujours été un niveau plus haut que moi sur l'échelle « organisation du bureau ». Merci pour tes réponses éclairs aux mails, pour ta veille biblio, pour ton enthousiasme et ton dynamisme. Roger, merci de m'avoir attentivement écoutée et lue pour pointer avec persévérance les imperfections de mon travail. Tes remarques ont toujours permis d'éclairer certaines zones d'ombre de mon travail. Merci pour ta minutie, ta sollicitude et ton regard neuf.

Je suis très reconnaissante aux membres de mon comité de thèse pour le regard critique qu'ils ont porté sur mon travail au cours de la thèse. Merci à Stéphane Couture, Philipe Lecomte, Jean-Christophe Moreau et Muriel Tichit pour leurs conseils, leurs interrogations stimulantes et leurs encouragements. J'ai apprécié votre gentillesse et la richesse de nos échanges.

Merci aux membres du jury de m'avoir fait l'honneur d'examiner mon travail. Merci à Pierre-Yves Le Gal et à Didier Stilmant d'avoir été rapporteurs de ma thèse : votre analyse de ma thèse m'a permis de faire un pas vers plus de clarté pour la soutenance. Elle me permettra également d'approfondir le travail déjà réalisé et d'identifier des voies à explorer. Merci enfin à Stéphane Ingrand et Françoise Ruget d'avoir joué le rôle d'examinateurs. Tous ensemble, vous avez fait de ma soutenance un moment stimulant et agréable par la richesse et la complexité des remarques et questions dont vous m'avez fait part.

Cette thèse résulte en partie d'une collaboration avec l'Institut de l'Elevage : j'ai bénéficié des conseils de Jean-Christophe Moreau dans le cadre de mon comité de thèse ainsi que de l'aide de Jocelyn Fagon qui m'a permis de décrypter la base de données Optilait. Jocelyn tu as été pour moi la pierre de Rosette indispensable à l'utilisation de ces données. Merci pour ta disponibilité, ta clarté et ta gentillesse. Je remercie par la même occasion Caroline Nollet de la Chambre d'agriculture de Midi-Pyrénées pour ses éclairages précieux sur le sens des différentes variables et dynamiques du secteur laitier dans le Sud-Ouest. Merci également à Gisèle Barthés, de L'ARSOE de SOUAL, pour avoir répondu à nos questions et nous avoir fournis des données complémentaires lorsqu'il en était nécessaire.

La moitié de ma thèse repose sur un travail réalisé avec des éleveurs en Aveyron. Un immense merci aux dix-huit éleveurs que j'ai rencontrés et qui m'ont accueillie chaleureusement le temps d'un entretien. Merci beaucoup aux onze éleveurs volontaires qui se sont penchés sur les adaptations possibles des élevages de bovins sur leur zone en se prenant au jeu du rami fourrager. J'espère que

vous avez apprécié comme moi ces moments de réflexion et d'échange. Je remercie les communes de Laguiole, Naucelle, Quins et Tanus de nous avoir mis à disposition leur salle de réunion à plusieurs reprises (et merci pour le chauffage !). Merci enfin à Marlène Chantel, Benoit Delmas, Claudine Murat, Jean-Christophe Vidal et Michel Weber de la Chambre d'agriculture de l'Aveyron pour votre aide et vos remarques avisées lors d'un ou plusieurs ateliers ou lors de la restitution finale des ateliers.

Au cours de ma dernière année de thèse, j'ai eu le plaisir d'encadrer Olivia Itier pour son mémoire d'ingénieur. Merci Olivia pour ton travail d'analyse de la base de données Optilait. Pour m'y être frotté pendant plus d'un an, je sais à quel point il est difficile de comprendre le sens des différentes variables de cette base riche et complexe et de trouver par quel bout commencer les analyses. Bravo pour avoir mis de l'ordre dans tout cela, avec dynamisme et bonne humeur !

Un très grand merci à Mathilde Piquet, collègue sensible, vive et critique. C'était un réel plaisir de travailler main dans la main avec toi, même si je ne t'ai pas employée pour la plus noble des tâches… Tu as accompli le travail laborieux et répétitif de préparer les ateliers de rami. Merci aussi d'avoir animé à mes côtés chacun des ateliers. Merci à Jean-Pierre Theau pour sa grande connaissance du terrain Aveyron et pour les conseils qu'il a pu me prodiguer avec beaucoup de pédagogie et un grand sourire. Je salue également Benoit Felten et Guillaume Martin, qui ont développé le rami fourrager.

Je remercie Romain Lardy qui est arrivé à AGIR au moment opportun ; au début de ma rédaction. Merci pour tes éclairages sur la vulnérabilité et les discussions passionnantes qui s'en sont suivies. Merci aussi pour tes conseils. Ça a été un plaisir d'échanger avec toi, d'autant plus que nos sujets de thèse sont très proches.

Je n'aurais pu débuter cette thèse sans l'aide inestimable d'Aude Barbottin et de l'ensemble de l'équipe SAD-APT où j'ai effectué mon stage d'ingénieur. Merci de m'avoir accueillie et intégrée à l'équipe. Un grand merci pour m'avoir préparée au concours d'Attachée Scientifique Contractuelle (Aude, Mourad, Félix, François, Alain, Véro, Rodolphe et Noémie). Une pensée particulière à Lauriane Mouysset qui, au détour d'une discussion de cinq minutes, m'a poussée à écrire à Michel Duru pour candidater à cette thèse.

Mieux connaître et comprendre les différentes façons de faire de la recherche a été pour moi primordial pour me former à la recherche. J'y suis arrivée grâce aux collectifs de travail auxquels j'ai pris part : ModéliSAD, le groupe disciplinaire des agronomes du SAD, et la communauté IFSA. J'ai également beaucoup appris sur les postures de recherche au cours de formations destinées aux doctorants (les journées des doctorants du SAD et le PhD Course de l'IFSA). Ces formations offrent au doctorant un temps de réflexion pour prendre de la hauteur par rapport à son sujet et à son environnement de travail afin de mieux savoir « d'où il parle ». Interrogation qui peut sembler triviale, mais qui me parait essentielle pour comprendre les recherches que nous menons et nos différences entre collègues. Il s'agit de se poser la question que Ray Ison répète tout au long de la formation IFSA « What do we do when we do what we do ?» !

Au fil des discussions j'ai appris que je n'étais ni agronome, ni zootechnicienne, ni gestionnaire, ni sociologue… De quoi donner un sacré trouble de la personnalité ! Des personnes, probablement dans les mêmes limbes disciplinaires que moi, ont heureusement pensé à l'*agroécologie* et je leur en suis fortement reconnaissante. J'ai enfin une discipline ! Il semble si important d'avoir une étiquette

disciplinaire à coller à côté de son nom. J'ai le vif espoir de continuer mes recherches dans une équipe interdisciplinaire où le partage des points de vue nourrit le travail de chacun.

Mes démarches ont été grandement facilités par le professionnalisme, l'efficacité et la bonne humeur de l'équipe administrative de l'unité AGIR : Thierry Courbun, Marina Lefebvre, Christel Moder, Maryse Perreu et Mathieu Solle. J'ai également bénéficié du travail d'Arezki Zerourou concernant les debuggages du modèle Herb'Sim, ainsi que de celui de Jean-Pierre Rellier qui a codé un programme spécialement pour moi. Cela m'a permis de lancer simultanément autant de simulations que j'en avais besoin sur la plateforme DIESE. Merci beaucoup pour votre aide et votre sympathie!

Le temps du café était pour moi un moment privilégié pour retrouver les collègues. Merci à Francois Brun, Pierre Casadebaig, Marion Casagrande, Julie Constantin, Delphine Leenhardt, Vincent Thénard, Olivier Thérond et Magali Willaume pour votre bonne humeur. Je ne pourrais manquer de saluer également la troupe des compagnons de CDD : Pierre, Marc, Greg, Romain, Mathilde, Virgile, Florian, Damien, Yaël, Jeanne, Marina, les deux Jérôme, Solenn, Caro, Toky, Carine, Marie et Thomas. Un remerciement spécial à Nathalie qui m'a initiée et rendue experte en ggplot2, et qui n'a de cesse de mettre en dérision mes doutes disproportionnés. Merci également à Marie B., Marie T., Thomas, Daweed, Rémi, Gaël, Peter, Jan, Laure, Olivier, Coline et autres non-titulaires mobilisés : grâce à vous j'ai rencontré J.M Ayrault ! Merci aussi à Patinet, David et les autres de nous avoir soutenus.

Qu'il vente ou qu'il neige, la place Arezki est l'endroit le plus réconfortant de Castanet. Merci aux habitués de ce bout de pelouse, les « permanents » et les « temporaires » : Arnaud, Abde, Jérôme T., Jérôme D., David, Benoit, Virgile, Jeanne, Marina, Solenn et… Arezki ! David, merci pour ton humour grinçant, ton engagement et ta gentillesse. C'est *à cause* de toi que je suis allée au bout de cette thèse. Sophie, Elsa, Juli, Juliette, Juliane, Chahin, Marion, Marie, Camille, vous m'êtes précieux ! Mourad, tu as eu le droit à tes remerciements lors de ma soutenance et je les renouvelle. Romain, merci de nous avoir supporté Picpus et moi pendant ces trois années. Merci aux amis de l'impro et de la danse africaine, en particulier Arthur, Motta, Rémy et Pierre. Enfin merci à Magali (l'autre M. Sautier), Marianne, Olivier, Marie, Paul, Marion, Guillaume et Thomas : vous m'avez été salutaires lorsque j'ai dû me limiter à une seule sortie par semaine !

Pour la relecture et l'aide à la mise en page, merci à la famille (Guillaume et Jean-Luc) et aux amis (Sophie, Juliette et Juliane). Juliane, ça a été un moment de satisfaction, d'étonnement, et de plaisir lorsque, pleine d'enthousiasme, tu m'as expliqué à quel point mon travail était intéressant, utile et novateur. C'était la première fois que mon travail franchissait les frontières du monde de la recherche et des spécialistes des systèmes d'élevages.

Merci à ceux que j'ai oublié. Merci à ceux qui m'ont soutenue et parfois relevée dans ce cheminement de thèse. Merci également à ceux qui m'ont associé à leur travail et leurs réflexions.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE 15

1. POSITIONNEMENT DE LA THESE 17
2. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE 19
3. CADRES THEORIQUES 20
   - *3.1. Vulnérabilité 20*
   - *3.2. Adaptation science et théories de la conception 22*
4. PROBLEMATIQUE 25
5. DEMARCHE ET DISPOSITIFS 26
6. ORGANISATION DU MANUSCRIT 27

PARTIE I : ELEVAGES ET ELEVEURS FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE PASSE 29

CHAPITRE 1 - PERCEPTIONS ET REPRESENTATIONS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE CHEZ DES ELEVEURS DE BOVINS LAITIERS ET ALLAITANTS EN AVEYRON 31

1. INTRODUCTION 33
2. MATERIELS ET METHODES 34
   - *2.1. Méthode de recueil de données 34*
   - *2.2. Guide d'entretien 35*
   - *2.3. Recueil et analyse des données 36*
   - *2.4. Choix des personnes interrogées et prise de contact 36*
3. RESULTATS 37
   - *3.1. Le changement climatique vu par les éleveurs 37*
   - *3.2. Les observations de l'évolution du climat 39*
   - *3.3. La place du changement climatique dans le contexte général de l'exploitation agricole 42*
4. DISCUSSION ET CONCLUSION 49
5. REFERENCES 52

CHAPITRE 2 - ANALYSE DE LA VULNERABILITE DES ELEVAGES LAITIERS DU SUD-OUEST A LA VARIABILITE CLIMATIQUE: PROFILS DE SENSIBILITE ET ADAPTATIONS MISES EN ŒUVRE 55

1. INTRODUCTION 57
2. MATERIELS ET METHODES 60
   - *2.1. Description de la base de données et choix des variables d'intérêt 60*
   - *2.2. Caractérisation de la vulnérabilité à partir de la base de données 63*
   - *2.3. Analyses statistiques 64*
3. RESULTATS 64
   - *3.1. Caractérisation de l'année 2003 ..... 64*
   - *3.2. Structure, conduite et performances caractéristiques des exploitations selon leur classe de sensibilité 67*
   - *3.3. Evolutions de structure, de conduite et de performances suite à 2003 ..... 75*
4. DISCUSSION 78
   - *4.1. Limites de l'analyse 78*
   - *4.2. Stratégies et tactiques pour faire face à une année exceptionnellement chaude et sèche 79*
   - *4.3. Conséquences d'une année climatique exceptionnelle sur la stratégie des exploitations 81*
   - *4.4. Perspectives 81*
5. CONCLUSION 82
6. REFERENCES 83

PARTIE II : EXPOSITION PASSEE ET FUTURE DES SYSTEMES D'ELEVAGE HERBAGERS 85

CHAPITRE 3 - DES INDICATEURS SAISONNIERS POUR EVALUER L'EXPOSITION DES SYSTEMES D'ELEVAGE HERBAGERS AU CLIMAT 87

1. INTRODUCTION 89
2. INDICATOR-BASED CHARACTERISATION OF CLIMATIC EXPOSURE 91
   - *2.1. Approach 91*
   - *2.2. Case study 93*
3. RESULTS 94
   - *3.1 Weather data 94*
   - *3.1. Starting dates and length of productivity-defined seasons 95*
   - *3.2. Herbage balance 96*
4. DISCUSSION 98
   - *4.1. New insights provided by the exposure indicators 98*
   - *4.2. Critical analysis 99*
   - *4.3. Concluding remarks 100*
5. REFERENCES 100

CHAPITRE 4 - CARACTERISATION DE L'EXPOSITION DES SYSTEMES D'ELEVAGE HERBAGERS AU CHANGEMENT ET A LA VARIABILITE CLIMATIQUES 103

1. INTRODUCTION 105
2. MATERIAL AND METHODS 107
   - *2.1. Exposure indicators 107*
   - *2.2. Clustering years and characterising abnormality and frequency of seasons 108*
   - *2.3. Case study 109*
3. RESULTS 110
   - *3.1. Inter-annual variability of seasonal indicators for past and future periods 110*
   - *3.2. Clustering of forage climatic years according to seasonal indicators 112*
   - *3.3. Standard-deviation classification based on past mean seasonal herbage balance 116*
4. DISCUSSION 119
   - *4.1. Lessons about climate change and variability 119*
   - *4.2. Contribution to the participative design process 120*
5. CONCLUSION 121
6. REFERENCES 122

PARTIE III : RENFORCER LES CAPACITES D'ADAPTATION DES SYSTEMES AGRICOLES AU CHANGEMENT ET A LA VARIABILITE CLIMATIQUES PAR LA CONCEPTION DE SYSTEMES 125

CHAPITRE 5 - UNE METHODE DE CONCEPTION DE SYSTEMES DE PRODUCTION AGRICOLES ADAPTES AU CHANGEMENT ET A LA VARIABILITE CLIMATIQUES 127

1. INTRODUCTION 129
2. MATERIELS ET METHODES 133
   - *2.1. Une méthode pour concevoir et évaluer un système adapté au changement et à la variabilité du climat 133*
   - *2.2. Cas d'étude 140*
3. RESULTATS 150
   - *3.1. Adaptations stratégiques et tactiques conçues pour faire face au changement et à la variabilité du climat futur 150*
   - *3.2. Rôle des supports informatifs 154*
4. DISCUSSION 158
   - *4.1. Analyse critique des stratégies, tactiques et systèmes conçus 158*

4.2. Intérêts de notre démarche ... 159
4.3. Limites de notre démarche ... 160
5. Conclusion ... 162
6. References ... 162

DISCUSSION GENERALE ... 165

1. Implications des evolutions d'exposition a l'echelle du systeme d'elevage ... 167
2. Apports de la these concernant les menaces, opportunites, atouts et faiblesses des elevages herbagers face au changement climatique ... 169
2.1. Menaces ... 169
2.2. Opportunités ... 171
2.3. Atouts ... 171
2.4. Faiblesses ... 172
3. Apports methodologiques de la these ... 174
3.1. Une nouvelle façon de représenter l'exposition des systèmes d'élevage herbagers au changement climatique ... 174
3.2. Une nouvelle méthode de conception de systèmes ... 175
3.3. Diversité des objets intermédiaires pour accompagner l'adaptation au changement climatique : Quels indicateurs, en fonction de quelle utilisation ? ... 175
4. Limites de l'etude ... 177
5. Place des eleveurs dans la recherche ... 179

CONCLUSION ... 183

1. Synthese du travail effectue ... 185
2. Vers une evolution de posture de la recherche ... 186

REFERENCES ... 189

ANNEXES ... 195

Annexe 1 : Les scenarios d'emissions futures de gaz a effet de serre selon le GIEC ... 196
Annexe 2 : Courbes d'evolution du climat presentees aux eleveurs en fin d'entretien. Chapitre 1 ... 199
Annexe 3 : Caracteristiques principales des eleveurs enquetes. Chapitre 1 ... 202
Annexe 4 : Description des caracteristiques et limites des six zones pedoclimatiques du Sud-Ouest etudiees dans le Chapitre 2 ... 203
Annexe 5 : Detail de la methode d'analyse statistique employee dans le Chapitre 2 ... 204
Annexe 6: Identification des annees exceptionnelles et caracterisation de 2003. Chapitre 2 ... 211
Annexe 7 : Details des ANOVAs pour identifier les caracteristiques des exploitations de chaque classe de variation de production laitiere entre 2003 et 2004. ... 217
Annexe 8: Evolution de la structure et des pratiques des elevages laitiers au cours de la periode d'etude. Chapitre 2 ... 219
Annexe 9 : Annexe accompagnant le Chapitre 3 : "Supplementary material for online publication" ... 222
Annexe 10 : Annexe accompagnant le Chapitre 4 ... 235
Annexe 11 : Adaptations des elevages au changement et a la variabilite climatique : illustration de la methode de conception par trois cas d'etude. Chapitre 5 ... 236
Annexe 12 : Synthese des modifications strategiques imaginees en atelier face au changement et a la variabilite climatique. Chapitre 5 ... 253
Annexe 13 : Synthese des modifications tactiques imaginees en atelier face au changement et a la variabilite climatique. Chapitre 5 ... 254

Liste des Figures

Figure 1 : Les différentes étapes de l'*Adaptation science*, tiré de Meinke, *et al.* (2009). 23
Figure 2 : Les différentes étapes du processus de conception, tiré de Martin, et al. (2013). 24
Figure 3 : Terrains d'étude de la thèse, et chapitre de thèse associé. En vert : Région Midi-Pyrénées. En jaune (clair) : département des Pyrénées Atlantiques située en région Aquitaine. Conception C. Murgue. 28
Figure 4 : Nombre de personnes qui parlent pour la première fois d'une évolution du climat (ou des pratiques) et nombre d'observations d'évolutions du climat citées à chaque étape de l'entretien. 40
Figure 5 : Moment auquel la contrainte climatique, l'évolution du climat (ou des pratiques en lien avec le climat) et le changement climatique sont évoquées pour la première fois. 43
Figure 6 : Régions pédoclimatiques du Sud-Ouest, stations météorologiques correspondantes et nombre d'exploitations suivies sur au moins 18 ans (de 1989 à 2010) par région. 61
Figure 7 : Fonctions de répartition de P-ETP et de Tmoy annuels par région pédoclimatique entre 1989 et 2011 et positionnement de l'année 2003. 65
Figure 8: Determination of the season boundaries and the surplus or shortage of grazing resources according to herbage growth profile. The dark blue region under the dashed line indicates when the livestock is fed (partially in summer-fall and totally in winter) with silage or hay. 93
Figure 9: Simulated values of the starting day of spring, summer and winter for the past climate at each site. ... 96
Figure 10: Values of exposure indicators at annual (annual production) and seasonal scale (spring surplus, summer-fall surplus or shortage and winter shortage) for past climate, expressed in feeding-days. 97
Figure 11: Scatter plot of exposure indicators at the seasonal level (spring, summer-fall, winter) for the past (1980-2010, unfilled symbols) and future (2035-2065, filled symbols). 111
Figure 12: Medians (lines), inter-quartile ranges (boxes), and outliers (dots) of the beginning of summer (left) and seasonal herbage balances for spring, summer-fall and winter (right). 114
Figure 13 : Cumulative relative frequency of forage-year clusters ranked (from 1 to 8) according to decreasing relative frequency in the past weather series for three sites (Aulus (□), Saint Girons (Δ) and Toulouse (○)). The three upper curves represent the past (open shapes), while the other three concern the future (filled shapes). 116
Figure 14: Deviations of herbage balances in spring ( ), summer-fall (■) and winter (Δ) in past and future climate series from their means in the past climate series. Classes based on the number of standard deviations are denoted by a number from -3 to 3, where -3 represents]-∞, -3σ]; -2 represents]-3σ, -2σ]; -1 represents]-2σ, -σ]; 0 represents]-σ, σ[; 1 represents [σ, 2σ[; 2 represents [2σ, 3σ[; and 3 represents [3σ, +∞[. 118
Figure 15 : Enchainement des trois ateliers de conception. 133
Figure 16 : Déroulement des ateliers selon différentes étapes. 134
Figure 17 : Cinq éléments du Rami Fourrager que manipulent les participants aux ateliers pour représenter et évaluer un élevage d'après Piquet et al. (2013). Tous ces éléments sont adaptables pour chaque contexte local (sol, climat, pratiques, espèces cultivées, etc.). 137
Figure 18 : Fonction de répartition empirique du bilan annuel entre 2070 et 2100. en bleu : 2081 (atelier 2), en noir : moyenne du futur (atelier 1), en rouge : 2051 (atelier 3). Lignes horizontales : intervalles « moyenne ±0,5 écarts types », « moyenne ±1ET », « moyenne ±1,5ET », « moyenne ± 2ET ». 141
Figure 19 : Frise climat utilisée en atelier 1 (climat passé). Eau disponible dans le sol et des températures moyenne de l'année moyenne du passé à Laguiole. 145
Figure 20 : Histogramme des précipitations de l'année climatique moyenne du passé utilisé en atelier 1. 145
Figure 21 : Frise climat utilisée en atelier 1 (climat futur). Eau disponible dans le sol et des températures moyenne de l'année moyenne du futur à Laguiole. 145
Figure 22 : Histogramme des précipitations de l'année climatique moyenne du futur utilisé en atelier 1. 146
Figure 23 : Courbes de vitesse de croissance utilisées en atelier 1. Année climatique moyenne du passé (vert) et année climatique moyenne du futur (orange). 146

Figure 24 : Frise climat utilisée en atelier 2. Eau disponible dans le sol et des températures moyenne de l'année d'intérêt. 146
Figure 25 : Histogramme des précipitations de l'année climatique utilisé en atelier 2. 147
Figure 26 : Courbes de vitesse de croissance utilisées en atelier 2. Année climatique moyenne du futur (orange) et année d'intérêt (rouge). 147
Figure 27 : Frise climat utilisée en atelier 3. Eau disponible dans le sol et des températures moyenne de l'année d'intérêt. 147
Figure 28 : Histogramme des précipitations de l'année climatique utilisé en atelier 3. 148
Figure 29 : Courbes de vitesse de croissance utilisées en atelier 3. Année climatique moyenne du futur (orange) et année d'intérêt (rose). 148
Figure 30 : Système conçu en année moyenne du passé. 151

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Comparaison des étapes des démarches d'*adaptation science* et de conception d'après Meinke, *et al.* (2009) et Martin, *et al.* (2013). 24
Tableau 2 : Indicateurs cités en réaction à « changement climatique », rang et nombre d'éleveurs y faisant référence. 38
Tableau 3 : Nombre d'observations citées par indicateur d'évolution du climat. Nombre total d'observations citées = 89. 41
Tableau 4 : Evolutions de contexte citées, nombre d'éleveurs y faisant référence et sentiment associé. 44
Tableau 5 : Préoccupations citées et nombre d'éleveurs y faisant référence. 45
Tableau 6 : Sentiments associés aux évolutions du climat perçues et nombre d'éleveurs. 46
Tableau 7 : Adaptations proposées par les éleveurs pour faire face au changement climatique moyen et pour faire face à l'aléa climatique, et nombre de fois où l'adaptation est évoquée. 47
Tableau 8 : Description des six régions pédoclimatiques étudiées : station météo correspondante, orientation fourragères (PP = Prairies Permanente ; PT = Prairie Temporaire ; PA = Prairie Artificielle), pourcentage de maïs dans la SFP (m = moyenne calculée de toutes les exploitations (%), ϭ = écart-type (%)) et nombre d'exploitations suivies. 61
Tableau 9 : Calcul des écarts entre les T°C moyennes et Pp-ETP de l'année 2003 avec les valeurs moyennes de 1989 à 2011, à partir des données de l'année globale et des données de mai à septembre. Significatif au seuil de 5 %. 65
Tableau 10 : Performance, structure et conduite moyenne par zone et écart en 2003 (ou 2004). 66
Tableau 11 : Variables significativement différentes lors de l'année 2003 pour chaque classe de variations de PL/vache entre 2003 et 2004, selon la région pédoclimatique. Résultats obtenus par ANOVA. Détails en Annexe 7. 68
Tableau 12 : Variables significativement différentes lors de l'année 2004 pour chaque classe de variations de PL/vache entre 2003 et 2004, selon la région pédoclimatique. Résultats obtenus par ANOVA. Détails en Annexe 7. 68
Tableau 13 : Variables significativement différentes lors de l'année 2004 entres les deux classes extrêmes de % de chutes de lactation en 2004, selon la région pédoclimatique. Résultats obtenus par ANOVA. 69
Tableau 14 : Variables significativement différentes pour les exploitations la classe S- (critère variation de la production laitière) sur la période 1989-2011, en comparaison à l'ensemble des exploitations par région pédoclimatique. Résultats obtenus par ANOVA. 72
Tableau 15 : Variables significativement différentes pour les exploitations la classe PS (critère variation de production laitière) sur la période 1989-2011, en comparaison à l'ensemble des exploitations par région pédoclimatique. Résultats obtenus par ANOVA. 73
Tableau 16 : Variables significativement différentes pour les exploitations la classe S+ (critère variation de production laitière) sur la période 1989-2011, en comparaison à l'ensemble des exploitations par région pédoclimatique. Résultats obtenus par ANOVA. 74
Tableau 17 : Variables significativement différentes pour les exploitations la classe PS (critère % de chutes) sur la période 1989-2011, en comparaison à l'ensemble des exploitations par région pédoclimatique. Résultats obtenus par ANOVA. 75
Tableau 18 : Evolutions significatives des variables d'intérêt entre 2003 et 2004, en fonction de la classe de variation de production laitière (S-, PS et S+), par région pédoclimatique. Résultats obtenus par ANOVA. .. 76
Tableau 19 : Evolutions significatives des variables d'intérêt entre 2003 et 2004, en fonction de la classe de % de chutes de lactation (TS et PS), par région pédoclimatique. Résultats obtenus par ANOVA. 77
Tableau 20 : Evolution des variables d'intérêt entre « Avant 2003 » et « Après 2003 », pour l'ensemble des exploitations, par région pédoclimatique. 78
Tableau 21 : Particularités de chaque atelier. 136

Tableau 22 : Années support à chaque atelier : origines, précipitations annuelles, concentration de CO_2 atmosphérique et coefficient de correction d'utilisation de rayonnement. 142
Tableau 23 : Années support à chaque atelier selon les indicateurs d'exposition : date de printemps, date d'été, date d'hiver et herbe disponible sur l'année. Zone Montagne. 143
Tableau 24 : Diversité des baguettes disponibles et des baguettes utilisées dans chaque atelier. 144
Tableau 25 : Constitution de chaque atelier. 148
Tableau 26 : Caractéristique des systèmes conçus aux trois ateliers, système laitier, zone de Laguiole (Montagne). (PP : prairies permanentes, PT : prairies temporaires, f :fauche, p : pâture, df : déprimage puis fauche) 150
Tableau 27 : Autonomie et niveau de production des systèmes conçus. 151
Tableau 28 : Statut et utilisation des supports informatifs en fonction de l'étape de l'atelier. 157
Tableau 29 : Tendances passées et évolutions des températures moyennes annuelles et du bilan hydrique climatique selon le scénario A1B sur l'ensemble des stations météorologiques de référence utilisées dans la thèse. 167
Tableau 30 : Tendances passées des indicateurs d'exposition sur l'ensemble des stations météorologiques de référence utilisées dans la thèse. 169
Tableau 31 : Comparaison des valeurs des indicateurs d'exposition entre le passé et le futur à horizon 2050 selon le scénario A1B. 170
Tableau 32 : Comparaison des valeurs des indicateurs d'exposition entre le passé et le futur à horizon 2085 selon le scénario A1B. 170
Tableau 33 : Apports de la thèse concernant les atouts, faiblesses, opportunités et menaces des élevages herbagers face au changement climatique. 174

Liste des *Tables*

Il s'agit des Tableaux des chapitres rédigés en anglais (Chapitres 3 et 4)

Table 1: Mean and trend of mean annual temperature (T, in °C) and climatic water deficit (P-PET, in mm) for past and future climates at each site. 95
Table 2: Difference in days between past and future values of beginning (a) and length (b) of the seasons. 96
Table 3: Past/future difference (in feeding days) with respect to seasonal herbage balance and annual production. 97
Table 4. Locations and De Martonne aridity indices (P/(T+10) (P= annual precipitation, T= mean annual temperature)) of the three study sites for the period 1980-2010 and the year 2003. 109
Table 5. Number of significantly (P<0.05) different clusters (out of 8) per indicator and identity of those significantly different for at least 3 of the indicators. 112
Table 6. Cluster sizes (as a percentage of the sample size) in past and future scenarios. 115
Table 7: Relative frequency (%) of deviation classes defined by σ, calculated considering the seasonal indicators for each year 116
Table 8. Deviation (expressed as the number of standard deviation) of seasonal herbage balance indicators from their means in the past climate series for the two most critical periods during past and future climate series. 119

Introduction générale

1. Positionnement de la thèse

Les systèmes de production agricole sont exposés à un contexte économique, climatique et institutionnel changeant et incertain qui menace leur pérennité. Une exploitation agricole doit notamment faire face aux fluctuations du marché qui jouent sur le prix des intrants et des produits finis et aux aléas climatiques et sanitaires (changements brusques imprévisibles) qui affectent les quantités produites et leurs qualités (Cordier, *et al.* 2008). Elle est également soumise à des changements prévisibles : brusques lorsqu'il s'agit de révisions de politiques (subventions), progressifs concernant le réchauffement climatique.

L'agriculteur, clef de voute du système d'exploitation agricole, assure la durabilité de son exploitation face à ce contexte changeant et incertain. Il articule des sous-systèmes de nature et de dimension diverses. La composante biologique du système, qui se situe à l'échelle de l'agroécosystème ou de l'animal, est conditionnée par les caractéristiques du milieu (sol et climat) et par les choix techniques de l'agriculteur. On parle alors de système biotechnique. Ces choix techniques s'effectuent à différentes échelles (parcelle ou ensemble de parcelles, animal ou lot) et dépendent des possibilités offertes par les ressources naturelles, matérielles, financières et de main d'œuvre de l'exploitation. À partir des ressources disponibles, l'agriculteur détermine les actions à mettre en place dans le temps et dans l'espace pour aboutir à un volume de production et à une qualité qui puissent satisfaire ses objectifs économiques. Les décisions de l'agriculteur doivent être prises à l'échelle de l'exploitation afin de prendre en compte les incompatibilités entre plusieurs actions ou processus simultanés et leur enchaînement. De plus, l'agriculteur doit tenir compte des caractéristiques et des évolutions de systèmes à plus grandes échelles qui vont conditionner les résultats de l'exploitation. En effet, les performances économiques d'une exploitation dépendent du

contexte climatique et sanitaire (qui modifient la qualité et la quantité de la production), du contexte économique (prix des intrants et des produits) et institutionnel (montant des aides accordées).

Le diagnostic des performances d'une exploitation porte habituellement sur sa productivité et sa rentabilité. De même, l'intérêt d'une modification de système, qu'il s'agisse d'une transformation incrémentale ou de rupture (Kates, *et al.* 2012), est classiquement évalué selon des critères productifs et économiques ou bien environnementaux à un instant donné. Cependant, proposer des systèmes moins vulnérables face à un environnement en constante évolution nécessite de prendre en compte la dynamique des systèmes, notamment leur capacité à faire face ou tirer profit des différents changements de contexte auxquels ils sont confrontés (Darnhofer, *et al.* 2008). En ce sens, chercheurs, instituts techniques et collectifs d'agriculteurs développent de nouveaux indicateurs de performance des exploitations. Il s'agit notamment d'aller vers des systèmes plus autonomes (e.g. programmes de réflexion et de formation des CIVAM[*]), flexibles (e.g. CASDAR Flexi-sécurité de l'Idele ; projet ANR O2la[†]; Nozières, *et al.* 2011), robustes et résilients (démarches d'accompagnement au changement des AFOG[‡]; Dedieu et Ingrand 2010; Sauvant et Martin 2010; ten Napel, *et al.* 2011) et ainsi aller vers des systèmes moins vulnérables.

Par ailleurs, les démarches participatives ont connu un essor considérable dans la recherche tout comme dans les politiques publiques depuis une vingtaine d'années (Barnaud 2013). Il s'agit d'intégrer dans les projets les acteurs, individus ou collectifs qui pourraient être affectés négativement ou positivement par les retombées du projet. La recherche participative permet à la fois de 1- répondre à une interrogation de façon pertinente pour un collectif cible, 2- traiter de problèmes complexes en faisant appel à l'expertise et aux compétences d'acteurs diversifiés, 3- et accéder à des connaissances tacites ou non formalisées par les scientifiques. En cela (point 3), la dimension participative permet de compenser des lacunes de connaissances concernant la formalisation des règles de décisions des gestionnaires. Les démarches participatives peuvent être aussi mobilisées pour obtenir un grand nombre de données à large échelle et à long terme. On peut citer entre autres l'Observatoire Des Saisons[§] ou le programme Vigie Nature[**] qui font appel à des volontaires néophytes ou spécialistes pour relever des observations sur la faune et la flore. Les recherches à l'échelle de l'exploitation agricole et du territoire font de plus en plus appel aux agriculteurs ou aux acteurs du territoire pour construire les objectifs du projet, concevoir les dispositifs et récolter des données.

On assiste alors à la multiplication de projets de recherche qui intègrent les agriculteurs à une ou plusieurs étapes du projet. Le statut des agriculteurs dans ces travaux de recherche varie entre experts (pour valider un résultat, un cadre théorique, un modèle de simulation), participants à une expérience (jeu de rôle, simulation du fonctionnement de l'exploitation), ou partenaires à part

[*] Centres d'Initiatives pour Valoriser l'Agriculture et le Milieu rural

[†] Organisations et Organismes Localement Adaptés

[‡] Associations de Formation collective à la Gestion

[§] http://www.obs-saisons.fr/. L'observatoire Des Saisons, initié par le Centre national de la recherche scientifique, a pour objectif de suivre les évolutions de rythmes saisonniers au travers de la phénologie de la faune et de la flore. On retrouve son équivalent outre-manche sous le nom de Nature's Calendar.

[**] http://vigienature.mnhn.fr/. Le programme Vigie Nature, initié par le Muséum national d'Histoire naturelle, a pour objectif de suivre l'évolution de l'abondance et de la diversité spécifique de la faune et de la flore communes.

entière du projet (construction et mise en œuvre du projet) (Neef and Neubert 2010; Prost 2008). L'intégration des agriculteurs dans les projets scientifiques est d'autant plus pertinente lorsqu'il s'agit du changement climatique. En effet, c'est bien à l'agriculteur qu'appartiendra la décision finale de modifier son système en vue d'en atténuer les émissions de gaz à effet de serre et/ou de s'adapter au changement climatique.

La conception participative dans le domaine agricole est une illustration de ces recherches effectuées en partenariat avec les agriculteurs. Plus globalement, qu'elles soient participatives ou non, les démarches de conception visent à améliorer les systèmes existants, voire à en produire de nouveaux. Deux grands types de démarches de conception existent. D'une part, la conception réglée repose sur des objectifs et des modes de validation définis à l'avance (Meynard 2008). Elle consiste en une amélioration pas à pas du système à partir d'aller-retour entre le diagnostic et la modification du système. Elle aboutit ainsi à des systèmes modifiés à la marge, que l'on peut rapprocher à des innovations par exploitation des connaissances existantes. D'autre part, la conception innovante repose sur une démarche exploratoire, dont les critères d'évaluation, les expertises et les modes de validations sont définis tout au long du processus de la conception (Martin, *et al.* 2013). Il s'agit de construire des systèmes en rupture avec les systèmes existants. En cela la conception réglée participe à l'adaptation incrémentale des systèmes alors que la conception innovante participe à l'adaptation par transformation des systèmes (Kates, *et al.* 2012). Ces démarches peuvent porter sur la conception de variétés (Gonzalo-Turpin, *et al.* 2008), d'itinéraires techniques (Loyce, *et al.* 2008), de systèmes de cultures (Willaume, *et al.* 2013), de systèmes de production (Le Gal, *et al.* 2010; Martin, *et al.* 2010), d'organisation spatiales d'itinéraires techniques à l'échelle d'un territoire (Schaller 2011) et d'organisations des filières à l'échelle d'un territoire (Moraine, *et al.* 2013). Elles peuvent également porter sur la conception d'outils d'évaluation à destination des agriculteurs ou des instituts techniques (Carberry, *et al.* 2002; Lecomte, *et al.* 2010).

C'est dans cette perspective que cette thèse s'interroge sur les indicateurs et méthodes à utiliser pour évaluer la vulnérabilité d'un système dans un contexte changeant et incertain, et plus particulièrement face au changement climatique. Elle questionne notamment la pertinence des démarches de conception participatives pour accompagner l'adaptation des élevages au changement climatique. Elle ne prend pas en compte d'autres évolutions de contexte telles que les évolutions politiques et économiques.

2. Le changement climatique

Le changement climatique est défini par «*une variation de l'état du climat que l'on peut déceler par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus*». Pour le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC[*]), «*il se rapporte à tout changement du climat dans le temps, qu'il soit dû à la variabilité naturelle ou à l'activité humaine*». En revanche dans la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, le changement climatique désigne «*des changements qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine […] et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables* » (Pachauri and Reisinger 2007).

[*] IPCC en anglais pour Intergovernmental Panel on Climate Change. En 2007, le GIEC a été récompensé du prix Nobel de la Paix pour son travail sur le changement climatique.

Le changement climatique se manifeste à l'échelle du globe par une hausse des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan de 0.74°C en 100 ans (période 1906–2005). Chacune des trois dernières décennies a été successivement plus chaude que toutes les décennies précédentes depuis 1850 : la première décennie du 21ème siècle (2001-2010) a donc été la plus chaude depuis 1850 (IPCC 2013). Les climatologues prévoient une augmentation des températures à l'échelle mondiale de 0.4°C d'ici vingt ans et de 1.8 à 4°C d'ici la fin du siècle (Pachauri and Reisinger 2007). En France métropolitaine, l'augmentation de la température, plus marquée l'été que l'hiver, s'accompagnera d'une augmentation de la fréquence des vagues de chaleur et des risques de sécheresse estivale. Les précipitations en hiver devraient diminuer sur le Sud et augmenter sur le Nord alors que la baisse des précipitations devrait être généralisée pour les autres saisons (Braconnot, *et al.* 2009).

Le 5eme rapport du GIEC, paru début octobre 2013, établit clairement que le changement climatique est en partie causé par l'activité humaine (IPCC 2013). De surcroît, il est extrêmement probable que l'influence humaine soit la cause dominante du changement climatique observé. En effet, le changement climatique passé ne peut pas s'expliquer sans prendre en compte l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre (GES[*]) d'origine humaine dans l'atmosphère. Parmi les contributions au changement climatique d'origine anthropique, la plus grande concerne l'augmentation de la concentration atmosphérique du dioxyde de carbone (CO_2) depuis 1750. La concentration de CO_2 dans l'atmosphère a atteint 400 ppm dans le courant de l'année 2013, concentration la plus élevée des 800 000 dernières années. Elle a augmenté de 20 % depuis 1958 et de 40 % depuis 1750, début de l'ère industrielle.

De ce fait, les systèmes socio-écologiques de la planète seront face à une situation climatique inédite dans l'histoire de l'humanité. C'est pourquoi les nations et la communauté scientifique s'interrogent sur la vulnérabilité au changement climatique du système dans lequel nous vivons.

3. Cadres théoriques

3.1. Vulnérabilité

La vulnérabilité d'un système à un changement de contexte dépend de son exposition, sa sensibilité et sa capacité d'adaptation face à ce changement (Adger 2006). L'exposition renvoie à la durée, à l'amplitude et à la fréquence des changements de contexte dans lequel le système évolue. Elle recouvre les changements prévisibles et non prévisibles ainsi que les changements brutaux (perturbations) ou tendanciels (évolutions). La sensibilité se rapporte à l'ampleur de la modification du système provoquée par un changement de contexte, qu'elle soit favorable ou défavorable (IPCC, 2001). La sensibilité se limite aux variations des performances directement provoquées par un changement ; les modifications d'organisation du système provoquées par un changement de contexte sont des adaptations. La capacité d'adaptation est la capacité d'un système à modifier ses caractéristiques face à un changement de contexte afin d'en atténuer les effets ou de tirer avantage de conditions nouvelles (Engle 2011).

[*] Les gaz à effet de serre atmosphériques absorbent les infrarouges émis par la surface de la terre, diminuant ainsi l'énergie restituée vers l'espace (phénomène appelé forçage radiatif positif). La rétention d'énergie par l'atmosphère entraine un réchauffement du globe. Les GES d'origine anthropique sont le CO_2, le CH_4, le N_2O, et les hydrocarbures halogénés. Chacun de ces gaz a une capacité de forçage radiatif différente.

Le cadre de la vulnérabilité offre une multitude d'angles d'approche possibles (Costa and Kropp 2012). Selon les disciplines et selon le système et le changement de contexte étudiés, la vulnérabilité est appréhendée à différentes échelles spatiales et temporelles. Elle peut être abordée à l'échelle d'un individu, d'un ménage, d'une communauté, de l'humanité ou d'un écosystème face à une modification précise du contexte (ex : sécheresse), de plusieurs variations de contexte simultanées ou de l'ensemble du contexte (économique, climatique, social, sanitaire…) (Smit and Wandel 2006). Cette diversité de domaines d'application a conduit à une profusion de défintions de la vulnérabilité et à une multitude de concepts qui y sont attachés (Hinkel 2011). S'ajoute à cela la diversité des approches méthodologiques pour effectuer une analyse de vulnérabilité (Hinkel 2011; Pearson, *et al.* 2011). Il peut s'agir d'analyser la vulnérabilité à l'aide d'indicateurs, de simulations informatiques, d'approches participatives. A la fois par sa définition et sa généricité, la vulnérabilité s'apparente fortement au concept de résilience (Holling 1973; Holling 2001). Néanmoins, la vulnérabilité se distingue de la résilience par sa prise en compte explicite de l'homme comme pilote du système et donc comme moteur de l'adaptation.

Les analyses de vulnérabilité au changement climatique ont différents objectifs (Hinkel 2011; Smit and Wandel 2006):

- définir des objectifs d'atténuation du changement climatique,
- identifier des zones ou des populations particulièrement vulnérables vers où diriger en priorité les efforts d'adaptation,
- et évaluer l'efficacité de politiques d'adaptations.

Le concept de vulnérabilité provenant des science du climat, une large part de ces travaux s'intéresse à évaluer la vulnérabilité des populations ou des systèmes socio-écologiques au changement climatique, à l'échelle d'un continent et à l'échelle mondiale (Smit and Wandel, 2006 ; voir Turner et *al.*, 2003; Metzger et *al.*, 2006; Nelson et *al.*, 2010).

Dans ce contexte, adapter un système au changement climatique revient à diminuer sa vulnérabilité. Trois voies d'adaptation complémentaires sont proposées : réduire l'exposition[*], réduire la sensibilité et augmenter la capacité d'adaptation d'un système face au climat (Adger, *et al.* 2005). Cependant, l'analyse ou l'exploration d'une seule de ces trois voies d'adaptation se heurte à la complexité des relations entre vulnérabilité et ses composantes (exposition, sensibilité et capacité d'adaptation). Même si de nombreux travaux évaluent la vulnérabilité de systèmes dans son ensemble, peu de travaux s'intéressent aux liens entre exposition, sensibilité et capacité d'adaptation (Hinkel 2011). En effet, chacun de ces termes est difficilement définissable et analysable indépendamment des autres. D'une part l'exposition n'a pas de définition claire (Costa and Kropp 2012), n'entre parfois pas dans la définition de la vulnérabilité (Gallopin 2006) ou est analysée avec la sensibilité (Belliveau, *et al.* 2006; Luers 2005; O'Brien, *et al.* 2004). D'autre part, la distinction entre sensibilité et capacité d'adaptation est difficile à établir lorsque l'on étudie des systèmes dynamiques (Polsky, *et al.* 2007; Reidsma, *et al.* 2007).

[*] A l'échelle mondiale, réduire l'exposition au changement climatique signifie atténuer le changement climatique en diminuant les émissions de GES. A l'échelle d'une population (e.g. habitants des zones littorales) ou d'un système de production agricole, réduire l'exposition signifie également se déplacer vers une zone moins exposée.

3.2. *Adaptation science* et théories de la conception

La capacité d'adaptation d'un système piloté dépend, au-delà de la structure et des caractéristiques physiques du système, de la propre capacité d'adaptation du gestionnaire. Marshall, *et al.* (2013) définissent la capacité d'un individu à s'adapter au changement comme sa capacité à convertir les ressources existantes (financières, naturelles, humaines, sociales et physiques) en des stratégies d'adaptations réussies. Ils proposent quatre caractéristiques mesurables de la capacité d'adaptation d'un individu :

- la gestion du risque et de l'incertitude,
- les compétences de planification, d'apprentissage et de réorganisation,
- la flexibilité financière et émotionnelle,
- et l'intérêt pour s'adapter.

Cependant, sans un support politique efficace, chaque individu va probablement favoriser dans ses choix d'adaptation ses propres intérêts à court terme plutôt que la durabilité de son système sur le long terme (Meinke, *et al.* 2009).

L'*adaptation science* est un courant de recherche dont l'objectif est de stimuler et faciliter les processus d'adaptation des systèmes socio-écologiques (Meinke, *et al.* 2009). Son postulat initial est que la science ne répondra jamais que partiellement aux questions de la société. Les solutions que fourniraient les sciences conventionnelles seraient insuffisantes car trop spécifiques et précises pour construire les capacités d'adaptation des systèmes en tenant compte de leur complexité et de leur environnement. L'objectif de l'*adaptation science* est d'accompagner l'action collective en fournissant aux acteurs et décideurs des informations pertinentes et des méthodes appropriées pour le choix d'adaptations. En accompagnant l'action collective, elle se positionne à l'interface entre science et société et dépasse les limites disciplinaires. Il s'agit de parvenir à ce que le dialogue et la négociation entre différents porteurs d'enjeux (dont les scientifiques) puissent être renseignés par la science. La légitimité de l'*adaptation science* pour accompagner la décision politique réside dans le fait qu'elle se limite aux questions d'adaptation préalablement identifiées et traitées par la sphère politique. Elle repose sur des approches tenant compte de la spécificité de chaque contexte et qui participent aux échanges entre différents porteurs d'enjeux.

La recherche participative et la modélisation systémique sont citées par Meinke et al., (2009) comme des moyens pour la science de construire du capital social car elles font lien entre chercheurs, décideurs et acteurs. Elles permettent notamment aux différents porteurs d'enjeux de construire, analyser, discuter et apprendre dans une dynamique d'adaptation orientée.

En effet, le volet participatif de la recherche permettrait selon Meinke de répondre à cet enjeu de transformation de l'information scientifique en action concrète étant donné qu'il permet de tenir compte de la pertinence, la crédibilité et la légitimité des adaptations discutées. Enfin, la modélisation et son intégration au processus participatif faciliterait la combinaison des connaissances scientifiques et des connaissances locales dans la prise de décision.

Pour les systèmes agricoles et les écosystèmes naturels, l'*adaptation science* passe par plusieurs étapes (Meinke, *et al.* 2009) (Figure 1) :

1. comprendre le système actuel et connaître l'envergure des modifications possibles de normes et de valeurs,
2. identifier les enjeux principaux et critères de décision possibles ; clarifier : qui, quoi, comment ?

3. évaluer les impacts et tendances (climatiques), ainsi que leur incertitude,
4. apprécier si l'impact constitue un problème,
5. évaluer les options d'adaptations et leurs conséquences,
6. concevoir et évaluer la mise en œuvre de ces options d'adaptation.

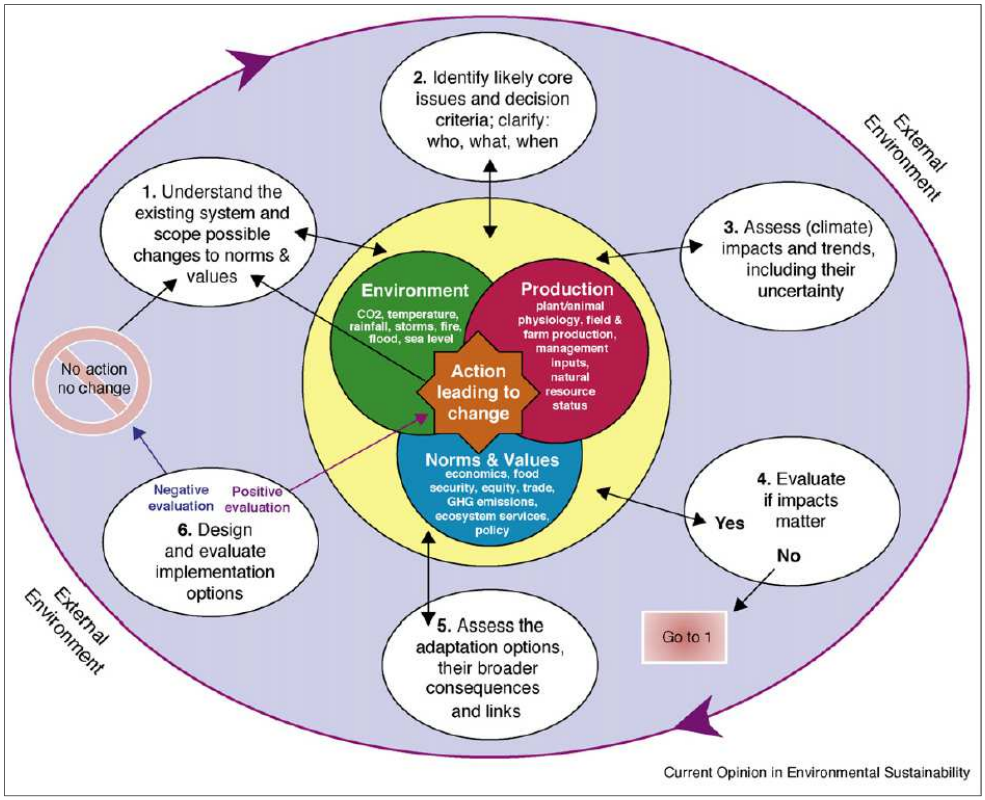


Figure 1 : Les différentes étapes de l'*Adaptation science*, tiré de Meinke, *et al.* (2009).

De cette description de l'*adaptation science*, des similitudes évidentes apparaissent entre *adaptation science* et conception assistée par modèles informatiques telle que résumée par Martin, *et al.* (2013) (Figure 2 et Tableau 1). Dans les deux cas, il s'agit de passer par :

- la conceptualisation de la situation (comprendre le système),
- l'identification d'un problème et des contraintes externes,
- la proposition de solutions et l'évaluation de leurs conséquences,
- la vérification de leur faisabilité/l'élaboration d'un mode d'application,
- et enfin la sélection ou le rejet de la proposition.

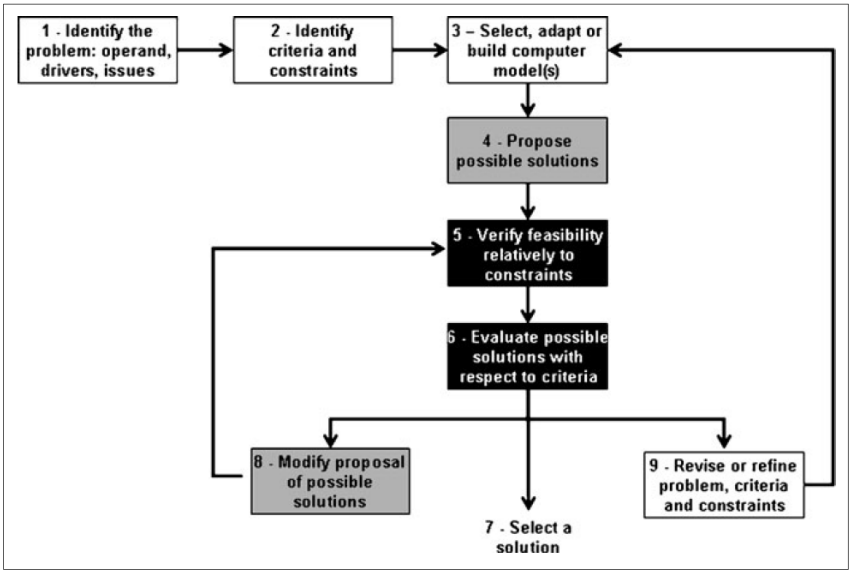


Figure 2 : Les différentes étapes du processus de conception, tiré de Martin, et al. (2013).

Tableau 1 : Comparaison des étapes des démarches d'*adaptation science* et de conception d'après Meinke, *et al.* (2009) et Martin, *et al.* (2013).

	Adaptation science	**Conception**
conceptualisation de la situation	1. comprendre le système actuel et connaître l'envergure des modifications possibles de normes et de valeurs	1. identifier le problème : leviers, forces motrices, problèmes
identification d'un problème et des contraintes externes	2. identifier les enjeux principaux et critères de décision possibles ; clarifier : qui, quoi, comment ?	1. identifier le problème : opérande, forces motrices, problèmes 2. identifier les critères et contraintes
	3. évaluer les impacts et tendances (climatiques), ainsi que leur incertitude	
	4. apprécier si l'impact constitue un problème	
proposition de solutions et évaluation de leurs conséquences	5. évaluer les options d'adaptations et leurs conséquences	4. proposer des solutions possibles 5. vérifier la faisabilité relativement aux contraintes
vérification de la faisabilité d'une solution et élaboration d'un mode d'application	6. concevoir et évaluer la mise en œuvre de ces options d'adaptation.	4. proposer des solutions possibles 5. vérifier la faisabilité relativement aux contraintes 6. évaluer les solutions possibles pour satisfaire le critère
sélection ou rejet de la proposition	Action entrainant le changement	7. sélectionner une solution

Contrairement à l'*adaptation science*, les théories de la conception se sont initialement intéressées à développer des méthodes prescriptives de conception dans l'objectif de trouver une gamme de solutions optimales au sens de critères se prêtant bien au calcul (Martin, *et al.* 2013). Depuis, diverses méthodes ont été imaginées, testées et comparées parmi lesquelles la conception participative se développe progressivement. En agronomie, il existe plusieurs modalités d'implication des non-scientifiques dans la démarche de conception, allant de l'absence d'intégration des porteurs d'enjeux dans la conception à leur implication collégiale ; ils prennent alors part aux décisions au cours du processus de recherche (Barreteau, *et al.* 2010). Ce faisant, la distinction entre conception et *adaptation science* est de plus en plus ténue mais réside encore sur des différences de postures. L'*adaptation science* considère que c'est à la sphère politique d'arbitrer le bon et le mauvais d'une option d'adaptation. En cela, l'*adaptation science* met l'accent sur la concrétisation des adaptations

dans l'action, à l'aide des acquis scientifiques pluridisciplinaires, alors que la conception met l'accent sur la recherche du meilleur compromis. On peut alors parler de conception sans parler d'adaptation, notamment lorsqu'il s'agit de créer de nouveaux objets.

Nous tenterons dans cette thèse de relier les deux courants de recherche « conception » et « *adaptation science* » en proposant des outils et des méthodes s'inspirant à la fois des analyses de vulnérabilité et des méthodes de conception participative. En effet, analyse de vulnérabilité et conception nous paraissent complémentaires. L'analyse de vulnérabilité, qui fournit des informations pertinentes aux décideurs pour comprendre le système, ses contraintes et les impacts possibles du changement climatique, apparaît insuffisante car elle ne parvient pas à proposer des adaptations (Berrang-Ford, *et al.* 2011). La conception participative de systèmes pourrait combler cette lacune par sa capacité à assister la réflexion et l'échange de connaissances entre scientifiques et acteurs concernant les adaptations possibles.

4. Problématique

Les systèmes d'élevage qui produisent la majorité de leurs ressources fourragères sont particulièrement exposés au changement climatique. En effet, de nombreuses décisions à l'échelle du système fourrager, du système animal et du système d'alimentation sont fortement dépendantes du climat moyen et de sa variabilité. Par exemple, le climat moyen va orienter les choix sur les espèces et variétés cultivées, la date de vêlage (lorsque les vêlages sont groupés) et le chargement alors que la météo va orienter le calendrier d'alimentation effectif, la durée du tour de pâturage et les dates de début et de fin de pâturage, de fermeture du silo à grain, de récoltes et de fauches.

Le changement climatique futur devrait avoir des conséquences sur les ressources fourragères en termes de quantité et de période de production. A l'horizon 2050 et selon le scénario A1B[*], le climat provoquerait en France une augmentation de la saisonnalité de la production de l'herbe avec un printemps plus précoce, plus court et avec une vitesse de croissance de l'herbe plus élevée, un été plus long et un automne plus productif (Felten, *et al.* 2011). En outre, la quantité annuelle de biomasse produite pourrait augmenter à horizon 2020 pour ensuite diminuer à horizon 2070 selon le scénario A2[†] (Ruget, *et al.* 2010). Quant aux cultures fourragères annuelles, les modifications porteraient principalement sur un cycle raccourci et plus précoce, une augmentation du volume d'eau nécessaire à l'irrigation et une baisse des rendements. Sans changement variétal, le positionnement estival du cycle de culture du maïs provoquerait un raccourcissement de la période de remplissage des grains, pouvant engendrer des baisses de rendements de 1t/ha d'ici 2035 et de 1.5t/ha d'ici 2085 (Brisson and Levrault 2010).

De cet aperçu des conséquences du changement climatique sur la disponibilité de la ressource fourragère, il est cependant difficile d'anticiper quelles seront la sensibilité des élevages herbagers et les réactions des éleveurs.

- Ces modifications induiront-elles des baisses ou des hausses de performances à l'échelle de l'exploitation? En d'autres termes, *les exploitations seront-elles sensibles au changement climatique ?*

[*] L'un des six scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre élaborés par le GIEC. Le scénario A1B est le scénario «estimation intermédiaire». Plus de détails sur les scénarios du GIEC en Annexe 1.

[†] Idem. Le scénario A2 est le scénario «estimation haute».

- Ces modifications nécessiteront-elles une évolution des systèmes d'exploitation pour faire face à une situation défavorable ou tirer parti d'une situation favorable ? En d'autres termes, *les exploitations auront-elles à s'adapter au changement climatique, et, le pourront-elles?*

En conséquence, la *problématique* de cette thèse est :
Comment caractériser et diminuer la vulnérabilité des systèmes d'élevage herbagers au changement climatique ?

Vus la diversité des méthodes possibles pour analyser la vulnérabilité d'un système et le manque de littérature concernant la vulnérabilité à l'échelle de l'exploitation agricole, nous aborderons ce sujet en nous positionnant à la fois dans les courants de recherche sur la vulnérabilité et sur l'adaptation. Notre *question de recherche* est donc:

Dans quelles mesures l'analyse de la vulnérabilité et la conception participative de systèmes permettent-elles d'accompagner l'adaptation des élevages au changement climatique ?

Cette thèse se limite à l'adaptation des élevages herbagers aux conséquences du changement climatique sur la ressource fourragère. Elle ne traite pas des mesures d'atténuation du changement climatique qui pourraient être mis en place dans les élevages pour diminuer leurs émissions de GES.

5. Démarche et dispositifs

Pour répondre à notre question de recherche nous avons tenté de répondre aux questions suivantes:

Partie 1. Comment réagissent les exploitations d'élevage herbager face à une évolution du climat ?

- *A l'échelle du gestionnaire : Les éleveurs perçoivent-ils le changement climatique et s'y adaptent-ils ?*

L'objectif est de renseigner les capacités cognitives des éleveurs à faire face au changement climatique : les éleveurs risquent de ne pas être en mesure de s'adapter au changement climatique s'ils n'en n'ont pas conscience.

A partir d'entretiens semi-directifs individuels, nous déterminerons la définition que les éleveurs ont du changement climatique, le crédit qu'ils lui accordent, et la place qu'il occupe parmi leurs principales préoccupations. Nous identifierons également les indicateurs que les éleveurs utilisent pour décrire une évolution du climat, et nous décrirons les adaptations que les éleveurs envisagent pour faire face au changement climatique (Chapitre 1).

- *A l'échelle des composantes physiques du système : Quelle est la sensibilité des élevages herbagers face à une année chaude et sèche, et quelles sont les adaptations mises en œuvre ?*

L'objectif est d'identifier des stratégies et tactiques qui ont permis aux exploitations de faire face à une année climatique que l'on considère typique d'une situation climatique devenant plus fréquente dans le futur : une année chaude et sèche, à savoir l'année 2003.

Notre étude consistera en l'analyse des performances, des stratégies et des tactiques des exploitations bovines laitières à partir d'une base de données qui regroupe les informations des exploitations du Sud-Ouest de la France sur la période 1989-2010 (Chapitre 2).

Partie 2. Le changement climatique a-t-il et va-t-il modifier l'exposition des élevages herbagers au climat?

- *Comment caractériser l'exposition des systèmes herbagers au changement climatique ?*
- *Le changement climatique va-t-il générer une modification d'exposition en termes de types d'années herbagères et de variabilité de la production herbagère ?*

L'objectif est de quantifier la contrainte climatique en prenant en compte les spécificités des systèmes herbagers, à savoir l'alternance de périodes de récolte et de distribution de fourrages. Ce travail permettra de comparer des régions selon leur niveau d'exposition au changement et à la variabilité climatique mais également d'examiner s'il y a eu des changements significatifs au cours des dernières décennies, et quelle tendance est attendue pour le futur. L'enjeu est d'obtenir une caractérisation de l'exposition au changement et à la variabilité climatiques plus parlante aux éleveurs qu'uniquement des données météorologiques. Il s'agit notamment d'utiliser un modèle de simulation informatique pour prendre en compte les effets opposés ou additifs des différentes composantes du climat sur la dynamique de la croissance de l'herbe.

Nous construirons des indicateurs spécifiques des systèmes herbagers et analyserons leur tendance d'évolution passée et future pour cinq sites de Midi-Pyrénées (Chapitre 3). Sur trois de ces sites, nous utiliserons également ces indicateurs pour explorer les modifications de types d'années fourragères et de variabilité de la production herbagère que pourrait impliquer le changement climatique (Chapitre 4).

Partie 3. Quelles pourraient-être les adaptations des élevages herbagers face au changement climatique ?

- *Comment concevoir des systèmes d'élevage herbagers adaptés au climat futur ?*

L'objectif est d'imaginer les adaptations possibles des élevages en prenant à la fois en compte le changement climatique moyen, la variabilité climatique et le caractère imprévisible du climat. Il s'agit, par la réflexion sur les adaptations possibles, de communiquer sur le changement climatique et ses conséquences auprès des éleveurs.

Nous développerons une méthode de conception participative de systèmes d'élevage qui répond à cet objectif. Nous nous appuierons sur une application de la méthode auprès d'éleveurs de zone de montagne pour identifier ses points forts et ses limites (Chapitre 5).

6. Organisation du manuscrit

La thèse est organisée en trois parties, constituées d'un ou de deux chapitres. Chaque chapitre est au format d'un article scientifique avec Introduction, Matériels et Méthodes, Résultats, Discussion et Conclusion et se rapporte à une des questions énoncées ci-dessus.

La Partie I questionne le comportement des systèmes d'élevage herbagers au sens large face au changement climatique passé. Elle regroupe les Chapitres 1 et 2. Le Chapitre 1 s'intéresse à la perception que les éleveurs ont du changement climatique. Il s'appuie sur un travail de terrain mené dans les zones de Laguiole et de Quins, en Aveyron (Figure 3). Le Chapitre 2 consiste en l'analyse de la sensibilité des élevages à un évènement climatique exceptionnel (année 2003) et identifie les adaptations tactiques et stratégiques qui ont été mises en place pour y faire face. Il s'appuie sur l'analyse d'une base de données qui recouvre l'ensemble du territoire Midi-Pyrénées et Pyrénées Atlantiques (Figure 3). Ensuite, la Partie II cherche à identifier si l'exposition au climat des élevages à

base d'herbe est modifiée par le changement climatique. Elle regroupe les Chapitre 3 et 4 qui correspondent aux deux articles que j'ai publiés en premier auteur au cours de la thèse. Dans le Chapitre 3, je propose des indicateurs d'exposition au climat spécifique aux systèmes herbagers et analyse leurs tendances passées et futures pour cinq sites de Midi-Pyrénées (Figure 3). Le Chapitre 4 utilise ces indicateurs pour questionner les conséquences du changement climatique en termes de types d'années fourragères et de variabilité de production herbagère à l'échelle de la saison. Enfin, la Partie III propose une méthode de conception système dont l'objectif est de faciliter la réflexion des éleveurs et des chercheurs sur les adaptations possibles des élevages face au changement climatique. Elle est composée uniquement du Chapitre 5 dans lequel la méthode est présentée puis mise à l'épreuve du terrain pour des élevages laitiers sur la zone de Laguiole (région de moyenne montagne en Aveyron) (Figure 3).

Dans la section Discussion Générale, nous revenons sur l'ensemble du travail effectué. Nous y faisons une synthèse des évolutions de l'exposition au changement climatique pour l'ensemble des zones étudiées, pour en déduire des implications à l'échelle du système d'élevage. Nous discutons des apports de la thèse concernant les atouts, faiblesses, opportunités, et menaces des élevages herbagers face au changement climatique. Nous discutons également de ses apports méthodologiques et de ses limites. Enfin, nous discutons la place des éleveurs dans cette thèse.

Nous concluons cette thèse en nous interrogeant sur les savoir-faire et savoir-être qu'un chercheur doit développer pour accompagner l'adaptation des systèmes agricoles au changement climatique.

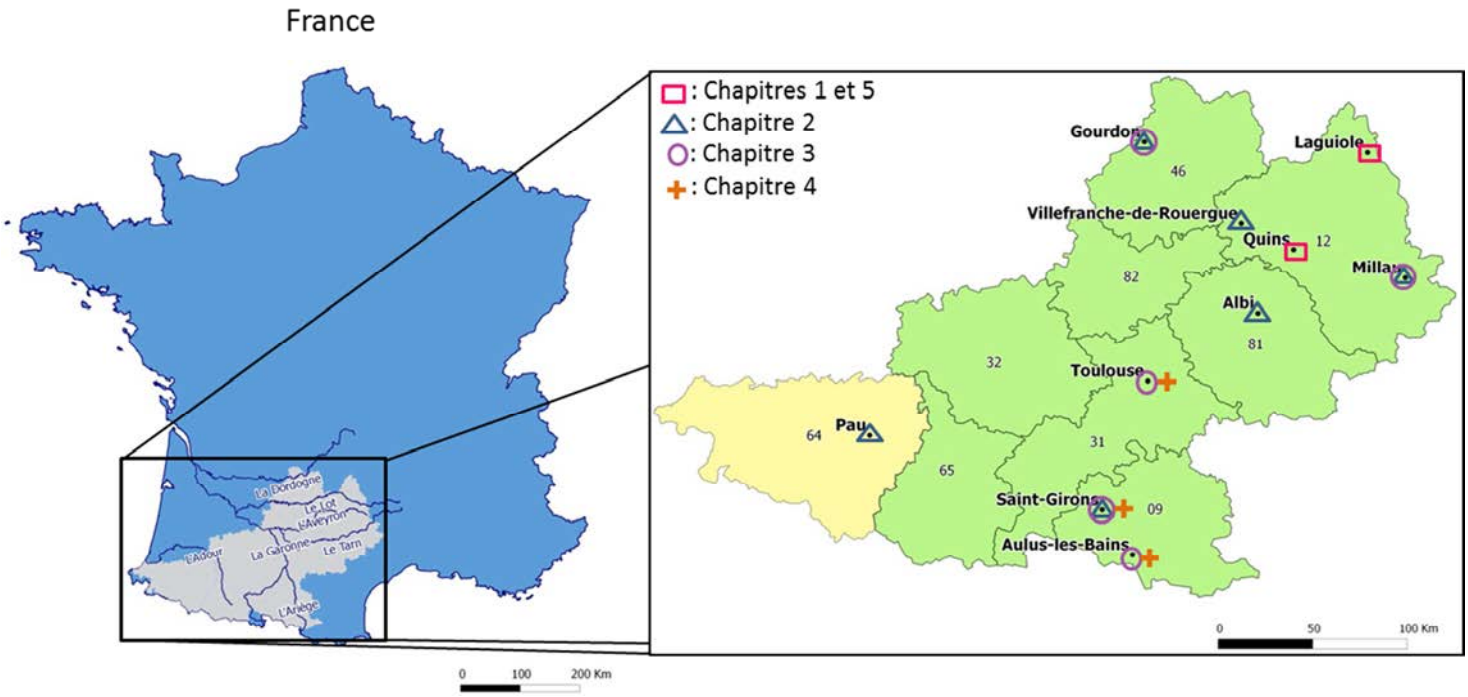


Figure 3 : Terrains d'étude de la thèse, et chapitre de thèse associé. En vert : Région Midi-Pyrénées. En jaune (clair) : département des Pyrénées Atlantiques située en région Aquitaine. Conception C. Murgue.

Partie I : Elevages et éleveurs face au changement climatique passé

« Jusqu'ici je n'ai parlé que des années fastes où les pluies étaient abondantes. Il y avait aussi les années sèches, terreur de la Vallée. L'eau suivait un cycle étalé sur trente ans : d'abord venaient cinq ou six magnifiques années humides avec dix-neuf à vingt-cinq pouces d'eau ; c'était un débordement d'herbe. Puis, six ou sept bonnes années avec leurs douze à seize pouces ; ensuite c'étaient les années sèches avec leurs maigres sept à huit pouces. La terre durcissait, les plantes ne trouvaient pas la force de pousser et la pelade dénudait la Vallée. Les chênes verts semblaient pétrifiés et l'armoise était grise. Le sol se fendillait, les ruisseaux tarissaient, le bétail mâchonnait les ramilles sèches ; les vaches maigrissaient et quelquefois crevaient de faim. Les gens, s'ils voulaient boire, devaient aller chercher leur eau dans des barriques. Alors les fermiers et les éleveurs maudissaient leur Vallée. Des familles vendaient pour une bouchée de pain et s'en allaient. C'était immanquable : pendant les années sèches, les gens oubliaient les années prospères et, dès que la pluie revenait, ils oubliaient la sècheresse. Il en était toujours ainsi. »

John STEINBECK
A l'Est d'Eden, paru en 1952

Chapitre 1 - Perceptions et représentations du changement climatique chez des éleveurs de bovins laitiers et allaitants en Aveyron

1. Introduction

Le changement climatique est avéré tant à l'échelle mondiale que locale. Il se manifeste notamment par une hausse des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan (+ 0,74 °C en 100 ans à la surface du globe), une fonte massive de la neige et de la glace et une élévation du niveau moyen de la mer (1,8 mm/an depuis 1961) (Pachauri and Reisinger 2007). Le changement climatique est une certitude scientifique (Houghton, *et al.* 1990) et il existe un fort consensus scientifique pour en attribuer une partie aux activités humaines (Cook, *et al.* 2013; Oreskes 2004). Cependant, une part de la population reste sceptique concernant l'existence du changement climatique : en 2013, 13 % de la population française doute de l'existence du changement climatique (aux Etats-Unis, 20 % de la population nie le changement climatique et 23 % « ne sait pas » en 2010) (Leiserowitz, *et al.* 2012; Martin 2013). C'est d'autant plus le cas concernant son origine anthropique : 22 % des français considère qu'il n'est pas prouvé que les activités humaines soient à l'origine de ce changement. Ce scepticisme climatique a pour conséquences un désengagement politique et une inefficacité des mesures de lutte et d'adaptation au changement climatique (e.g. Patt and Schroter 2008). En effet, les connaissances scientifiques sur les manifestations, les causes et les conséquences du changement climatique ne peuvent être mobilisées pour la décision et l'action qu'à condition qu'elles soient perçues comme pertinentes (pouvant répondre au problème posé), légitimes (justes et impartiales) et crédibles (fiables scientifiquement) (Cash, *et al.* 2003).

A l'échelle d'un individu, la perception du changement climatique influe sa capacité d'adaptation. En effet, pour modifier son comportement, préparer une adaptation, ou tirer avantage d'une situation, un individu doit être convaincu que le changement climatique existe et va continuer (Howden, *et al.* 2007; Tschakert and Dietrich 2010) et qu'il est capable de s'y adaptater (Blennow and Persson 2009). Dans le domaine agricole il a été démontré que les agriculteurs qui sont convaincus de l'existence du changement climatique présentent de meilleures capacités pour gérer le risque et le changement. Ils sont susceptibles de l'anticiper, d'apprendre et s'organiser et ils sont plus disposés à modifier leurs systèmes (Marshall, *et al.* 2013; Wheeler, *et al.* 2013). Par ailleurs, considérer le changement climatique comme une menace ou en reconnaitre la part anthropique les rend plus susceptibles de prendre part à des programmes d'adaptation (Arbuckle, *et al.* 2013b; Arbuckle, *et al.* 2013a). Cependant, la capacité d'adaptation au changement climatique ne dépend pas uniquement de la perception du changement climatique, mais plus largement de la somme des valeurs et des croyances des individus dans leur globalité. En effet, dans certains cas, les différences d'adaptations mises en place face au changement climatique ne s'expliquent ni par le niveau de croyance au changement climatique, ni par la confiance dans ses propres capacités d'adaptations, mais par des valeurs d'altruisme et d'ouverture au changement (Rogers, *et al.* 2012).

Les systèmes d'élevage qui produisent la majorité de leurs ressources fourragères sont particulièrement soumis à la contrainte climatique car leur gestion dépend de la disponibilité de la ressource fourragère (herbe et maïs) à l'échelle de la saison et de l'année (Charpenteau and Duru 1983). En effet, de nombreuses décisions sont fortement dépendantes du climat. On peut citer entre autres des décisions stratégiques comme le choix des espèces et variétés cultivées, celui du chargement et, lorsque les vêlages sont groupés, celui de la date de vêlage ainsi que des décisions tactiques comme la durée du tour de pâturage, les choix des dates de début et fin de pâturage, celles de fermeture du silo à grain, celles de récolte et des fauches.

Du fait de cette forte dépendance au climat, ces élevages sont particulièrement exposés au changement climatique. En effet, la modification du climat dans sa moyenne (augmentation des températures moyennes et de la concentration de CO_2) et sa variabilité (intensité des pluies, des sécheresses, amplitude thermique…) est susceptible de modifier la disponibilité des fourrages en termes de quantité et de saisonnalité de la production. Par exemple, l'augmentation des températures aura pour conséquence l'allongement de la durée de la saison de croissance, dont le début sera plus précoce et la fin plus tardive (Rivington, *et al.* 2013). D'ailleurs, des modifications de la quantité de biomasse produite à l'échelle de la saison ont déjà été observées dans le cas des prairies (Ma, *et al.* 2010). Ces modifications de la productivité fourragère et du calendrier de production pourraient avoir des conséquences sur les décisions de gestion de l'exploitation d'élevage.

L'importance du climat dans les décisions de l'éleveur et les conséquences du changement climatique sur la productivité et la saisonnalité de la ressource fourragère placent les éleveurs en position d'observateurs privilégiés des évolutions du climat et d'acteurs essentiels à l'adaptation des élevages au changement climatique. Cependant, sans prise de conscience du changement climatique, les éleveurs risquent de ne pas être en mesure de s'y adapter, augmentant ainsi leur vulnérabilité. L'objectif de ce chapitre est de renseigner les capacités des éleveurs à faire face au changement climatique. Pour cela, nous faisons état de ce que perçoivent les éleveurs concernant ce changement. D'une part, nous cherchons à définir des profils de perception du changement climatique chez les éleveurs afin d'identifier des verrous cognitifs à l'adaptation des élevages au changement climatique. Il s'agit à la fois de déterminer la définition que les éleveurs ont du changement climatique, le crédit qu'ils lui accordent, et la place qu'il occupe parmi leurs principales préoccupations. D'autre part, nous cherchons à identifier les indicateurs que les éleveurs utilisent pour décrire une évolution du climat afin d'identifier des pistes pour renforcer l'efficacité de la communication sur le changement climatique auprès des éleveurs. Enfin, nous décrivons les adaptations que les éleveurs envisagent pour faire face au changement climatique. Notre étude, dont la visée est exploratoire, ne cherche pas à faire un état statistiquement représentatif de la perception des éleveurs du changement climatique mais à identifier une diversité de points de vue d'éleveurs. Elle repose sur l'analyse d'entretiens semi-directifs dans deux zones pédoclimatiques en Aveyron (France) auprès d'éleveurs bovins laitiers et bovins allaitants.

2. Matériels et méthodes

2.1. Méthode de recueil de données

Des témoignages d'éleveurs ont été recueillis lors d'entretiens individuels semi-directifs, permettant d'aborder la question du changement climatique tout en la situant dans une problématique plus globale. Par rapport aux méthodes de sondage et de questionnaire, l'entretien semi-directif permet de faire émerger des réponses et des raisonnements qui n'auraient pas été présupposés par l'enquêteur. Enfin, l'entretien individuel permet une plus grande liberté de parole que lors d'une discussion de groupe car il diminue la censure « sociale » qu'un individu inflige à son discours. L'entretien individuel se justifie également par notre volonté de comprendre les différentes perceptions individuelles et non la perception commune des éleveurs. Ainsi, nous voulions saisir la diversité des points de vue concernant le changement climatique sans chercher les points de consensus.

Nous avons choisi une approche qualitative d'analyse de discours. Cette méthode a été privilégiée par rapport aux méthodes quantitatives car elle permet de mieux saisir le schéma global de raisonnement de l'enquêté.

2.2. Guide d'entretien

Nous avons repris une structure d'entretien similaire à celle utilisée par Fayel (2012) pour étudier la perception du changement climatique par les agriculteurs du massif des Pyrénées.

Le guide d'entretien est structuré en trois parties principales et aborde progressivement la question du changement climatique :

- La première partie de l'entretien consiste en une description de l'exploitation, de son histoire, des pratiques de l'éleveur et de ses préoccupations quant à son activité. L'objectif de cette première partie est multiple. Il s'agit de mettre à l'aise l'enquêté et instaurer la confiance en abordant un sujet familier mais non personnel et que l'enquêté maîtrise. Il s'agit également de recueillir des informations sur la structure de l'exploitation et sur les pratiques de l'éleveur. Ces informations serviront de support de discussion lors de la suite de l'entretien, lorsqu'il faudra préciser les modifications mises en place sur l'exploitation pour faire face à une évolution de contexte ou plus précisément au changement climatique. De plus, ces informations pourront servir dans les analyses des entretiens. Enfin, il s'agit de comprendre les objectifs et les motivations de l'éleveur dans son activité et sa façon de raisonner à la fois sur le long terme et sur le court terme. A l'issue de cette première partie, il est possible d'avoir une première idée des préoccupations majeures de l'exploitant et de savoir si le changement climatique en fait partie.

- La seconde partie de l'entretien concerne les évolutions du cadre de vie de l'éleveur: évolutions du contexte social, économique ou naturel et leurs liens avec des évolutions de l'exploitation. Il s'agit d'évolutions que l'éleveur observe ou a observé autour de lui ou dans son environnement propre (personnel ou de travail). Il s'agit également de modifications de pratiques mises en place par l'éleveur sur son exploitation en réaction ou en anticipation à une évolution de contexte. Cette partie permet d'identifier les modifications de contexte qui marquent le plus l'éleveur et de noter si les évolutions du climat en font partie.

- La troisième partie aborde explicitement le changement climatique avec l'objectif de recueillir la représentation de ce qu'est le changement climatique pour l'éleveur : « Qu'est-ce qui vous vient à l'esprit si je vous dis « changement climatique » ? ». Il s'agit de savoir si l'éleveur est convaincu par le changement climatique (« Vous diriez que le changement climatique est réel…» ou alors « n'est pas réel… »), et d'identifier quels sont les indicateurs d'évolution du climat auxquels l'éleveur fait référence. Par ailleurs, nous questionnons l'éleveur sur l'origine de ses connaissances sur le changement climatique et sur ses sentiments par rapport aux évolutions du climat. En guise de conclusion, nous demandons à l'éleveur des propositions d'adaptation des élevages au changement climatique (même s'il n'y a pas pensé avant l'entretien) et plus spécifiquement des adaptations possible sur son exploitation et quelles seraient les conditions (politiques, économiques, sociales, scientifiques) pour que ces adaptations soient mises en pratique. Enfin, nous achevons l'entretien par une présentation des courbes d'évolutions du climat passé et à venir spécifiques à la zone (Annexe 2). Ces courbes représentent les valeurs moyennes annuelles des températures moyenne journalières, du bilan hydrique climatique et des précipitations, de 1980 à 2011 (données Météo France) et de 2035 à 2065 et de 2070 à 2100 (projections climatiques

ARPEGE selon le scénario AIB du GIEC). Nous présentions également des indicateurs de date de début de saison herbagère et de quantité d'herbe disponible à chaque saison, calculés à partir de ces données climatiques (les indicateurs sont présentés en détails dans le Chapitre 3).

Cette structure d'entretien permet à l'éleveur de parler du changement climatique dès le début de l'entretien ou, s'il ne l'évoque pas, permet à l'enquêteur de centrer explicitement la discussion sur la question du changement climatique en fin d'entretien. Le thème du changement climatique n'est abordé par l'enquêteur qu'après avoir traité de l'ensemble des évolutions de contexte perçues par l'éleveur. Si l'éleveur introduit lui-même le thème du climat, l'entretien se poursuit de la même manière que si un autre thème avait été abordé (économie, social, institution, environnement). En moyenne, l'entretien dure deux heures.

2.3. Recueil et analyse des données

Au cours de l'entretien, une prise de note directe sur ordinateur permet de retranscrire les éléments principaux du discours de l'éleveur. Les entretiens sont enregistrés et un compte rendu d'entretien est réalisé au plus tard dans les deux jours suivants. Ce compte rendu reprend en détail les réponses de l'éleveur. Il est rédigé à l'aide des notes prises et de l'écoute de passages choisis des enregistrements.

Chaque entretien est analysé selon une grille préétablie. Pour les questions concernant les préoccupations, les évolutions de contexte et les observations d'évolution du climat, la réponse de l'éleveur est classée selon une caractéristique (ex : *indécis*) ou un thème prédéfini (ex : valorisation des produits, faune et flore). Lorsqu'un entretien fait émerger un nouveau thème, alors ce nouveau thème est intégré à la grille d'analyse.

2.4. Choix des personnes interrogées et prise de contact

Nous avons mené notre étude sur deux zones pédoclimatiques en Aveyron (Montagne et Vallée) et nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux élevages de bovins laitiers et de bovins allaitants. Dans chaque zone et pour chaque système de production nous avons enquêté 4 éleveurs soit un total de seize éleveurs (4 éleveurs x 2 systèmes de productions x 2 zones). La liste et les caractéristiques des éleveurs enquêtés sont détaillées en Annexe 3.

Les entretiens auprès des éleveurs constituaient une étape de notre démarche globale d'analyse des capacités d'adaptation des élevages au changement climatique. Ils étaient suivis par des ateliers participatifs de conception d'élevages adaptés au changement climatique. Le choix des éleveurs pour les entretiens a ainsi été dirigé de façon à identifier et mobiliser des éleveurs susceptibles de s'impliquer dans les ateliers ultérieurs. Ainsi, les éleveurs ont été préalablement ciblés par la Chambre d'Agriculture comme susceptibles d'être intéressés pour mener une réflexion sur l'adaptation des élevages au changement climatique. Les éleveurs interrogés sont donc a priori des éleveurs dynamiques et se posant des questions sur la durabilité de leur exploitation.

Pour ne pas biaiser l'étude, les éleveurs ont été contactés par téléphone sans que soit mentionné le thème du changement climatique. Nous présentions l'étude comme ayant l'objectif de comprendre les évolutions passées des élevages en Aveyron et les attentes des éleveurs en terme de conseil agricole, dans l'optique de construire une méthode pour aider les élevages à s'adapter aux changements de contexte.

3. Résultats

Nous présentons ici les résultats de l'analyse des seize entretiens réalisés auprès d'éleveurs en zone de Vallée et de Montagne en Aveyron. Pour une meilleure vue d'ensemble, nous avons regroupé les résultats par thèmes au lieu de présenter les résultats selon la chronologie de l'entretien.

3.1. Le changement climatique vu par les éleveurs

3.1.1. Crédit accordé au changement climatique

Tous les éleveurs enquêtés observent des évolutions du climat et comprennent le terme de « changement climatique » par « modification du climat en partie causée par la pollution anthropique ». Les éleveurs comprennent donc le terme *changement climatique* selon la définition de la Convention-cadre sur le changement climatique pour laquelle il désigne une évolution du climat dans le temps attribuée directement ou indirectement aux activités humaines et s'ajoutant à la variabilité climatique naturelle[*]. De même, tous les éleveurs rattachent le changement climatique à l'augmentation des températures. Les connaissances des éleveurs enquêtés sur le changement climatique proviennent des médias, principalement de la télévision.

Connaissant cette définition du changement climatique par les éleveurs, nous avons choisi de poursuivre l'analyse en distinguant trois notions se rapportant au climat :

- **la contrainte climatique** : conditions climatiques qui restreignent les éleveurs dans leurs choix de stratégie et de conduite d'exploitation.
- **l'évolution du climat** : modification des conditions climatiques dont l'origine n'est pas identifiée, se rapportant ou non au changement climatique.
- **le changement climatique** : modification des conditions climatiques en partie causée par les activités humaines.

Les éleveurs ont des avis contrastés concernant l'existence du changement climatique. Trois groupes se distinguent : les *convaincus*, les *indécis* et les *négateurs*. Les *convaincus,* qui affirment que le changement climatique est réel, représentent plus de la moitié des éleveurs interrogés (9 éleveurs). Ils argumentent leurs propos par les résultats de la communauté scientifiques et par leurs propres observations. Les *indécis* estiment ne pas avoir assez de recul pour pouvoir associer leurs observations d'évolution du climat au changement climatique (3 éleveurs). Pour ces derniers le changement climatique est un concept qui n'est pas encore vérifié par l'observation. Les *négateurs* affirment que le changement climatique n'est pas réel (4 éleveurs). Ils observent des évolutions du climat qu'ils attribuent à la variabilité naturelle du climat, inscrite dans un cycle. Les *négateurs* et les *indécis* partagent deux points de leur argumentaire. D'une part, ils ne portent pas crédit aux résultats scientifiques concernant le changement climatique et évoquent la controverse scientifique sur le changement climatique pour justifier leur position. D'autre part, ils font référence à des évènements climatiques extrêmes du passé (notamment sécheresses) pour affirmer que les évènements climatiques extrêmes d'aujourd'hui ne sont pas nécessairement une manifestation du changement

[*] La définition de *changement climatique* par la Convention-cadre sur le changement climatique diffère de celle du GIEC. Le GIEC utilise *changement climatique* pour toute évolution du climat dans le temps, qu'elle soit due à la variabilité naturelle ou aux activités humaines.

climatique. Que ce soit chez les *convaincus* ou les *négateurs*, certains éleveurs utilisent des formules de modestie du type « Je ne suis pas scientifique mais… » pour nuancer leurs affirmations.

D'après les caractéristiques des éleveurs de chaque catégorie (Annexe 3), il semble ressortir que ni l'âge, ni le type de production, ni la zone n'influent sur le type d'éleveur (*négateur*, *conscient* ou *indécis*).

3.1.2. Représentations du changement climatique

Nous allons détailler ici les indicateurs d'évolution du climat donnés par les éleveurs en réponse à la question « A quoi pensez-vous si je vous dis c*hangement climatique* ? ». Il s'agit de comprendre la représentation que les éleveurs ont du changement climatique au travers de ces indicateurs d'évolution du climat.

A l'évocation du terme *changement climatique*, chaque type d'éleveur (*convaincus*, *indécis*, *négateurs*) a cité des évolutions du climat qui seraient liées au changement climatique. Les éleveurs ont le plus souvent évoqué les évolutions supposées, rapportées ou observées du climat et des pratiques en lien avec le climat. Ces évolutions peuvent être regroupées en six thèmes : *disponibilité en eau à l'échelle locale, variabilité climatique, températures, saisons, neige* et *vents* (Tableau 2). Il s'agit soit du discours des médias ou de l'entourage qui est répété (tous types d'éleveur), soit d'observations d'un proche ou personnelles (*indécis* et *convaincus*). Peu de réponses ont porté sur les causes du changement climatique.

Tableau 2 : Indicateurs cités en réaction à « changement climatique », rang et nombre d'éleveurs y faisant référence.

Représentation du changement climatique	1	<=2	<=3	<=4	Total
Eau (précipitations, sécheresse, cours d'eau)	8	12	12	13	13
Variabilité (précipitations ou températures)	2	8	11	12	12
Températures	3	4	9	10	10
Saisons	2	4	5	5	5
Neige	1	4	4	4	4
Vent	0	0	1	2	2

Le thème dominant est celui de la *disponibilité en eau à l'échelle locale* (13 éleveurs sur 16 en parlent, dont 8 en premier). Les éleveurs se représentent le changement climatique au travers d'une diminution des précipitations, d'une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses et du tarissement des sources (les deux zones).

Le thème *variabilité climatique* arrive en seconde position (12 éleveurs en parlent, dont 2 en premier). Il recoupe à la fois le thème *températures* et des éléments relatifs aux précipitations. D'une part, les éleveurs ont l'impression que la variabilité intra-annuelle des températures et des précipitations augmente. Les éleveurs constatent une augmentation de la variabilité des températures d'un jour à l'autre (écarts brutaux de températures). Ils remarquent également une plus forte concentration des précipitations, à la fois par l'augmentation de la fréquence des orages (forte intensité de précipitations) et par l'augmentation de la durée des périodes de pluies (plusieurs semaines de précipitations). D'autre part, les éleveurs ont l'impression d'une plus grande variabilité interannuelle du climat, qu'ils évaluent par la variabilité accrue des rendements fourragers ou des dates de mise à l'herbe sur leur exploitation. Cette augmentation de la variabilité climatique intra-annuelle et interannuelle entraine ainsi chez eux une perte de repère par rapport aux saisons

qu'ils estiment « moins marquées» : il n'est plus possible de définir les conditions météorologiques d'une journée type pour chaque saison.

Le thème *températures* est en troisième position (10 éleveurs sur 16 en parlent dont 3 en premier). Le terme *réchauffement climatique* est fréquemment cité (9 éleveurs), parfois associé à la montée des océans et à la fonte des glaciers. Concernant l'échelle locale, les éleveurs ont l'impression que les températures extrêmes s'accentuent (une augmentation de l'amplitude thermique annuelle et également journalière). L'hiver est perçu par un éleveur comme plus froid alors qu'il est considéré comme plus chaud par un second.

Le thème des *saisons* est en quatrième position (5 éleveurs dont 2 en premier). Certains estiment que le climat ne suit plus le rythme des saisons (cf. thème *variabilité climatique*), et d'autres parlent d'un décalage des saisons (notamment concernant le printemps considéré plus précoce ou plus tardif, observé à partir des dates de mise à l'herbe).

Le thème *neige* est en cinquième position (4 éleveurs). Du fait d'une augmentation des températures et/ou d'une diminution des précipitations, 3 éleveurs de Montagne et 1 en Vallée citent une diminution des précipitations neigeuses (durée de couverture neigeuse et hauteur de neige).

Le thème *vents* est en sixième position (2 éleveurs, jamais cité en premier). Les deux éleveurs constatent une modification de l'intensité, de la direction et de la durée des vents.

3.2. Les observations de l'évolution du climat

Les résultats des entretiens montrent que l'ensemble des enquêtés observent des évolutions du climat à l'échelle locale ou des évolutions de leurs pratiques les plus dépendantes du climat. Ces observations des évolutions du climat sont évoquées à toutes les étapes de l'entretien, de la présentation de l'exploitation à la conclusion de l'entretien. Plus de la moitié des éleveurs, soit 9 sur 16, parlent d'une évolution du climat dès la présentation de leur exploitation alors que thème du changement climatique n'a pas été évoqué lors de la prise de rendez-vous (Figure 4). Néanmoins, les évolutions du climat ont le plus souvent été citées lorsque la question a été posée (44 évolutions citées en réponse à la question « Quelles évolutions dans votre environnement ou votre activité pourriez-vous attribuer au changement climatique» sur les 89 évolutions citées sur l'ensemble des entretiens) (Figure 4).

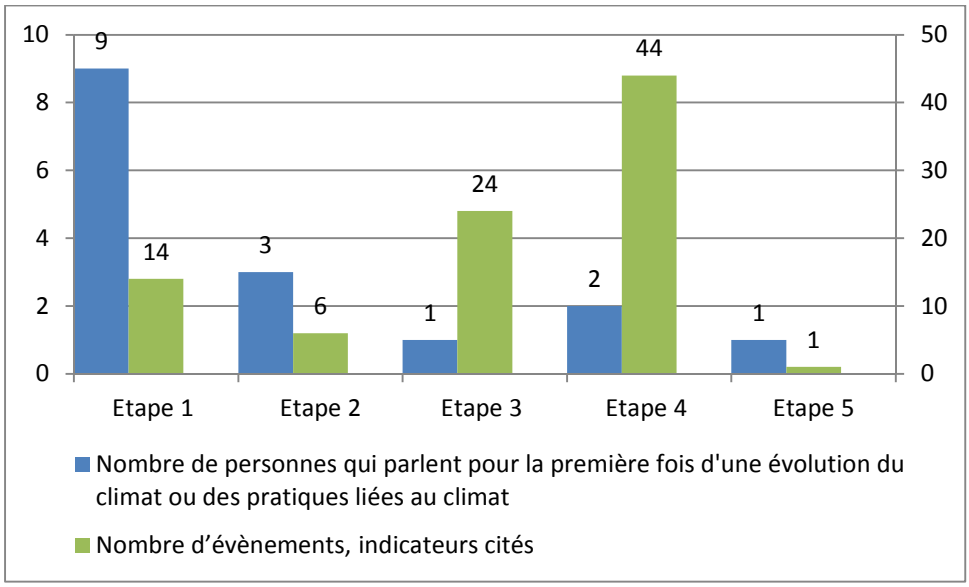


Figure 4 : Nombre de personnes qui parlent pour la première fois d'une évolution du climat (ou des pratiques) et nombre d'observations d'évolutions du climat citées à chaque étape de l'entretien.
Etape 1 = Présentation de l'exploitation ; Etape 2= Changements de contexte ; Etape 3 = Changement climatique ; Etape 4= Observations en lien avec le changement climatique ; Etape 5 = Réaction aux courbes d'évolution du climat

Nous détaillons ici l'ensemble des évolutions du climat, de la faune et de la flore et des pratiques sur l'exploitation qui ont été citées par les éleveurs au cours des entretiens et que nous considérons en lien avec le changement climatique.

3.2.1. Evolutions des conditions climatiques

Les modifications du climat représentent une large majorité des évolutions citées que nous pourrions mettre en lien avec le changement climatique (Tableau 3). Au total, les éleveurs ont parlé 61 fois d'observations d'évolution du climat pour 89 observations citées (en comptant les répétitions lorsque qu'un même évènement est cité par plusieurs éleveurs). Sur l'ensemble des entretiens, les modifications du climat citées font références aux mêmes thèmes que ceux citées à l'évocation du terme *changement climatique*. En revanche, chaque entretien pris individuellement, les évolutions citées en réaction à *changement climatique* et les évolutions citées comme observations n'appartiennent pas nécessairement au même thème. Les thèmes sont présentés par nombre d'observations citées décroissant :

- *Disponibilité en eau et répartition annuelle des précipitations*

Globalement, il y aurait une diminution de la disponibilité en eau (tarissement des sources, diminution du débit des cours d'eau, terrains qui ne sont plus inondés en hiver). L'augmentation de la fréquence, de la sévérité et de la durée des sécheresses est l'observation la plus citée. Les éleveurs ont également observé une évolution de la distribution des pluies sur l'année marquée par leur concentration sur des périodes limitées : augmentation des orages et aussi augmentation du nombre de jours de pluie consécutifs et du nombre de jours sans pluie consécutifs.

- *Températures*

Les éleveurs parlent d'une augmentation des températures extrêmes, notamment durant les jours les plus chauds d'été. La rigueur des journées les plus froides d'hiver semble également s'être

accentuée. Cependant selon les personnes interrogées, l'hiver est ressenti comme étant globalement moins ou plus froid qu'auparavant.

- *Variabilité des précipitations et des températures*

Cet item recoupe l'item *disponibilité en eau et répartition annuelle des précipitations* et l'item *températures*. Il correspond aux observations en rapport avec une modification des phénomènes extrêmes. Les éleveurs observent une augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes extrêmes comme les orages, les sécheresses, les longues périodes de pluie, les vagues de froid et les vagues de chaleur.

- *Saisons*

Quatre observations de modifications des saisons ont été citées. Il s'agit du raccourcissement de l'hiver, d'un printemps plus tardif et d'une augmentation de la variabilité intra-annuelle du climat impliquant une perte de l'identité des saisons. En d'autres termes, les saisons sont moins marquées et il n'est plus possible de définir une journée climatique type par saison.

- *Fonte des glaciers*

Sur huit éleveurs ayant cité cette observation, un seul éleveur a réellement observé la fonte des glaciers (en randonnée). Les autres citent cette observation comme une manifestation voire un symbole emblématique du changement climatique relayé par les médias.

- *Autres : diminution de la neige et modification des régimes de vents*

La diminution de la neige est citée par 3 éleveurs de Montagne et la modification des régimes de vents est citée par 2 éleveurs de Montagne et 1 éleveur de Vallée. Les précipitations neigeuses semblent avoir diminuées en fréquence et en intensité (nombre d'hivers avec neige et épaisseur de la couverture neigeuse). La direction et les périodes des vents semblent avoir été modifiées.

Tableau 3 : Nombre d'observations citées par indicateur d'évolution du climat. Nombre total d'observations citées = 89.

Indicateur d'évolution du climat	Nombre d'observations citées	Rang
Eau (précipitations, sécheresse, cours d'eau)	18	1
Températures	16	2
Changement de pratiques	12	3
Variabilité (précipitations ou températures)	10	4
Flore sauvage	8	5
Saisons	4	6
Faune sauvage	3	7
Fonte glaciers	8	8
Neige	3	9
Vent	3	10
Invasions biologiques/Maladies/Parasites	2	11
Cultures agricoles (rendement, nouvelles cultures)	2	12

3.2.2. Evolutions de la faune et de la flore

Les évolutions de la faune et la flore sauvages ont été cités 14 fois par les éleveurs (Tableau 3). La mort des arbres est l'observation la plus citée, et est mise en relation avec l'accentuation du manque d'eau. Les éleveurs parlent également d'une diminution du nombre d'espèces dans les prairies permanentes, l'apparition de nouvelles espèces, certaines invasives comme l'ambroisie. Un éleveur témoigne d'une seconde floraison en automne pour une espèce fleurissant habituellement en seule

fois au printemps. Des éleveurs parlent d'une diminution de la population d'oiseaux, d'un départ plus précoce des hirondelles en migration et d'une augmentation du nombre de moustiques. En outre, les éleveurs constatent une augmentation des infestations de rats taupiers, ravageurs des prairies.

3.2.3. Evolutions des pratiques et des performances agricoles

Les changements de pratiques, de cultures et de performances agricoles sont cités 14 fois par les éleveurs (Tableau 3). Le thème *changements de pratiques* constitue le troisième thème le plus abordé en regroupant 12 observations qui pourraient être en lien avec une évolution du climat. D'une part, le calendrier des travaux agricoles semble avoir été décalé avec des dates de fauches, de récoltes et d'arrêt de pâturage plus précoces. D'autre part, la quantité d'herbe disponible au printemps semble avoir diminué, de même que celle d'automne. Les éleveurs évoquent aussi des modifications de pratiques comme des diminutions de chargement sur l'année (diminution du nombre d'animaux) ou sur une saison (utilisation de plus de surfaces pour le pâturage, mise à l'herbe plus tardive). Par ailleurs, plusieurs éleveurs ont dû ressemer leurs prairies permanentes dont la productivité diminuait et dont la diversité de flore se réduisait. De façon plus générale, les éleveurs ont remarqué qu'ils devaient être plus réactifs dans la réalisation de leurs tâches pour ne pas manquer une fenêtre climatique ou perdre en qualité de fourrage.

3.3. La place du changement climatique dans le contexte général de l'exploitation agricole

3.3.1. Le changement climatique dans le discours des éleveurs

La question du climat a été abordée en entretien par les éleveurs à travers trois aspects différents : la contrainte climatique, l'évolution du climat et le changement climatique.

A l'inverse de la contrainte climatique et de l'évolution du climat, le changement climatique ne vient pas naturellement à l'esprit des éleveurs. En effet, seulement deux éleveurs parlent du changement climatique avant que nous ayons abordé ce sujet alors que la contrainte climatique et l'évolution du climat sont spontanément abordées par plus de la moitié des éleveurs (Figure 5).

Il ressort des discours des éleveurs qu'ils se sentent très dépendants du climat, sans pour autant y voir une menace. Sauf pour un éleveur, la contrainte climatique n'est pas citée comme préoccupation ; il s'agirait plutôt pour eux d'un élément constitutif de leur métier. Elle est en revanche évoquée pour expliquer un potentiel fourrager, un niveau de chargement et des dates de vêlages. De même, la contrainte climatique est une raison pour laquelle le début de printemps est présenté comme l'une des périodes que les éleveurs appréhendent le plus (avec la période de vêlage lorsque les vêlages sont groupés). En effet, le climat constitue une contrainte forte en début de printemps étant donné son imprévisibilité et ses conséquences sur la portance du sol, la qualité de l'herbe et le chargement potentiel.

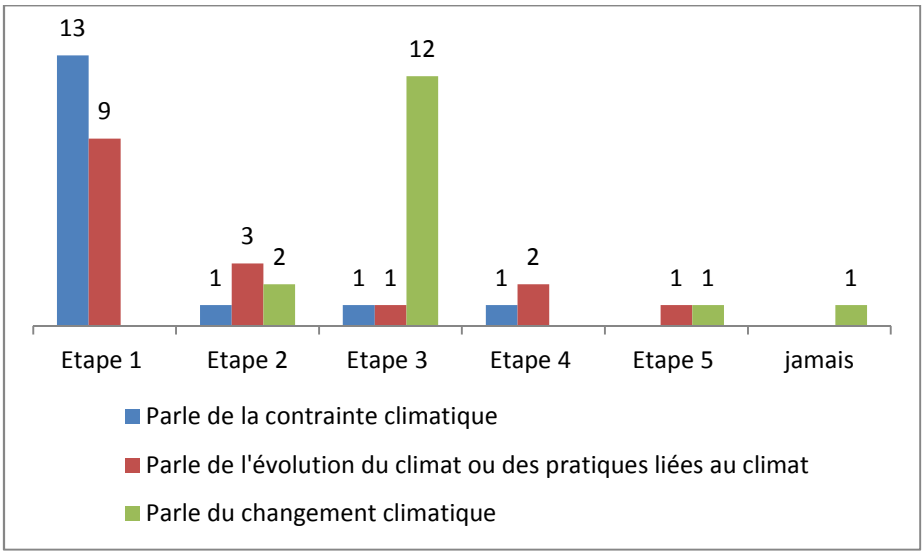


Figure 5 : Moment auquel la contrainte climatique, l'évolution du climat (ou des pratiques en lien avec le climat) et le changement climatique sont évoquées pour la première fois.
Etape 1 = Présentation de l'exploitation ; Etape 2= Changements de contexte ; Etape 3 = Changement climatique ; Etape 4= Observations en lien avec le changement climatique ; Etape 5 = Réaction aux courbes d'évolution du climat

3.3.2. L'évolution du climat et les modifications de contexte ressenties par les éleveurs

L'évolution du climat est citée spontanément comme une modification de contexte par 9 éleveurs sur 16 dont 3 fois en premier (Tableau 4). Elle est citée soit par l'intermédiaire du changement climatique (5 fois dont 2 fois en premier), de l'augmentation des sécheresses (4 fois) ou de l'augmentation de la variabilité climatique (3 fois).

L'évolution la plus fréquemment citée concerne les modifications des lois agricoles au travers de la mise en place de la PAC et plus particulièrement des droits à paiement unique (cité principalement chez les éleveurs de bovins allaitants ou en zone de montagne) et la mise en place des quotas (cité principalement chez les éleveurs de bovins laitiers). L'évolution du contexte économique est citée par 7 éleveurs dont 3 fois comme première évolution. Elle est citée au travers de l'évolution du contexte économique en général (4 fois), de l'augmentation des charges (2 fois), de la diminution du prix de vente des produits de l'exploitation (3 fois) et de l'augmentation des prix du foncier (3 fois). D'autres modifications de contexte sont perçues par les éleveurs : l'évolution du paysage agricole, marqué par la diminution de l'élevage au profit des grandes cultures et l'agrandissement des exploitations, le changement du métier d'agriculteur, avec l'augmentation de la charge de travail, la perte de solidarité entre éleveurs, les améliorations techniques et l'évolution génétique des animaux, l'augmentation des risques et des normes sanitaires. Enfin arrivent l'évolution de la société (style de vie plus centré sur les loisirs, augmentation des exigences envers l'agriculture, prise en compte du bien-être animal, respect de l'environnement, dégradation de l'image de l'agriculture) et celle du territoire, marqué par la déprise des campagnes.

Au cours des entretiens, chaque éleveur a parlé uniquement des modifications de contexte qu'il considérait à l'œuvre et, le plus souvent, qu'il redoutait. Les éleveurs ayant cité le changement climatique sont majoritairement inquiets par rapport à cette évolution. En revanche, l'augmentation des sécheresses n'est pas considérée comme une menace ; les éleveurs pensent soit que cette évolution n'est pas problématique, soit qu'il est possible de s'adapter par la mise en place de

l'irrigation. Par ailleurs, l'augmentation de la variabilité climatique est un problème pour deux éleveurs alors qu'elle ne l'est pas pour un autre.

Tableau 4 : Evolutions de contexte citées, nombre d'éleveurs y faisant référence et sentiment associé.

Evolution de contexte	nombre de fois cité		Inquiet et/ou désemparé	Confiant	besoin de conseils	Indifférent	Pas de réponse
	Au total	en 1er choix					
Politique et administratif: PAC + lois	8	2	6				1
Structure du paysage agricole	6	2	4				1
Agrandissement des EA	5	2	2				2
Climat : modification du climat	5	2	3				2
Contexte économique	4	2	4				
Augmentation de la charge de travail	4	1	3			1	
Climat : sécheresse	4	1	1	2			1
Dépopulation - Déprise agricole	4		3	1			
Perte de solidarité - Isolement	4		1	1			2
Conduite de l'exploitation (technique)	3	2		2		1	
Amélioration génétique des animaux	3	2	1	1	1		
Problèmes sanitaires	3	1	1		1		1
Prix-disponibilité du foncier	3	1	2				1
Climat : variabilité climatique	3		2	1			
Prix de vente des produits	3		2				1
Charges	2		2				
Faune sauvage	2					2	
Entretien du paysage	2		1				1
Style de vie: Recherche d'un équilibre vie privée-ferme	2			1			1
Dégradation de l'image de l'agriculture - des agriculteurs par la société	2		1				1
Modification du métier d'agriculteur	2		1				1
Diminution de la pénibilité du travail	1	1				1	
Flore sauvage	1						1
Prise en compte bien être animal	1						1

3.3.3. Le changement climatique et les préoccupations des éleveurs

Après avoir présenté leur exploitation, les éleveurs ont répondu à la question « Actuellement, quelles sont vos préoccupations par rapport à votre activité ? ». Les préoccupations des éleveurs enquêtés se déclinent selon 21 thèmes, cités au maximum par 7 éleveurs (Tableau 5).

Le changement climatique n'a jamais été cité comme préoccupation. Néanmoins, la modification du climat a été cité une fois comme préoccupation mais sans qu'il s'agisse du changement climatique (personne qui par la suite a déclaré que le changement climatique n'était pas avéré et qu'il s'agissait d'un cycle d'évolution du climat). Les préoccupations principales des éleveurs enquêtés sont d'ordre économique, soit de façon générale (contexte économique) soit concernant un problème particulier (prix de vente des produits, charge de travail, prix et disponibilité du foncier, charges de l'exploitation, emprunts). En effet, six préoccupations citées (sur 21) sont d'ordre économique dont trois ayant été citées le plus de fois parmi les trois premières préoccupations. Parmi les préoccupations citées par au moins trois éleveurs, on compte également l'avenir de l'exploitation (citée 6 fois dont 3 parmi les trois premières préoccupations), la maîtrise technique de l'exploitation (5 fois dont 5 fois parmi les trois premières préoccupations), les sécheresses (4 fois dont 3 parmi les trois premières préoccupations), la variabilité climatique/l'aléa climatique (4 fois dont 3 dans parmi les trois premières préoccupations), l'évolutions des lois, et plus particulièrement la PAC (4 fois dont 3 parmi les trois premières préoccupations - élevages allaitants en Montagne), la dépopulation des campagnes (3 fois et 3 fois parmi les trois premières préoccupations, 2 en zone de montagne, 1 en Vallée « encaissée »).

Tableau 5 : Préoccupations citées et nombre d'éleveurs y faisant référence.

Préoccupation	Nb de fois cité	
	Au total	dans les 3 premiers choix
Prix de vente des produits	7	6
Contexte économique	7	4
Charge de travail	6	5
Avenir de l'exploitation (reprise, endettement)	6	3
Conduite de l'exploitation (technique)	5	5
Prix-disponibilité du foncier	4	4
Charges	4	3
Climat : sécheresse	4	3
Climat : variabilité climatique	4	3
Politique et administratif: PAC + lois	4	3
Dépopulation - Déprise agricole	3	3
Problèmes sanitaires	3	1
Agrandissement des exploitations	2	1
Emprunts	2	1
Structure du paysage agricole	2	1
Entretien du paysage	2	0
Autonomie	1	1
Qualité des produits	1	1
Social: travail de plus en plus individuel	1	1
Climat : modification du climat	1	0
Image de l'agriculture	1	0

3.3.4. Pertinence et opportunités de s'adapter au changement climatique

Le changement climatique : quel risque perçu ?

Face au changement climatique, le sentiment majoritaire des éleveurs qui ne le nient pas (les *conscients* et les *indécis)* est la crainte, soit pour le monde en général soit pour l'exploitation en particulier (Tableau 6). Ces éleveurs se sentent démunis face au changement climatique, soit car ils ne savent pas comment réagir soit car ils estiment ne pas pouvoir être acteurs de l'adaptation ou de la lutte contre le réchauffement climatique. Cependant un éleveur perçoit dans le changement climatique une opportunité pour faire évoluer les systèmes agricoles vers des systèmes plus autonomes et un autre éleveur, même s'il estime que le changement climatique est une menace, est confiant en la capacité des éleveurs à y faire face.

Tableau 6 : Sentiments associés aux évolutions du climat perçues et nombre d'éleveurs.

	Négateur (4)	Indécis (3)	Conscient (9)
C'est une opportunité	-	-	1
Confiant	3	1	1
C'est une menace		3	22
non précisé	-	-	*5*
pour le monde	-	*1*	*7*
pour l'exploitation	-	*1*	*8*
Défaitiste	-	*1*	*2*
Pas de réponse	1	-	-

Quelles adaptations face au changement climatique ?

Les adaptations envisagées face au changement climatique sont majoritairement des adaptations stratégiques. Elles visent à affronter une diminution de la disponibilité de la ressource fourragère et une augmentation de sa variabilité (Tableau 7). Environ 9 adaptations sur 10 imaginées concernent une modification de la structure, du dimensionnement, et de la gestion sur le long terme de l'exploitation. En effet, 60 propositions ont pour objectif de faire face à l'évolution en tendance du climat alors que 7 propositions visent à faire face au manque conjoncturel de fourrage en cas d'aléa. La mise en place de nouvelles pratiques constitue 26 % des adaptations stratégiques proposées. Par ailleurs, l'accentuation de pratiques existantes sur l'exploitation comptabilise 35 % des adaptations stratégiques proposées et la mise en place de pratiques existantes ou ayant existé sur le territoire 38 %.

Tableau 7 : Adaptations proposées par les éleveurs pour faire face au changement climatique moyen et pour faire face à l'aléa climatique, et nombre de fois où l'adaptation est évoquée.

Face au changement moyen		Face à l'aléa	
Mobilisation de ressources extérieures	***5***		***3***
	achat aliments 2	achat aliments	1
		utiliser des estives (laitiers)	1
		pâturer les sous-bois et les bords de route	1
	utiliser les feuilles arbres 3		
Valorisation des produits	***5***		
	par un sigle de qualité 2		
	par une appellation d'origine 1		
	par l'agriculture biologique 1		
	par la vente directe 1		
Animaux : jouer sur les besoins	***16***		***2***
	Changer d'espèce ou de race 5		
	Amélioration génétique des animaux 1		
Diminuer chargement			
		Vente conjoncturelle d'animaux	2
	Diminuer le nombre d'animaux 2		
	Augmenter les surfaces 4		
	Diminuer le niveau de production par vache 2		
Gérer les périodes de besoin			
	Modifier les dates de vêlages (regrouper/décaler) 2		
Surfaces : jouer sur les ressources	***23***		***2***
Utilisation des sols			
	Augmentation de la proportion de luzerne 3		
	Augmenter la proportion de céréales 1		
	Augmenter la proportion de prairies permanentes 3		
	Augmenter la proportion de prairies temporaires 1		
	Mise en place de sorgho (éventuellement en remplacement du maïs) 2		
		Mise en place de dérobées	2
	Mise en place de céréales immatures 1		
	Amélioration des variétés, création de nouvelles espèces 3		
	Supprimer le maïs pour irriguer la luzerne 1		
	Passer en système tout herbe avec uniquement des prairies permanentes 1		
Gestion des prairies			
	éviter le piétinement des prairies pour conserver une prairie productive sur le long terme 1		
	mieux profiter de l'herbe pour pâturer 2		
	Pâturer plus tôt 1		
	Mieux récolter pour faire une seconde fauche (profiter de la précocité de l'herbe au printemps) 1		
	Plus récolter au printemps 1		
Itinéraire technique des cultures annuelles			
	Intensifier la culture de maïs (irrigation, fertilisation) 1		
Sécurisation	***8***		
	augmenter la capacité de stockage 1		
	irrigation 5		
	lac collinaire 2		

Les adaptations stratégiques au changement climatique que les éleveurs ont proposées portent plus sur la ressource fourragère (augmenter, modifier, sécuriser) que sur les besoins animaux (diminuer, modifier) (resp. 65 % et 27 % des propositions, Tableau 7). D'une part, pour augmenter et sécuriser la ressource fourragère, les éleveurs proposent d'augmenter les surfaces de l'exploitation, de modifier l'assolement, de modifier la gestion des prairies (pâturage et fauches), d'irriguer et fertiliser d'avantage, et de valoriser des fourrages extérieurs au système (estives pour les systèmes laitiers de montagne, feuilles des arbres). Concernant l'assolement, les éleveurs proposent de diminuer le maïs au profit de la luzerne, d'implanter du sorgho et d'augmenter la proportion soit des prairies temporaires (pour augmenter leur réactivité d'une année à l'autre) soit des prairies permanentes (perçues comme plus résistantes aux évènements climatiques extrêmes). Concernant la gestion des prairies, il s'agirait de profiter de la précocité de l'herbe au printemps (faire une fauche assez précoce pour être en mesure de faire une seconde fauche), d'allonger la durée de pâturage par une mise à l'herbe plus précoce, d'être plus vigilant au chargement au pâturage dans l'objectif de protéger la prairie du piétinement. En outre, les éleveurs comptent sur une sélection et une amélioration variétale des cultures annuelles et des espèces prairiales qui tiennent compte du changement climatique. D'autre part, pour diminuer ou organiser les besoins, les éleveurs proposent de diminuer l'effectif du troupeau, diminuer le niveau de production par vache, changer pour des races ou espèces qui ont des besoins alimentaires plus faibles, privilégier les races locales a priori mieux adaptées au climat et aux ressources fourragères du territoire et regrouper ou décaler les vêlages. De la même manière que pour la sélection variétale végétale, les éleveurs misent sur la sélection animale qui permettrait d'obtenir des animaux mieux adaptés au territoire et aux évolutions de climat attendues. Par ailleurs, les éleveurs proposent des modifications plus générales, à l'échelle de l'exploitation, qui consistent en la sécurisation du système ou en l'amélioration de la valorisation des produits. La sécurisation passerait par la diminution du chargement, la diminution du niveau de production, la mise en place de l'irrigation et l'augmentation du stock de foin réalisé au printemps. L'augmentation de la valorisation (8 % des propositions) consisterait en la mise en place de signes de qualité et d'appellations d'origines.

Pour faire face à l'aléa, les propositions consistent en des mesures conjoncturelles telles que l'achat de fourrages, la vente d'animaux, l'utilisation de dérobées et le pâturage des sous-bois et des bords de routes.

Comment favoriser l'adaptation au changement climatique ?

Selon les éleveurs, plusieurs conditions favoriseraient l'adaptation des élevages au changement climatique. Elles recoupent quatre catégories :

- ***Réglementation et aides***

Certains éleveurs pensent que l'adaptation au changement climatique est freinée par la réglementation. Certaines des adaptations proposées par les éleveurs sont impossibles à cause de la réglementation. Par exemple, augmenter la proportion des prairies temporaires aux dépens de la prairie permanente est impossible (interdiction de labourer une prairie permanente). Par ailleurs dans certaines zones, la construction d'une réserve d'eau pour l'irrigation est interdite.

Par ailleurs, certains éleveurs pensent que l'Etat peut orienter les exploitations vers des systèmes plus sécurisés, autonomes, et qui génèreraient moins de gaz à effet de serre par l'intermédiaire d'aides (primes aux prairies permanentes).

En outre, l'interdiction de la spéculation sur les marchés alimentaires a été citée comme une façon de faire face au changement climatique.

- ***Appui à l'adaptation***

Certains éleveurs pensent nécessaire un appui tant sur la communication sur le changement climatique et ses effets sur l'exploitation agricole que sur la réflexion et la mise en œuvre d'adaptations à l'échelle de l'exploitation. Il s'agit par exemple de mettre en place des filières de qualité, de développer l'appui technique concernant de nouvelles façons de produire et les adaptations possibles des élevages face au changement climatique. En outre, la mise en place et l'animation d'un réseau de réflexion et d'échange sur les adaptations des élevages au changement climatique pourrait favoriser la mise en œuvre sur le terrain de mesures pour faire face à l'évolution du climat.

- ***Mentalités des agriculteurs et des consommateurs***

D'une part les agriculteurs privilégieraient l'autonomie de l'exploitation à la quantité produite et d'autre part les consommateurs se tourneraient plus vers les produits de qualité au lieu de s'intéresser à la quantité. Ils accepteraient des produits avec des défauts d'apparences et dont les caractéristiques organoleptiques et la disponibilité varient d'une année à l'autre.

- ***Cours agricoles***

L'évolution des cours agricoles est perçue comme pouvant être un moteur de l'adaptation des exploitations au changement climatique. Cependant deux points de vue coexistent : celui où l'augmentation des prix des intrants pousserait les exploitations à être plus autonomes, et celui où la diminution du coût des intrants favoriserait l'achat d'aliments extérieurs et l'augmentation de la fertilisation pour sécuriser le niveau de production face au changement climatique.

4. Discussion et conclusion

Malgré le faible échantillon d'éleveurs enquêtés, nous avons identifié plusieurs profils de discours concernant le changement climatique chez les éleveurs. Notre méthode d'échantillonnage, qui a favorisé la sélection d'éleveurs intéressés par la question du changement climatique, a probablement impliqué une sur-représentation des éleveurs *convaincus* par rapport à l'ensemble des éleveurs. Par ailleurs, il semble ressortir que ni l'âge, ni le type de production, ni la zone n'influent sur le type d'éleveur (*négateur, conscient* ou *indécis*). En revanche, les observations d'évolution du climat, les préoccupations et les évolutions de contexte perçues semblent être liées à la zone. Le travail effectué mériterait d'être étendu à un échantillon plus large et plus représentatif pour tester ces hypothèses. Même si un entretien téléphonique pourrait se substituer à l'entretien en face à face (voir Barnes and Toma, 2011; Marshall et al., 2013; Wheeler et al., 2013 sur la même question de la perception du changement climatique par des agriculteurs), nous pensons que le questionnaire mail ou papier (Barnes and Toma 2011; Blennow and Persson 2009; Patt and Schroter 2008; Thomas, *et al.* 2007) n'est pas adéquat pour répondre à la question posée. En effet, l'entretien permet d'aborder progressivement le thème du changement climatique et laisse l'occasion à l'enquêté de s'exprimer spontanément et librement à ce sujet. En revanche, avec un questionnaire, l'enquêté peut voir l'ensemble des questions avant de le remplir.

La structure de notre entretien a permis de distinguer ce qui était propre au concept de changement climatique et ce qui était de l'ordre de la contrainte climatique ou de l'évolution du

climat dans le discours des éleveurs. La distinction entre contrainte climatique, évolution du climat et changement climatique dans notre analyse nous a permis de faire émerger un obstacle à l'adaptation des éleveurs au changement climatique : même si tous les éleveurs considèrent le climat comme une contrainte et qu'ils observent des évolutions du climat, ils sont près de la moitié à douter de l'existence du changement climatique qu'ils définissent par une évolution du climat en partie due à l'action de l'homme.

Nos résultats rejoignent les conclusions de plusieurs études sur la perception des évolutions du climat et du changement climatique par différents types d'agriculteurs, dans des zones climatiques et contexte socio-politiques très contrastés. Les agriculteurs apparaissent comme des observateurs sensibles et relativement fidèles des évolutions du climat. En effet, ils témoignent d'évolutions du climat que ce soit au travers des variables climatiques primaires (Mertz, *et al.* 2009; Patt and Schroter 2008; Thomas, *et al.* 2007), des évolutions de la faune et flore (Mertz, *et al.* 2009) ou encore des pratiques ou des performances sur l'exploitation (Mertz, *et al.* 2009; Patt and Schroter 2008; Thomas, *et al.* 2007). En outre, leurs observations sont cohérentes avec les évolutions du climat mesurées par les scientifiques sur une zone donnée (Akerlof, *et al.* 2013; Thomas, *et al.* 2007). Cependant, une partie des éleveurs enquêtés, et plus largement des agriculteurs, nie l'existence du changement climatique. En effet, les *négateurs* semblent représenter une part significative des agriculteurs avec en particulier l'idée que l'évolution du climat actuelle est naturelle et inscrite dans un cycle (avec la conviction que le climat redeviendra « normal »). Cette notion d'évolution cyclique a notamment été évoquée par 21 % d'agriculteurs enquêtés en Ontario et 53 % en Australie (Reid, *et al.* 2006; Rogers, *et al.* 2012). Par ailleurs, certaines personnes n'ont pas de position affirmée (*indécis*), estimant ne pas avoir assez de recul et ne portant pas de crédit aux études scientifiques sur le changement climatique. En outre, comme dans d'autres études (Mertz, *et al.* 2009; Reid, *et al.* 2006; Thomas, *et al.* 2007), l'évolution du climat qu'elle soit attribuée ou non au changement climatique n'est pas un sujet de préoccupation pour les éleveurs enquêtés. Même si le changement climatique correspond pour eux à des conséquences négatives, ils sont plutôt préoccupés par la contrainte climatique en tant que variabilité et imprévisibilité du climat ce qui rejoint les observations de Thomas et al. (2007) à propos des agriculteurs d'Afrique du Sud. Les éleveurs que nous avons enquêtés considèrent la contrainte climatique comme faisant partie intégrante de leur activité et estiment que gérer le risque qui en est associé est une compétence qu'ils doivent posséder.

Lorsque les éleveurs que nous avons interrogés parlent du changement climatique, ils évoquent rarement ni les causes du changement climatique ni les opportunités qu'il pourrait offrir. Ils font surtout état d'une diminution de la disponibilité de l'herbe ces dernières années et envisagent une accentuation de ce phénomène. De même, ils perçoivent une augmentation de la variabilité climatique et craignent son accentuation. Cette tendance de diminution de la disponibilité de l'herbe que les éleveurs perçoivent et projettent pour le futur est en contradiction avec les résultats de simulations de disponibilité de l'herbe dans le futur (Ruget, *et al.* 2010). Cette différence peut s'expliquer notamment par le fait que les modèles de simulations tiennent compte de l'amélioration de l'efficacité de la biosynthèse par l'augmentation de la concentration du CO_2 atmosphérique alors que les éleveurs n'ont probablement pas connaissance de ce phénomène associé au changement climatique.

En résumé, même si les éleveurs observent et doivent modifier leurs pratiques face au changement climatique, la vision des éleveurs du changement climatique est proche de la vision commune de la population. Comme l'ensemble de la population, certains éleveurs nient le changement climatique, le mettent en doutent ou en sont convaincus (Leiserowitz, *et al.* 2012; Lorenzoni and Hulme 2009). De même, ils ont tendance à se représenter le changement climatique par les conséquences néfastes qu'il pourrait engendrer mais ne le considèrent pas comme une priorité par rapport à d'autres questions sociales et économiques (Leiserowitz 2006). En outre, ils expliquent leur scepticisme face au changement climatique par la controverse scientifique qu'ils perçoivent à propos du changement climatique (Lorenzoni and Hulme 2009). Etant donnée la proximité des éleveurs et de leur activité au climat, nous aurions imaginé une plus forte conscience du changement climatique chez les éleveurs que pour le reste de la population. Après avoir rencontré les éleveurs qui nous ont parlés plusieurs fois de l'image négative que les médias renvoyaient d'eux et la perception de la population des agriculteurs comme des pollueurs, nous pensons que leur statut de partie prenante du changement climat (i.e. à la fois acteurs du changement climatique et dont les pratiques sont modifiées par le changement climatique) explique pourquoi ils ne sont pas plus convaincus de l'existence du changement climatique. En effet, pour certains éleveurs, accepter l'existence du changement climatique reviendrait à dire qu'ils en soient contributeurs.

D'après nos résultats il apparaît crucial de réviser les modes de communication sur le changement climatique et ses conséquences à l'échelle de l'exploitation d'élevage. Pour les éleveurs, le changement climatique renvoie le plus souvent à des évolutions de climat et des conséquences à l'échelle mondiale (températures, montée des eaux, fonte des glaciers) alors qu'ils en observent les conséquences dans leur quotidien. Dans un souci de toucher une large audience, ces indicateurs de changement climatique à l'échelle globale sont ceux qui sont véhiculés par les médias et par la communauté scientifique. Néanmoins, ils sont abstraits pour les éleveurs car ils n'observent pas ces manifestations du changement climatique à l'échelle locale. Pour augmenter la crédibilité des propos et la prise de conscience du changement climatique à l'échelle locale, la communication sur le changement climatique et les recherches sur le changement climatique ont intérêt à mettre en avant les observations et les conséquences possibles du changement climatique à l'échelle d'un territoire et spécifiques à une catégorie de population donnée comme le suggère Leiserowitz (2006). En effet, des informations concrètes ont plus d'influence sur les perceptions que des informations abstraites (Leiserowitz 2006). En revanche, une meilleure communication sur le changement climatique ne permettra pas de faire changer d'avis les *négateurs* : des informations supplémentaires sur le changement climatique ont un impact sur la perception d'un individu à condition que ces informations soient cohérentes avec sa perception existante. Dans le cas contraire, ces information ont tendance à renforcer la résistance de l'individu au changement (Adger, *et al.* 2008; Lorenzoni and Hulme 2009). Ainsi, nous pensons que les mesures d'aide à l'adaptation de l'élevage au changement climatique auront tendance à être plus suivies et plus efficaces si elle sont affichées comme adaptation à la variabilité climatique (si le programme d'adaptation est affiché « changement climatique », les *négateurs* ne vont pas y participer).

5. Références

Adger W.N., Dessai S., Goulden M., Hulme M., Lorenzoni I., Nelson D.R., Naess L.O., Wolf J. and Wreford A. 2008. Are there social limits to adaptation to climate change? *Climatic Change*, **93**(3-4), 335–354, doi:10.1007/s10584-008-9520-z.

Akerlof K., Maibach E.W., Fitzgerald D., Cedeno A.Y. and Neuman A. 2013. Do people "personally experience" global warming, and if so how, and does it matter? *Global Environmental Change*, **23**(1), 81–91, doi:10.1016/j.gloenvcha.2012.07.006.

Arbuckle J.G., Morton L.W. and Hobbs J. 2013a. Farmer beliefs and concerns about climate change and attitudes toward adaptation and mitigation: Evidence from Iowa. *Climatic Change*, **118**(3-4), 551–563, doi:10.1007/s10584-013-0700-0.

Arbuckle J.G., Prokopy L.S., Haigh T., Hobbs J., Knoot T., Knutson C., Loy A., Mase A.S., McGuire J., Morton L.W., Tyndall J. and Widhalm M. 2013b. Climate change beliefs, concerns, and attitudes toward adaptation and mitigation among farmers in the Midwestern United States. *Climatic Change*, **117**, 943–950, doi:10.1007/s10584-013-0707-6.

Barnes A.P. and Toma L. 2011. A typology of dairy farmer perceptions towards climate change. *Climatic Change*, **112**(2), 507–522, doi:10.1007/s10584-011-0226-2.

Blennow K. and Persson J. 2009. Climate change: Motivation for taking measure to adapt. *Global Environmental Change*, **19**(1), 100–104, doi:10.1016/j.gloenvcha.2008.10.003.

Cash D.W., Clark W.C., Alcock F., Dickson N.M., Eckley N., Guston D.H., Jäger J. and Mitchell R.B. 2003. Knowledge systems for sustainable development. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **100**(14), 8086–8091, doi:10.1073/pnas.1231332100.

Charpenteau J.L. and Duru M. 1983. Simulation of some strategies to reduce the effect on climatic variability on farming. The case of Pyrenees Mountains. *Agricultural Systems*, **11**(2), 105–125, doi:http://dx.doi.org/10.1016/0308-521X(83)90025-2.

Cook J., Nuccitelli D., Green S. a, Richardson M., Winkler B., Painting R., Way R., Jacobs P. and Skuce A. 2013. Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature. *Environmental Research Letters*, **8**(2), 024024, doi:10.1088/1748-9326/8/2/024024.

Fayel E. 2012. Enquête sur la perception du changement climatique par les agriculteurs du massif des Pyrénées. Mémoire de fin d'études. INP Toulouse, Ecole d'ingénieurs de Purpan. p. 85.

Houghton J.T., Jenkins G.J. and Ephraums J.J. eds. 1990. Policymakers summary. *In Climate change: the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press: Cambridge, Great Britain, New York, NY, USA and Melbourne, Australia, p. 410.

Howden S.M., Soussana J.-F., Tubiello F.N., Chhetri N., Dunlop M. and Meinke H. 2007. Adapting agriculture to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **104**(50), 19691–19696, doi:10.1073/pnas.0701890104.

Leiserowitz A. 2006. Climate Change Risk Perception and Policy Preferences: The Role of Affect, Imagery, and Values. *Climatic Change*, **77**(1-2), 45–72, doi:10.1007/s10584-006-9059-9.

Leiserowitz A.A., Maibach E.W., Roser-Renouf C., Smith N. and Dawson E. 2012. Climategate , Public Opinion , and the Loss of Trust Working Paper Subject to revision. *American Behavioral Scientist*, , 1–24, doi:10.1177/0002764212458272.

Lorenzoni I. and Hulme M. 2009. Believing is seeing: laypeople's views of future socio-economic and climate change in England and in Italy. *Public Understanding of Science*, **18**(4), 383–400, doi:10.1177/0963662508089540.

Ma W., Liu Z., Wang Z., Wang W., Liang C., Tang Y., He J.-S. and Fang J. 2010. Climate change alters interannual variation of grassland aboveground productivity: evidence from a 22-year measurement series in the Inner Mongolian grassland. *Journal of Plant Research*, **123**(4), 509–517, doi:10.1007/s10265-009-0302-0.

Marshall N. a., Park S., Howden S.M., Dowd A.B. and Jakku E.S. 2013. Climate change awareness is associated with enhanced adaptive capacity. *Agricultural Systems*, **117**, 30–34, doi:10.1016/j.agsy.2013.01.003.

Martin J.-P. 2013. *Baromètre d'opinion sur l'énergie et le climat en 2013*. Commissariat général au développement durable. Service de l'observation et des statistiques.: La Défense. France. p. 5.

Mertz O., Mbow C., Reenberg A. and Diouf A. 2009. Farmers' perceptions of climate change and agricultural adaptation strategies in rural Sahel. *Environmental management*, **43**(5), 804–816, doi:10.1007/s00267-008-9197-0.

Oreskes N. 2004. Beyond the ivory tower. The scientific consensus on climate change. *Science*, **306**(5702), 1686, doi:10.1126/science.1103618.

Pachauri R.K. and Reisinger A. 2007. *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Pachauri, R.K & Reisinger, A., *eds.* Genève, Suisse. p. 103.

Patt A. and Schroter D. 2008. Perceptions of climate risk in Mozambique: Implications for the success of adaptation strategies. *Global Environmental Change*, **18**(3), 458–467, doi:10.1016/j.gloenvcha.2008.04.002.

Reid S., Smit B., Caldwell W. and Belliveau S. 2006. Vulnerability and adaptation to climate risks in Ontario agriculture. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **12**(4), 609–637, doi:10.1007/s11027-006-9051-8.

Rivington M., Matthews K.B., Buchan K., Miller D.G., Bellocchi G. and Russell G. 2013. Climate change impacts and adaptation scope for agriculture indicated by agro-meteorological metrics. *Agricultural Systems*, **114**, 15–31, doi:10.1016/j.agsy.2012.08.003.

Rogers M., Curtis A. and Mazur N. 2012. The influence of cognitive processes on rural landholder responses to climate change. *Journal of environmental management*, **111**, 258–266, doi:10.1016/j.jenvman.2012.07.015.

Ruget F., Moreau J., Ferrand M., Poisson S., Gate P., Lacroix B., Lorgeou J., Cloppet E. and Souverain F. 2010. Describing the possible climate changes in France and some examples of their effects on main crops used in livestock systems. *Advances in Science and Research*, **4**(2007), 99–104, doi:10.5194/asr-4-99-2010.

Thomas D.S.G., Twyman C., Osbahr H. and Hewitson B. 2007. Adaptation to climate change and variability: farmer responses to intra-seasonal precipitation trends in South Africa. *Climatic Change*, **83**, 301–322, doi:10.1007/s10584-006-9205-4.

Tschakert P. and Dietrich K. 2010. Anticipatory learning for climate change adaptation and resilience. *Ecology and Society*, **15**(2), p.18.

Wheeler S., Zuo A. and Bjornlund H. 2013. Farmers' climate change beliefs and adaptation strategies for a water scarce future in Australia. *Global Environmental Change*, **23**(2), 537–547, doi:10.1016/j.gloenvcha.2012.11.008.

Chapitre 2 - Analyse de la vulnérabilité des élevages laitiers du Sud-Ouest à la variabilité climatique: profils de sensibilité et adaptations mises en œuvre

Avant-propos

Ce chapitre reprend les résultats obtenus par Olivia Itier, que j'ai co-encadrée avec Michel Duru entre février et septembre 2013 au cours de son stage de fin d'études[*]. La complexité de l'étude et la richesse des résultats justifient sa place dans ma thèse même si, en l'état actuel, il s'agit plus d'une étude que d'un article scientifique. Cette étude est une première étape vers un article scientifique. D'abord, elle me permet de mettre en avant plusieurs limites méthodologiques à résoudre avant d'en faire un article (voir discussion du chapitre). Ensuite, elle me permet d'identifier sur quel thème recentrer l'ensemble du travail, notamment l'introduction, les analyses et la discussion. Les résultats que je présente ici permettraient d'illustrer le concept de la **résilience** dans le cas **des systèmes d'élevage laitiers face à une année climatique exceptionnelle**. Cette étude a notamment permis d'identifier des délais entre l'évènement perturbateur et son effet sur le système, des temps de retours à l'état initial. Elle a également permis d'expliquer différents niveaux de sensibilité en fonction des performances, de la structure et de la conduite des systèmes.

[*] Itier O. 2013. *Caractérisation de la vulnérabilité des élevages laitiers du Sud-Ouest à la variabilité et au changement climatiques. Mémoire d'Ingénieur*. AgroCampus Ouest, Rennes.

1. Introduction

Les systèmes de production agricole sont exposés à un contexte économique, climatique et institutionnel changeant et incertain qui menace leur pérennité. Les exploitations sont confrontées à deux types de changements : les changements prévisibles tels que les changements institutionnels et climatiques et les changements imprévisibles tels que les aléas économiques et météorologiques. En effet, une exploitation agricole doit notamment faire face aux fluctuations du marché qui jouent sur le prix des intrants et des produits finis et aux aléas climatiques et sanitaires, changements brusques et imprévisibles qui affectent les quantités produites et leurs qualités (Cordier, *et al.* 2008). Elle est également soumise à des changements mieux prévisibles : brusques lorsqu'il s'agit de révisions de politiques (subventions, réglementations), progressifs concernant le réchauffement climatique.

Pour faire face à ces évolutions de contexte, les agriculteurs peuvent modifier la structure ou la conduite de leur exploitation. Ces adaptations peuvent être classées selon leur durée et le moment de leur application. Si l'adaptation s'effectue sur le long terme, elle est d'ordre stratégique. Il peut s'agir d'une modification de structure ou de conduite du système. Si au contraire la modification vise le court-terme, pour faire face à un aléa, il s'agit d'une adaptation d'ordre tactique qui portera uniquement sur la conduite. Ensuite, lorsque l'adaptation est une mesure de prévention et donne la possibilité au système de résister à une situation particulière au cas où elle se produirait, on parle d'adaptation anticipative. Lorsque l'adaptation est mise en place en réponse à un aléa non anticipé, on parle d'adaptation réactive (Belliveau, *et al.* 2006).

Par ailleurs, il existe des mesures d'aide ou d'appui aux exploitations pour faire face à ces changements, mais elles sont restreintes lorsqu'il s'agit de l'adaptation au contexte climatique. Par exemple, lorsque les politiques publiques sont amenées à évoluer, les agriculteurs bénéficient de temps et de services d'accompagnement pour anticiper ces évolutions et adapter leur exploitation au nouveau contexte. Dans le cas de la Politique Agricole Commune, plusieurs années s'écoulent entre la première présentation du projet de réforme et son application dans chacun des pays. S'agissant des aléas climatiques, il faut distinguer le récurrent de l'exceptionnel. Dans le premier cas, les contrats d'assurance agricole, dont les primes sont en partie prises en charge par l'Etat, couvrent les récoltes contre plusieurs risques climatiques: la grêle, la tempête, le gel, la sécheresse, les inondations ou excès d'eau. Ces assurances n'existent que pour les céréales, oléagineux et fruits. Pour les aléas climatiques exceptionnels, des mesures d'urgences sont mises en place par les institutions, à l'exemple de 2011, sous forme d'indemnisation des pertes dues à la sécheresse, de reports d'échéances de prêts et d'exonérations de la taxe sur le foncier non bâti. Il s'agit dans ces deux cas de mesures financières en réaction à un évènement défavorable. Cependant, il n'existe aucune mesure aidée d'anticipation ou de prévention qui permette de diminuer la vulnérabilité des exploitations à la variabilité ou au changement du climat, en assurant soit le maintien des rendements des cultures, soit l'équilibre entre les besoins des élevages et la production de fourrages.

Le climat est caractérisé par plusieurs variables climatiques (températures, précipitations, vents…) que l'on peut décrire par leur moyenne et leur variabilité autour de cette moyenne à toutes les échelles spatiales et temporelles. Face à un climat donné, les systèmes sont adaptés à une gamme de variabilité, que l'on appellera «variabilité normale », et qui correspond à la zone de confort du

système en question (Smit, *et al.* 2000). La variabilité normale diffère de la variabilité totale car elle n'inclut pas les évènements extrêmes. En dehors de cette zone de confort, le système, confronté aux évènements extrêmes, n'est pas spontanément en mesure d'y faire face ou de tirer parti de la situation. L'éleveur doit alors mettre en place des mesures exceptionnelles, i.e. modifier le fonctionnement habituel de son exploitation.

Du fait du changement climatique, les climatologues prévoient une augmentation des températures à l'échelle mondiale de 0,4°C d'ici vingt ans et de 1,8 à 4°C d'ici la fin du siècle (Pachauri and Reisinger 2007). En France métropolitaine, l'augmentation de la température, plus marquée l'été que l'hiver, s'accompagnera d'une augmentation de la fréquence des vagues de chaleur et des risques de sécheresse estivale. Les précipitations en hiver devraient diminuer sur le Sud et augmenter sur le Nord alors que la baisse des précipitations devrait être généralisée pour les autres saisons (Braconnot, *et al.* 2009).

Les systèmes d'élevage qui produisent la majorité de leurs ressources fourragères sont particulièrement exposés au changement climatique. En effet, de nombreuses décisions à l'échelle du système fourrager, du système animal et du système d'alimentation sont fortement dépendantes du climat moyen et de sa variabilité. Par exemple, le climat moyen va orienter les choix sur les espèces et variétés cultivées, la date de vêlage (lorsque les vêlages sont groupés) et le chargement alors que la météo va orienter le calendrier d'alimentation, la durée du tour de pâturage et les dates de début et de fin de pâturage, de fermeture du silo à grain, de récoltes et de fauches.

Face à l'évolution et à la variabilité du climat et à ses conséquences sur les ressources fourragères notamment, les systèmes laitiers semblent être plus sensibles que les systèmes allaitants. En effet, les systèmes allaitants seraient plus flexibles que les systèmes laitiers et seraient ainsi plus aptes à faire face à une variation du climat. Selon nous, cinq des six sources de flexibilité du troupeau définies par (Nozières, *et al.* 2011) seraient plus facilement mobilisables en système allaitant qu'en système laitier. «Utiliser la diversité des espèces et lignées » serait plus facile pour les systèmes allaitants étant donné que le nombre de races bovines bouchères (18) est supérieur au nombre de races bovines laitières (16) (France Génétique Elevage). «Organiser la mobilité du troupeau » serait plus facile pour les systèmes allaitants que pour les systèmes laitiers pour lesquels la proximité avec un lieu de traite est indispensable. Sans prendre en compte la transformation du produit sur la ferme, « combiner une diversité de produits » serait plus facile pour le système allaitant étant donné que les animaux (le produit en système allaitant) peuvent être vendus à différents âges et selon différents modes d'engraissement alors que le lait (le produit en système laitier) n'a qu'une seule forme de valorisation. «Utiliser les capacités d'adaptation de l'animal » serait plus facile en système allaitant : les animaux peuvent être momentanément sous alimentés sur une période qui s'étale du vêlage à la préparation à l'insémination suivante alors qu'en système laitier cette fenêtre de sous-alimentation n'existe pas étant donné que la période de gestation recouvre la période de lactation. La source de flexibilité « jongler avec le nombre d'animaux » serait à priori indépendante du système de production.

Plusieurs pratiques d'éleveurs sont considérées comme pouvant être des adaptations tactiques et stratégiques à l'aléa climatique mais peu d'études s'interrogent sur leur efficacité concrète pour réduire la sensibilité du système face au climat. Avoir un **système sous-optimal** pourrait être un moyen stratégique de faire face à l'aléa climatique. Pour un système équilibré sur une longue

période, plus les fourrages produits seront en excès par rapport aux besoins des animaux, plus il sera possible de faire du stock pour les années suivante et ainsi diminuer la sensibilité de l'exploitation à l'aléa climatique. Deux leviers permettent de rendre plus robuste le système : 1 - le levier animal en diminuant les besoins des animaux, soit à l'échelle du troupeau (diminution du nombre d'animaux), soit à l'échelle de l'individu (diminution du niveau de production) (Nozières, *et al.* 2011) ; 2 - le levier assolement en augmentant les surfaces fourragères qui ne sont pas pâturées en année moyenne (elles sont alors fauchées pour faire du stock en année moyenne ou favorable et pâturées en année défavorable). Mettre en place un système d'**irrigation** serait un moyen stratégique de diminuer la sensibilité à l'aléa climatique alors que le moment et le volume d'irrigation au cours d'une campagne relèverait d'adaptations tactiques à la variabilité climatique. Par ailleurs, il est admis que la **diversité** des ressources, des productions, et des modes de gestion est un moyen stratégique de faire face à l'aléa (Darnhofer, *et al.* 2010; ten Napel, *et al.* 2011), notamment climatique (Anwar, *et al.* 2012; Dumont, *et al.* 2013). Par exemple, la diversité des ressources fourragères permet de substituer un aliment à un autre dans la ration. En outre, la diversité des couverts prairiaux peut-être un moyen d'étaler la production d'herbe sur la saison (Ingrand, *et al.* 2011). De même, la diversité des modes de gestion de la prairie (pâture et fauche, à différents stades phénologiques) ou des cultures annuelles (cultures à double fin, cultures dérobées) offrirait une flexibilité interne au système fourrager face à la variabilité climatique (Ingrand, *et al.* 2011; Moreau, *et al.* 2008; Vertes, *et al.* 2011). Dans un autre registre, les adaptations tactiques peuvent porter sur la **flexibilité externe** du système comme par exemple lors d'achats exceptionnels de concentrés ou de fourrages (Moreau, *et al.* 2008) ou bien lors de l'achat ou la vente exceptionnelle d'animaux. En revanche, l'achat régulier de fourrages est une d'adaptation stratégique à l'aléa climatique (Vertes et al., 2011).

Notre étude consiste en l'analyse des performances, des stratégies et des tactiques des exploitations bovines laitières à partir d'une base de données qui regroupe les informations des exploitations du Sud-Ouest de la France sur la période 1989-2010. L'objectif est d'identifier des stratégies et tactiques qui permettent aux exploitations de faire face à une année climatique chaude et sèche. Cette situation climatique (températures élevées et fort déficit climatique) correspond à la tendance d'évolution du climat attendue pour les cent prochaines années. Nous avons choisi de focaliser notre étude sur une année climatique exceptionnelle plutôt que sur une période afin de nous affranchir des moteurs non-climatiques de l'évolution des exploitations et de leurs performances. Il s'agit de l'année 2003, année climatique exceptionnellement chaude et sèche, qui a provoqué une baisse de rendement sans précédent depuis un siècle (-30 % de biomasse à l'échelle européenne) (Ciais, *et al.* 2005). D'abord, nous effectuons une classification des exploitations en fonction de la sensibilité de leurs performances face à l'année 2003. Ensuite, nous identifions les stratégies et tactiques spécifiques aux exploitations les moins sensibles face à cette année climatique exceptionnelle. Nous considérons ici que les exploitations les moins sensibles sont soit les exploitations les mieux adaptées sur le long terme (stratégie), soit les exploitations qui ont le mieux réussi à s'adapter sur le court terme (tactique). Les stratégies et tactiques identifiées pour faire face à cette situation semblable au climat futur pourraient être des voies à explorer pour adapter les élevages au changement climatique.

2. Matériels et Méthodes

2.1. Description de la base de données et choix des variables d'intérêt

2.1.1. OPTILAIT : base de données du Contrôle Laitier

Nos analyses portent sur la base de données d'Appui Technique régional OPTILAIT mise en œuvre par les Organismes de Contrôle Laitier du Sud-Ouest (18 départements). Cette base de données s'étend de 1989 à 2010. Elle renseigne la structure, la conduite et les résultats techniques des exploitations laitières bovines ayant adhéré au Contrôle Laitier*. Les 216 variables de la base de données OPTILAIT comprennent les éléments techniques suivants :

- Structure : Surface Agricole Utile (SAU), Surface Fourragère Principale (SFP), utilisation des sols (part de maïs, de prairies temporaires et de prairies permanentes), surfaces fourragères irriguées, troupeau (dimension et répartition des vaches selon leur âge), chargement apparent (UGB/ha SFP).
- Conduite : gestion des stocks, achats, mise en place de dérobées, « jours d'avance » au 31 décembre (nombre de jours d'avance en stocks fourragers).
- Performances agronomiques : rendements fourragers (maïs ou sorgho grain, ensilage de maïs, ensilage d'herbe).
- Performances zootechniques : intervalle inter-vêlages, pourcentage de réussite de la première Insémination Artificielle.
- Performances intégrées : autonomie fourragère, quantité de lait, production laitière par vache (L/an), pourcentage de chutes de lactation moyen par an (nombre de chutes par rapport aux courbes de lactation standards divisé par le nombre de contrôles total), qualité du lait.

Les exploitations sont réparties dans six régions pédoclimatiques : Montagnes, Ségalas, Causses et sables, Coteaux, Piémont Pyrénéen, Sud Aquitain (Figure 6). Ces six régions regroupent une grande diversité de reliefs et de climats. Le découpage a été fait à dire d'experts par l'Idele selon la profondeur des sols, l'altitude, le climat et l'orientation fourragère de chaque zone (Tableau 8). Certaines de ces zones sont dispersées spatialement en plusieurs blocs non limitrophes avec des caractéristiques similaires (se référer à l'Annexe 4 pour plus de détails sur les caractéristiques de chaque zone).

Notre étude a porté sur les exploitations de la base qui ont été suivies au moins dix-huit ans et sans interruption de plus de deux ans consécutifs entre 1989 et 2010. Par conséquent, les exploitations qui auraient disparues au cours de la période 1989-2010 ne sont pas prises en compte.

* Contrôle laitier : service de contrôle de performance et de conseil en élevage laitier. Il est mis en place par les chambres d'agriculture et il permet de suivre les performances individuelles de chaque vache (quantité et qualité du lait). Il permet également à l'éleveur de bénéficier de conseils technico-économiques sur la gestion et l'alimentation du troupeau ainsi que la gestion des stocks fourragers.

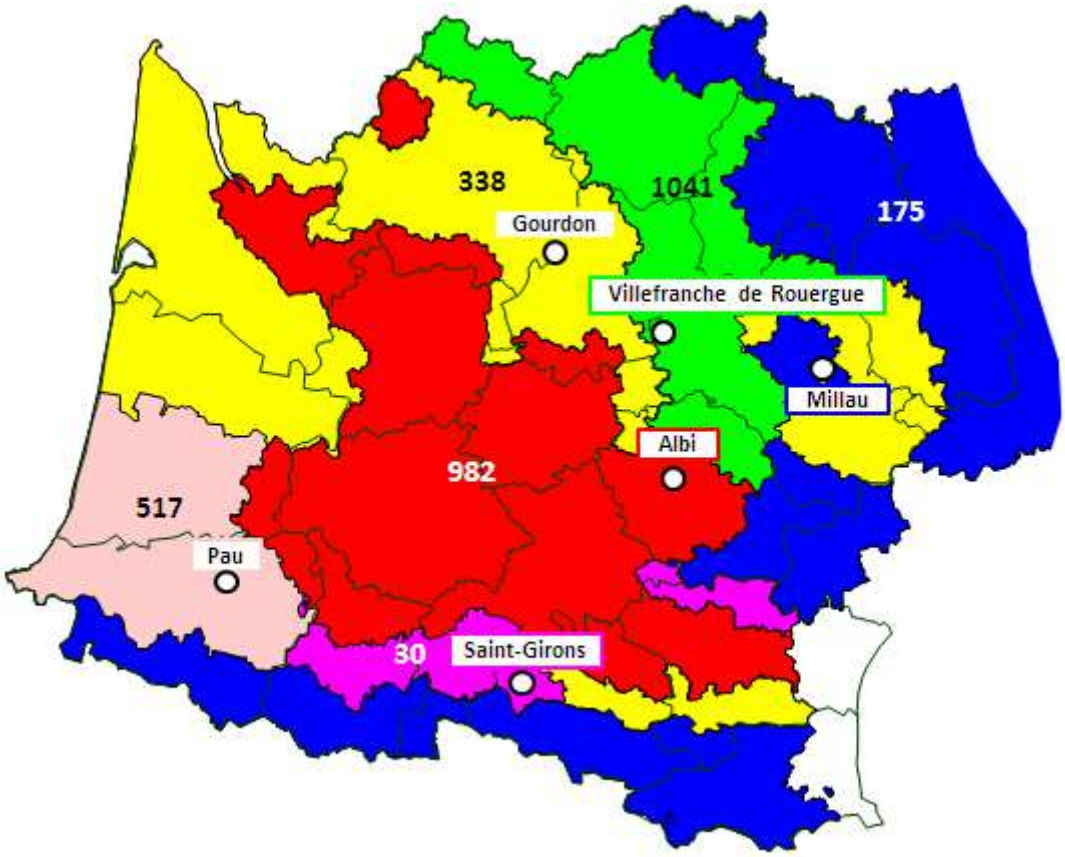


Figure 6 : Régions pédoclimatiques du Sud-Ouest, stations météorologiques correspondantes et nombre d'exploitations suivies sur au moins 18 ans (de 1989 à 2010) par région.

Tableau 8 : Description des six régions pédoclimatiques étudiées : station météo correspondante, orientation fourragères (PP = Prairies Permanente ; PT = Prairie Temporaire ; PA = Prairie Artificielle), pourcentage de maïs dans la SFP (m = moyenne calculée de toutes les exploitations (%), ϭ = écart-type (%)) et nombre d'exploitations suivies.

Région pédoclimatique	Couleur assimilée	Station météo	Orientation fourragère (Données OPTILAIT)	% maïs dans SFP en 2010	Nb. Expl.
Montagnes granitiques et basaltiques		Millau	Peu de maïs (altitude trop élevée), PP, PT resemées, Parcours sous-bois, Estives	m=0,6 / ϭ=2,3	175
Ségalas et régions assimilées		Villefranche de Rouergue	Maïs ensilage principalement	m=19,6 / ϭ=12,8	1041
Causses et sables		Gourdon	Zones calcaires : PP, Parcours, PT, PA (légumineuses) Autres zones : Maïs ensilage, PT, PP, PA	m=15,6 / ϭ=17	338
Coteaux secs		Albi	Maïs ensilage fonction de l'irrigation	m=35 / ϭ=19,6	982
Piémont Central Pyrénéen		Saint-Girons	Maïs ensilage, PP, PT	m=23,4 / ϭ=13,9	30
Sud Aquitain		Pau	Maïs ensilage principalement	m=45,1 / ϭ=26,8	517

2.1.2. Variables de performance

Parmi les variables de performances disponibles, nous avons centré nos analyses sur les performances agronomiques et les performances intégrées. Les performances agronomiques renseignent principalement sur l'exposition au climat, alors que les performances intégrées renseignent la capacité de l'éleveur à conduire son système fourrager face à la variabilité climatique. Nous avons choisis deux variables de performance agronomiques et trois variables de performances intégrées :

- Le rendement en ensilage d'herbe, toutes coupes confondues en t/ha, que la culture soit irriguée ou non.

- Le rendement en ensilage de maïs ou de sorgho grain en t/ha, que la culture soit irriguée ou non.
- La production de lait par vache : renseigne la quantité de lait produite par vache. Les différences de production de lait sur le long terme dépendent du niveau génétique de la vache et de la conduite du troupeau. Plus le troupeau est jeune, plus les vaches seront productives. Par ailleurs, plus l'intervalle inter-vêlage sera court, plus la production annuelle de lait sera grande car il y aura moins de jour non productif. Les variations interannuelles de la production laitières peuvent provenir de la variabilité des fourrages distribués, d'une ration qui a été modifiée trop brutalement ou de problèmes sanitaires qui peuvent témoigner d'une mauvaise gestion zootechnique, ou bien de conditions climatiques difficiles.
- La variation de production laitière entre l'année *n* et l'année *n+1* : renseigne sur la stabilité de la production de la quantité de lait produite en moyenne par Equivalent Vache Laitière (EqVL) sur l'exploitation. Une exploitation sera considérée en difficulté si sa production laitière baisse d'une année à l'autre.
- Le pourcentage de chutes de lactation (*% de chutes*) : renseigne le pourcentage de vache n'ayant pas réussi à maintenir son niveau de production laitière au niveau attendu. Une chute de lactation correspond à une baisse de la production de lait avant que la vache ne doive être tarie. Elle peut provenir de problèmes sanitaires ou de problèmes liés à l'alimentation.

2.1.3. Variables de structure

Nous avons porté notre analyse sur les variables de structure suivantes :

- Surface Fourragère Principale (SFP) (en ha)
- Effectif du cheptel (en EqVL)
- Chargement apparent (en UGB/ha de la SFP)
- Surfaces fourragères irrigables (en % de la SFP)
- Surfaces de maïs ou de sorgho grain ensilé, en culture principale ou en dérobée interne à la SFP (en % de la SFP)

La SAU n'a pas été prise en compte dans notre analyse car les cultures hors SFP n'entrent pas en compte dans la conduite et les performances de l'élevage. En revanche, la part de la SFP dans la SAU est probablement un facteur qui modifie les performances économiques de l'exploitation.

2.1.4. Variables de conduite

Les variables de conduite que nous avons considérées dans notre analyse sont :

- Variation du stock fourrager en tonnes de Matière Sèche (MS) par EqVL entre le 1er janvier et le 31 décembre d'une année,
- Stocks fourragers au 31 décembre, en jours d'alimentation,
- Autonomie en % $(100 - \frac{\text{MS achetée}}{\text{MS consommée}})$,
- Part de maïs irriguée par rapport au maïs total, en % $(\frac{\%\text{ de maïs dans la SFP irriguée} \times \text{ha SFP irrigué}}{\text{ha de maïs}})$,
- Consommation de concentrés en kg par EqVL,
- Durée moyenne de tarissement en jours.

La variation du stock fourrager, les stocks au 31 décembre et l'autonomie dépendent notamment des décisions d'achat ou de vente de fourrages par l'éleveur.

2.2. Caractérisation de la vulnérabilité à partir de la base de données

2.2.1. *Classification des exploitations selon leur sensibilité à l'aléa climatique*

Les exploitations ont été regroupées en classes en fonction de leur sensibilité au climat lors de l'année 2003. Nous définissons la sensibilité d'une exploitation par la variation de ses performances laitières. Les variables que nous avons utilisés comme indicateurs des performances laitières sont le pourcentage de chutes de lactation (*% de chutes*) et la variation de production laitière par vache ($_{n-1}^{n}\Delta PL$).

Les exploitations ont été classées selon trois classes de sensibilité pour l'indicateur *% de chutes* et selon trois classes pour l'indicateur $_{n-1}^{n}\Delta PL$:

Pour $_{n-1}^{n}\Delta PL$:

- Classe **S+** = « sensible positivement » : évolution de la production laitière par vache significativement plus favorable que pour l'ensemble des exploitations.
- Classe **PS** = « peu sensible » : évolution de la production laitière moyenne par rapport à l'ensemble des exploitations.
- Classe **S-** = « sensible négativement » : évolution de la production laitière par vache significativement plus défavorable que pour l'ensemble des exploitations.

Pour le *% de chutes* :

- Classe **PS** = « peu sensible négativement » : *% de chutes* significativement plus faible que pour l'ensemble des exploitations.
- Classe **MS** = « moyennement sensible négativement» : *% de chutes* moyen par rapport à l'ensemble des exploitations.
- Classe **TS** = « très sensible négativement » : *% de chutes* significativement plus élevé que pour l'ensemble des exploitations.

Nous avons fait porter nos analyses sur les différences des exploitations entre les trois classes S-, S+ et PS pour le $_{N-1}^{N}\Delta PL$ et entre les classes TS et PS pour le *% de chutes.* Nous avons identifié les critères caractéristiques des exploitations (structure, performances et conduite) de chacune de ces cinq classes de sensibilité lors de l'année 2003 d'une part, et sur l'ensemble de la période 1989-2010 d'autre part. Nous avons ainsi réalisé une typologie des exploitations sensibles négativement (classes S- et TS), peu sensibles (les deux classes PS) et sensibles positivement (classe S+).

2.2.2. *Identification des évolutions de structure, de conduite et de performances des exploitations*

Evolutions à court terme suite à 2003

Nous avons identifié les **évolutions à court terme** de structure, de conduite et de performances caractéristiques des exploitations de chacune des cinq classes de sensibilité suite à 2003. Ces évolutions à court terme suite à 2003 ont été définies pour chaque exploitation comme l'écart entre la valeur de 2003 et celle de 2004 pour chaque variable (Equation 1). Lorsque l'écart est proche de zéro alors l'évolution n'est pas significative.

$$_{N}^{N+1}\Delta Variable_{\alpha} = \frac{Variable_{\alpha N+1} - Variable_{\alpha N}}{Variable_{\alpha N}} \times 100 \quad (1)$$

Evolutions à long terme suite 2003

Nous avons identifié les **évolutions à long terme** de structure, de conduite et de performances caractéristiques de l'ensemble des exploitations suite à 2003. Ces évolutions à long terme suite à 2003 ont été définies pour chaque exploitation comme l'écart entre la moyenne des valeurs sur les 5 ans précédents 2003 (P1=[1998 ;2002]) et la moyenne des valeurs sur les 5 ans lui succédant (P1=[2004 ;2008]) pour chaque variable (Equation 2). Lorsque l'écart est proche de zéro alors l'évolution n'est pas significative.

$$ {}^{P2}_{P1}\Delta Variable_{\alpha} = \overline{Variable_{\alpha}}_{\mathrm{P2}} - \overline{Variable_{\alpha}}_{\mathrm{P1}} \quad (2) $$

avec $\overline{Variable_{\alpha}}_{\mathrm{Pi}}$ la valeur moyenne prise par la variable sur la période Pi.

2.3. Analyses statistiques

Les classifications d'exploitations ont été effectuées selon l'algorithme K-means. Des analyses de variances (ANOVAs) ont permis d'identifier les caractéristiques des exploitations selon leurs classes de sensibilité. Les détails des tests statistiques effectués sont reportés en Annexe 5.

Les résultats d'analyse statistique ont été considérés significatifs lorsque la p-value était inférieure à 5 %. L'ensemble des tests statistiques ont été réalisés à l'aide du logiciel R (version 2.15.2).

3. Résultats

3.1. Caractérisation de l'année 2003

3.1.1. Météo

L'année 2003, conformément à la littérature, a été une année très défavorable avec des températures élevées et une sécheresse intense. Les représentations graphiques des deux variables étudiées (températures moyennes annuelles : Tmoy ; bilan hydrique climatique : P-ETP) illustrent le caractère exceptionnel de cette année qui se situe au niveau de pics de température et de déficit climatique sur la période 1989 et 2011 (Annexe 6). De même, les fonctions de répartition des Tmoy et P-ETP au cours de la période 1989 et 2011 confirment le positionnement de l'année 2003 comme année extrême par rapport aux autres années (Figure 7).

L'année 2003 a des températures significativement plus élevées et un déficit climatique plus marqué que la moyenne sur la période 1989-2011 (Tableau 9). L'écart de températures est de +0,86 °C à +1,10 °C sur l'année et atteint +1,9 °C à +2,8 °C en été selon les régions. L'écart de P-ETP est de -0,39 à -0,99 mm sur l'année et atteint -1,1 à -2,1 mm en été selon la région considérée.

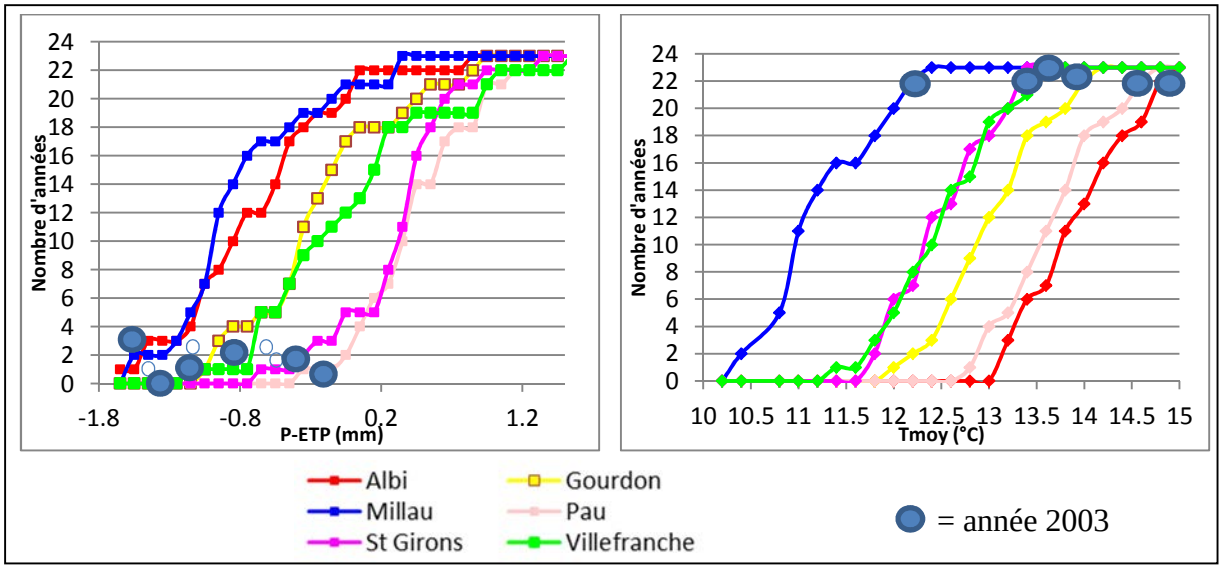


Figure 7 : Fonctions de répartition de P-ETP et de Tmoy annuels par région pédoclimatique entre 1989 et 2011 et positionnement de l'année 2003.

Tableau 9 : Calcul des écarts entre les T°C moyennes et Pp-ETP de l'année 2003 avec les valeurs moyennes de 1989 à 2011, à partir des données de l'année globale et des données de mai à septembre. Significatif au seuil de 5 %.

		Montagnes	Ségalas	Causses	Coteaux secs	Piémont	Sud Aquitain
Tmoy	Ecart à la moyenne sur toute l'année (°C)	+0,86	+1,10	+0,95	+1,06	+0,89	+0,92
	Ecart à la moyenne de mai à septembre (°C)	+2,7	+2,8	+2,3	+2,6	+2,0	+1,9
P-ETP	Ecart à la moyenne sur toute l'année (mm)	-0,39	-0,64	-0,74	-0,99	-0,42	-0,49
	Ecart à la moyenne de mai à septembre (mm)	-1,7	-1,3	-1,3	-2,1	-1,1	-1,1

3.1.2. Performances et conduite des exploitations : comparaison à la moyenne sur la période 1989-2010

Pour chaque variable et pour chaque région, nous avons calculé l'écart moyen par exploitation entre la valeur de l'année 2003 ou 2004 et la moyenne de l'exploitation sur la période 1989-2010. Par conséquent, ces écarts ne prennent pas explicitement en compte les tendances à long terme des valeurs des variables (par exemple, augmentation du niveau de production, augmentation des quantités de concentrés…).

Performances

L'année 2003 a été globalement défavorable pour les rendements fourragers. Cependant, **l'effet défavorable de la sécheresse apparaît en 2004 lorsque l'on considère les performances laitières des exploitations** (Annexe 6).

En 2003, les rendements d'ensilage d'herbe sont significativement plus bas que la moyenne sur 1989-2010 en Montagnes, Ségalas, Causses et Coteaux sec (selon la région, de -7 % à -13 % par rapport au rendement moyen de chaque exploitation) (Tableau 10). De même, pour l'ensilage de maïs, le rendement de l'année 2003 est significativement plus faible que la moyenne sur la période dans toute les régions, allant de -10 % (Sud Aquitain) à -36 % (Ségala) en moyenne à l'échelle de l'exploitation.

La production laitière a, quant à elle, accusée une baisse en 2004 plutôt qu'en 2003 dans toutes les régions sauf en Montagne (voir Annexe 8). Néanmoins, étant donnée l'augmentation en tendance de la quantité de lait produite par équivalent vache sur la période 1989-2010, les exploitations ont un niveau de production laitière en 2004 supérieur à leur moyenne sur 1989-2010. Cette plus grande quantité de lait produite par vache en 2004 par rapport à la moyenne est significative sauf en Piémont et correspond à un niveau supérieur de 2,5 % à 5,7 % (Tableau 10).

En 2004, le pourcentage de chute est différent significativement de la moyenne sur l'ensemble de la période dans deux zones : Montagnes et Ségala (+1,8 point en Montagnes et +1,4 point en Ségala).

Tableau 10 : Performance, structure et conduite moyenne par zone et écart en 2003 (ou 2004).

variables		Montagnes N=175	Ségalas N=1041	Causses N=338	Coteaux secs N=982	Piémont N=30	Sud Aquitain N=517	
Variations de stocks (tMS/EVL)	m	0,1	0,5	1,1	1,6	0,7		
	σ	0,2	0,1	0,2	0,1	0,3	0,1	
	Δ2003	-3,4	-10,5	-4,2	-5,8	-5,9	-4,8	tMS/EqVL
Nb de jours d'avance au 31/12	m	160	165,3	186,6	210,9	180,0	233,5	
	σ	2	0,5	1,3	0,7	2,7	0,7	
	Δ2003	ns	-22% (-37j)	-12% (-19j)	-5 % (-8j)	ns	-5% (-11j)	% (j)
	Δ2004	ns	+6% (+8j)	+10% (+21j)	+10% (+21j)	+13% (+26j)	+9% (19j)	% (j)
SFP irrigable (ha)	m	0,1	1,8	3,2	8,3	0,3	2,2	
	σ	0,02	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	
	Δ2003	ns	ns	+30%	+21%	ns	22%	%
Production laitière (1000L/vache)	m	5,4	6,3	6,2	6,6	5,7	6,9	
	σ	0,017	0,007	0,0	0,0	0,0	0,0	
	Δ2004	+5,7%	+4,4%	+3,6%	+4,2%	ns	2,5%	
Qté concentrés consommés (kg/vache)	m	1370	1375,8	1413,8	1455,3	1093,6	1399,9	
	σ	7	2,6	5,2	3,5	11,9	4,5	
	Δ2003	6%	+2,9%	-3,4%	+3,9%	ns	+8,0%	%
Effectif cheptel(EVL)	m	61	63,2	59,5	65,9	57,8	59,3	
	σ	0,5	0,2	0,3	0,2	1,1	0,3	
	Δ2003	ns	+4,7%	+8,0%	+9,0%	ns	+6,2%	%
Durée de tarissement (jours)	m	78	74,0	73,6	73,6	78,2	69,1	
	σ	0,3	0,1	0,2	0,1	1,0	0,1	
	Δ2003	ns	ns	ns	-5,2% (-3,5j)	ns	-3,7% (2,5j)	% (j)
Rendement EH (t/ha)	m	4,4	4,8	4,4	5,0	4,0	4,3	
	σ	0,03	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	
	Δ2003	-13%	-12%	-10%	-7,4%	ns	ns	%
Rendement EM (t/ha)	m	9,7	11,0	11,1	12,0	12,0	15,1	
	σ	0,3	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	
	Δ2003	-16%	-36%	-20%	-14%	-17%	10%	%
chutes de lactation (%)	m	26	24,7	23,5	21,9	24,3	18,9	
	σ	0,1	0,0	0,1	0,1	0,3	0,1	
	Δ2004	+7% (+1,8pt)	+5% (+1,4pt)	ns	ns	ns	ns	% (pt)
Autonomie (%)	m	95	95,5	95,6	95,7	96,4	94,1	
	σ	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	1,0	
	Δ2003	-14%	-10%	-8,3%	-3,1%	-3,7%	ns	%
SFP (ha)	m	72	45,6	58,8	41,5	44,4	26,4	
	σ	0,7	0,2	0,5	0,2	0,9	0,1	
	Δ2003	ns	+5,8%	+8,2%	+8,5%	ns	ns	%
Chargement apparent (UGB/haSFP)	m	0,9	1,5	1,2	1,8	1,4	2,4	
	σ	0,006	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	
	Δ2003	ns	-1,4%	ns	ns	ns	ns	%

Conduite

Sur l'année 2003 et pour toutes les régions, le stock fourrager des exploitations a significativement baissé, de -3,4 tMS/EqVL en Montagnes à -10,5 tMS/EqVL en Ségalas.

Entre fin 2003 et fin 2004, le stock fourrager a été augmenté. Au 31 décembre 2003, le stock fourrager est significativement plus faible que la moyenne sur l'ensemble de la période pour les régions Ségalas, Causses, Coteaux secs et Sud Aquitain avec une différence allant jusqu'à -22 % (Ségalas). En revanche, au 31 décembre 2004, le stock fourrager est significativement plus élevé que la moyenne sur 1989-2010 dans toutes les régions sauf en Montagnes, avec une différence allant jusqu'à +13 % (Piémont).

En 2003, la quantité de concentrés consommée est significativement plus élevée que la moyenne sur la période 1989-2010 en Montagnes (+6 %), Ségala (+2,9 %), Coteaux sec (+3,9 %) et Sud Aquitain (+8 %) alors qu'elle est significativement plus faible en Causses (-3,4 %).

En 2003, la durée de tarissement est significativement plus faible que la moyenne sur la période 1989-2010 pour les régions Coteaux Sec et Sud Aquitain.

Par ailleurs, l'autonomie est significativement plus faible en 2003 que sur le reste de la période dans toutes les régions sauf en Sud Aquitain. L'autonomie diminue de -3,1 % (Coteaux Secs) à -14 % (Montagne).

3.2. Structure, conduite et performances caractéristiques des exploitations selon leur classe de sensibilité

Nous n'avons pas réalisé de classification des exploitations de la région **Piémont Pyrénéen** étant donné son faible effectif (30 exploitations). Nous présentons ici les résultats pour les cinq autres régions.

3.2.1. Définition des classes de sensibilité

Classes de $\frac{2004}{2003}\Delta PL$

Pour rappel, S-, PS et S+ sont les trois classes de sensibilité selon l'indicateur $\frac{2004}{2003}\Delta\mathrm{PL}$. Chaque exploitation est répartie dans l'une de ces trois classes en fonction de la variation de sa production laitière entre 2003 et 2004 (Tableau 11 et Tableau 12).

Les exploitations **sensibles négativement « S- »** sont les exploitations dont l'évolution de production laitière est plus défavorable que pour l'ensemble des exploitations. En fonction des régions, il s'agit de baisses d'au moins 2 L/EqVL (Montagnes) à au moins 591 L/EqVL (Sud Aquitain).

Les exploitations **peu sensibles « PS »** sont les exploitations dont l'évolution de production laitière est moyenne par rapport à l'ensemble des exploitations. En fonction des régions, il s'agit des exploitations dont la production laitière par vache n'a pas baissé de plus de 591 L (Sud Aquitain) et n'a pas augmenté de plus de 629 L (Montagne).

Les exploitations **sensibles favorablement « S+ »** sont les exploitations dont l'évolution de la production laitière est plus favorable que pour l'ensemble des exploitations. En fonction des régions, il s'agit des exploitations dont la production a augmenté d'au moins 182 L (Sud Aquitain) à au moins 629 L (Montagne).

Tableau 11 : Variables significativement différentes lors de l'année 2003 pour chaque classe de variations de PL/vache entre 2003 et 2004, selon la région pédoclimatique. Résultats obtenus par ANOVA. Détails en Annexe 7.

		Montagnes S-: [-1100;-2] N=70 ; 43% PS:]-2;629] N=74 ; 46% S+:]629;2150] N=17; 11%	Ségalas S-: [-1660;-362] N=262; 26% PS:]-362;273] N=479; 47% S+:]273;1810] N=273; 27%	Causses S-: [-2180;-391] N=75; 26% PS:]-391;296] N=166; 50% S+:]296;1640] N=80 ; 24%	Coteaux secs S-: [-2500;-405] N=314 ; 33% PS:]-405;261] N=473 ; 49% S+:]261;1820] N=170 ; 18%	Sud Aquitain S-: [-2790;-591] N=116 ; 23% PS:]-591;182] N=277 ; 55% S+:]182;2320] N=115 ; 23%
2003	S-		Production laitière +			Production laitière +
				Variations de stocks - Rendements EM -		SFP irriguée -
			Concentrés +		Concentrés +	Durée tarissement -
					Nb de jours d'avance -	
	PS	Production laitière - Nb jours d'avance +		Rendements EH +	Rendements EM - Variations de stocks + Concentrés -	
	S+		Production laitière -			Production laitière -
			Durée de tarissement +			Durée tarissement +
			Autonomie +	Rendements EM +		
			Concentrés -	Variations de stocks +		

- : inférieur + : supérieur p_{value}>0,05 S- = diminution de la production laitière entre 2003 et 2004
PS = production laitière constante entre 2003 et 2004 S+ = augmentation de la production laitière entre 2003 et 2004

Tableau 12 : Variables significativement différentes lors de l'année 2004 pour chaque classe de variations de PL/vache entre 2003 et 2004, selon la région pédoclimatique. Résultats obtenus par ANOVA. Détails en Annexe 7.

		Montagnes S-: [-1100;-2] N=70 ; 43% PS:]-2;629] N=74 ; 46% S+:]629;2150] N=17; 11%	Ségalas S-: [-1660;-362] N=262; 26% PS:]-362;273] N=479; 47% S+:]273;1810] N=273; 27%	Causses S-: [-2180;-391] N=75; 26% PS:]-391;296] N=166; 50% S+:]296;1640] N=80 ; 24%	Coteaux secs S-: [-2500;-405] N=314 ; 33% PS:]-405;261] N=473 ; 49% S+:]261;1820] N=170 ; 18%	Sud Aquitain S-: [-2790;-591] N=116 ; 23% PS:]-591;182] N=277 ; 55% S+:]182;2320] N=115 ; 23%
2004	S-	Production laitière -		Rendements EM -	Production laitière -	
			Rendements EH +		Rendements EH +	SFP irriguée -
			Concentrés -		Concentrés -	
	PS	Production laitière -	Autonomie -			
	S+	Production laitière +			Production laitière +	
			Concentrés +			
			Rendements EH -	Durée tarissement +	Surfaces irriguées +	
			Rendements EM -	Rendements EM +	NB jours d'avance +	Autonomie -

- : inférieur + : supérieur p_{value}>0,05 S- = diminution de la production laitière entre 2003 et 2004
PS = production laitière constante entre 2003 et 2004 S+ = augmentation de la production laitière entre 2003 et 2004

Classes de % de chutes de lactation

Pour rappel, PS, MS et TS sont les trois classes de sensibilité selon l'indicateur *% de chutes*. Chaque exploitation est répartie dans l'une de ces trois classes en fonction de son *% de chutes* en 2004. Seules les caractéristiques des classes PS et TS sont reportées ici (Tableau 13).

Les exploitations **très sensibles négativement « TS»** sont les exploitations dont le *% de chutes* de l'année 2004 est plus élevé que l'ensemble des exploitations. En fonction des régions, le seuil varie

entre 26,9 % (Sud Aquitain) et 33,7 % (Montagnes). Les exploitations **peu sensibles négativement « PS »** sont les exploitations dont le *% de chutes* de l'année 2004 est plus faible que l'ensemble des exploitations. En fonction des régions, le seuil varie entre 17,5 % (Sud Aquitain) et 24,8 % (Montagnes).

Tableau 13 : Variables significativement différentes lors de l'année 2004 entres les deux classes extrêmes de % de chutes de lactation en 2004, selon la région pédoclimatique. Résultats obtenus par ANOVA.

		Montagnes	**Ségalas**	**Causses**	**Coteaux secs**	**Sud Aquitain**
		TS :]33,7,49,1] N=33 ; 19% PS : [0,24,8] N=59 ; 34%	TS :]33,63,2] N=167 ;16% PS : [0,23,2] N=391 ;38%	TS :]29,4,57,1] N=71 ;21% PS : [0,20] N=109 ;32%	TS :]29,5,50,3] N=135 ;14% PS : [0,19,4] N=397 ;40%	TS :]26,9,46] N=66 ;13% PS : [0,17,5] N=236 ;46%
2004	**TS**	Production laitière -				
		Concentrés -				
			Nb de jours d'avance au 31/12 -			
			Durée de tarissement +		Durée de tarissement +	
					Rendements EM -	
					SFP irriguée -	
	PS	Production laitière +				
		Concentrés +				
			Nb de jours d'avance au 31/12 +			
		Durée de tarissement -				
			Rendements EM +			
			Surfaces irriguées +			

TS = *Fort % de chutes de lactation* **PS**= *Faible % de chutes de lactation* - : inférieur + : supérieur p_{value}>0,05

3.2.2. Structure, conduite et performances caractéristiques des exploitations lors de 2003 (des données de 2003 et/ou 2004)

Classes de $\frac{2004}{2003}\Delta PL$ *(données 2003 et 2004)*

Les structures et conduites caractéristiques des exploitations des classes S-, PS et S+ lors de l'année 2003 et lors de l'année 2004 ont été identifiées par ANOVAs.

Exploitations sensibles négativement « S- »

En 2003, les exploitations S- ont eu des PL/vache supérieures à la moyenne dans l'ensemble des régions sauf en Montagnes (Tableau 11). En Causses et Coteaux secs, ces exploitations ont eu de plus faibles variations de stocks et de moins bons rendements en EM. Dans les régions Ségalas et Coteaux secs, les animaux ont consommé moins de concentrés. En Coteaux secs, l'état des stocks au 31 décembre permettait moins de jours de rationnement. Enfin, en Sud Aquitain, les exploitations S- ont moins irrigué leur SFP et appliqué des durées de tarissement plus courtes.

En 2004, ces exploitations dont la PL/vache a diminué, avaient des PL/vache inférieures à la moyenne de toutes les exploitations (Tableau 12). En Ségalas et Coteaux secs, elles ont obtenu de meilleurs rendements en EH. En Ségalas, Coteaux secs et Sud Aquitain, les animaux ont consommé moins de concentrés que la moyenne. En Causses, les exploitations S- ont eu de moins bons rendements en EM. Enfin, en Sud Aquitain, elles ont moins irrigué leurs surfaces.

Exploitations peu sensibles « PS »

En 2003, les exploitations PS ont des caractéristiques différentes selon les régions (Tableau 11). En Montagnes, leur PL/vache était inférieure à la moyenne, et l'état de leurs stocks au 31 décembre leur permettait plus de jours de rationnement. En Causses, elles ont bénéficié de meilleurs rendements en EH. En Coteaux secs, elles ont obtenu de moins bons rendements en EM, leurs variations de stocks fourragers étaient supérieures à la moyenne et leurs animaux ont consommé en moyenne moins de concentrés.

En 2004, année où la diminution des performances s'est produite, les exploitations PS avaient une PL/vache inférieure à la moyenne en Montagnes alors qu'en Ségalas, leur niveau d'autonomie était inférieur (plus d'achats de fourrages) (Tableau 12).

Exploitations sensibles favorablement « S+ »

En 2003, les exploitations qui ont réussi à augmenter leurs performances laitières malgré la sécheresse avaient une PL/vache inférieure à la moyenne de toutes les exploitations dans l'ensemble des régions étudiées sauf en Montagnes (Tableau 11). En Ségalas, Causses et Sud Aquitain, les durées de tarissement des vaches étaient plus longues. En Ségalas, leurs systèmes ont été plus autonomes cette année-là (moins d'achats) et les animaux ont consommé moins de concentrés. En Causses et Coteaux secs, leurs rendements en EM ont été meilleurs. En Causses, les variations de leurs stocks fourragers ont été supérieures alors qu'en Coteaux secs, l'état des stocks au 31 décembre permettait plus de jours de rationnement.

En 2004, les exploitations qui ont augmenté leur production laitière en 2004, ont eu des PL/vache supérieures à la moyenne, dans toutes les régions sauf en région Causses (Tableau 12). Dans l'ensemble des régions excepté en Montagnes, leurs animaux ont consommé plus de concentrés. En Coteaux secs et Sud Aquitain, elles ont irrigué plus de surfaces. En Ségalas, leurs rendements en EH et EM ont été moins bons alors que les rendements en EM ont été meilleurs que la moyenne en Causses. Toujours dans la région Causses, les exploitations ont imposé des durées de tarissement plus longues en moyenne. En Coteaux secs, l'état des stocks au 31 décembre permettait plus de jours de rationnement et en Sud Aquitain, leur niveau d'autonomie était plus faible (plus d'achats de fourrages).

Classes de % de chutes de lactation (données 2004)

Les structures et conduites caractéristiques des exploitations des classes TS, MS et PS lors de l'année 2004 ont été identifiées par ANOVAs. Seules les caractéristiques des classes extrêmes (TS et PS) sont reportées ici.

Exploitations très sensibles négativement « TS»

Les exploitations S-, à fort *% de chutes* de lactation, avaient une PL/vache significativement plus faible que la moyenne et leurs animaux ont consommé moins de concentrés au cours de cette année 2004, dans l'ensemble des régions (Tableau 13). En Ségalas, Causses, Coteaux secs et Sud Aquitain, l'état de leurs stocks au 31 décembre leur permettait moins de jours de rationnement. En Ségalas, Coteaux secs et Sud Aquitain, les durées de tarissement des vaches étaient plus longues. En Coteaux secs, ces exploitations sensibles ont eu de moins bons rendements en ensilage de maïs et ont moins irrigué leur SFP.

Exploitations peu sensibles négativement « PS »

A l'inverse des exploitations S-, les exploitations PS avaient des PL/vache significativement plus élevées que la moyenne avec des consommations de concentrés plus importantes dans toutes les régions (Tableau 13). Excepté en Montagnes, les stocks au 31 décembre étaient plus importants et ces élevages ont eu de meilleurs rendements en ensilage de maïs au cours de cette année 2004. En Montagnes, Ségalas, Causses et Coteaux secs, les durées de tarissements des animaux étaient plus courtes que la moyenne. En Ségalas, Causses et Coteaux secs, les éleveurs ont irrigué davantage leur SFP.

3.2.3. Structure, conduite et performances caractéristiques sur la période 1989-2010

Classes de $\frac{2004}{2003}\Delta PL$

Les structures, conduites et performances caractéristiques des exploitations des classes S-, PS et S+ sur la période 1989-2010 ont été identifiées par ANOVAs. Nous détaillerons cette-fois chacun des profils, les caractéristiques significatives de chacune pouvant différer d'une région à l'autre.

Exploitations « S- »

Dans l'ensemble des régions, ces exploitations sensibles lors d'une année exceptionnelle se composaient de plus petits cheptels que la moyenne (Tableau 14). Dans toutes les régions sauf en Montagnes, elles disposaient d'une plus petite SFP avec une plus grande part de maïs et des stocks d'avance au 31 décembre plus importants. En Coteaux secs et Sud Aquitain, leur PL/vache était en moyenne inférieure à la moyenne de toutes les exploitations, obtenaient de moins bons rendements en EH et EM, distribuaient moins de concentrés à leurs animaux, irriguaient moins leur SFP et leurs surfaces en maïs, avaient un chargement apparent inférieur associé à un niveau d'autonomie supérieur. En Ségalas et Causses, elles avaient au contraire des PL/vache supérieure à la moyenne, de meilleurs rendements en EM, plus de surfaces irriguées et leurs vaches consommaient plus de concentrés. En Causses, leurs rendements en EH étaient meilleurs que la moyenne, les durées de tarissement plus courtes et le chargement apparent plus important. En Ségalas, les durées de tarissement étaient plus longues et la part de maïs irrigué plus importante. Enfin, en Montagnes, leur PL/vache et leur chargement apparent étaient inférieurs à la moyenne et la part de maïs dans leur SFP était plus faible.

Tableau 14 : Variables significativement différentes pour les exploitations la classe S- (critère variation de la production laitière) sur la période 1989-2011, en comparaison à l'ensemble des exploitations par région pédoclimatique. Résultats obtenus par ANOVA.

Classe S-	**Montagnes** [-1100;-2] N=70 ; 43%	**Ségalas** S-: [-1660;-362] N=262; 26%	**Causses** S-: [-2180;-391] N=75; 26%	**Coteaux secs** S-: [-2500;-405] N=314 ; 33%	**Sud Aquitain** S-: [-2790;-591] N=116 ; 23%
Production laitière (L/vache)	-	+	+	-	-
Rendement EH (t/ha)			+	-	-
Rendement EM (t/ha)		+	+	-	-
Variations de stocks (tMS/EVL)					
Nb de jours d'avance au 31/12		+	+	+	+
% SFP irriguée		+	+	-	-
Qté concentrés consommés (kg/vache)		+	+	-	-
Durée de tarissement (jours)		+	-		
Autonomie (100-%MS achats/MS totale utilisée)				+	+
SFP (ha)		-	-	-	-
Chargement apparent (UGB/ha SFP)	-		+	-	-
Effectif cheptel(EVL)	-				
% maïs dans la SFP	-	+			
% Maïs irrigué/Maïs total		+		-	-

- : inférieur + : supérieur p_{value}>0,05 S- = diminution de la production laitière entre 2003 et 2004

Exploitations « PS »

Les caractéristiques de cette classe d'exploitations diffèrent fortement entre les régions. En Causses, Coteaux secs et Sud Aquitain, les exploitations qui ont maintenu leur niveau de PL/vache suite à l'année difficile avaient moins de surfaces en maïs dans leur SFP que la moyenne de toutes les exploitations, avec un chargement apparent inférieur et une consommation de concentrés par vache plus faible (Tableau 15). En Coteaux secs et Sud Aquitain, elles ont eu de meilleurs rendements en EH, irriguaient plus leur SFP et avaient une plus grande part de leurs surfaces en maïs que la moyenne, avec un niveau d'autonomie supérieur. En Montagnes, Ségalas et Causses, leur SFP étaient plus grande que la moyenne, avec de plus gros cheptels. En Montagnes et Causses, leurs PL/vache étaient inférieures et les durées de tarissement plus courtes. En Ségalas et Causses, leurs rendements en EM étaient meilleurs. En Ségalas, leurs rendements en EH étaient meilleurs, ils distribuaient plus de concentrés/vache, irriguaient moins leurs surfaces et avaient un chargement apparent supérieur. A l'inverse, en Montagnes, leurs rendements en EH étaient moins bons, ils disposaient de plus de stocks d'avance au 31 décembre, irriguaient plus leurs surfaces, avec un chargement apparent plus faible et une quantité de concentrés/vache plus faible. Enfin, en Coteaux secs, les durées de tarissement étaient plus longues.

Tableau 15 : Variables significativement différentes pour les exploitations la classe PS (critère variation de production laitière) sur la période 1989-2011, en comparaison à l'ensemble des exploitations par région pédoclimatique. Résultats obtenus par ANOVA.

Classe PS	Montagnes PS:]-2;629] N=74 ; 46%	Ségalas PS:]-362;273] N=479; 47%	Causses PS:]-391;296] N=166; 50%	Coteaux secs PS:]-405;261] N=473 ; 49%	Sud Aquitain PS:]-591;182] N=277 ; 55%
Production laitière (L/vache)	-		-		
Rendement EH (t/ha)	-	+		+	+
Rendement EM (t/ha)		-	-		
Variations de stocks (tMS/EVL)					
Nb de jours d'avance au 31/12	+				
% SFP irriguée	+	-		+	+
Qté concentrés consommés (kg/vache)	-	+	-	-	-
Durée de tarissement (jours)	-		+	+	
Autonomie (100-%MS achats/MS totale utilisée)				+	+
SFP (ha)	+	+	+		
Chargement apparent (UGB/ha SFP)	-	+	-	-	-
Effectif cheptel(EVL)	+	+	+		
% maïs dans la SFP			-	-	-
% Maïs irrigué/Maïs total		-		+	+

- : inférieur + : supérieur p_{value}>0,05 PS = diminution de la production laitière entre 2003 et 2004

Exploitations « S+ »

En Montagnes, Coteaux secs et Sud Aquitain, les exploitations qui ont réussi à tirer profit de l'année de sécheresse avaient une PL/vache supérieure à la moyenne, obtenaient de meilleurs rendements en EH et EM, distribuaient plus de concentrés à leurs vaches et avaient un chargement apparent supérieur. Dans toutes les régions à l'exception du Ségalas, l'état de leurs stocks au 31 décembre leur permettait plus de jours de rationnement (Tableau 16). En Ségalas et Causses, leur PL/vache était inférieure à la production moyenne, ils avaient de moins bons rendements en EH et EM, irriguaient moins leurs surfaces, avec un chargement apparent inférieur et une plus petite part de maïs dans la SFP. En Coteaux secs et Sud Aquitain, elles irriguaient plus leur SFP et leurs surfaces en maïs, avec une plus grande SFP et un niveau d'autonomie inférieur. En Ségalas, leurs vaches ont consommé moins de concentrés avec des durées de tarissement plus courtes, les exploitations étaient moins

autonomes et irriguaient moins leurs surfaces en maïs. En Montagnes et Causses, elles tarissaient leurs vaches sur une plus longue période. En Montagnes, ces exploitations S+ avaient plus de maïs dans leur SFP. En Causses, leur niveau d'autonomie était supérieur.

Tableau 16 : Variables significativement différentes pour les exploitations la classe S+ (critère variation de production laitière) sur la période 1989-2011, en comparaison à l'ensemble des exploitations par région pédoclimatique. Résultats obtenus par ANOVA.

Classe S+	Montagnes S+:]629;2150] N=17; 11%	Ségalas S+:]273;1810] N=273; 27%	Causses S+:]296;1640] N=80 ; 24%	Coteaux secs S+:]261;1820] N=170 ; 18%	Sud Aquitain S+:]182;2320] N=115 ; 23%
Production laitière (L/vache)	+	-	-	+	+
Rendement EH (t/ha)	+	-	-	+	+
Rendement EM (t/ha)	+	-	-	+	+
Variations de stocks (tMS/EVL)					
Nb de jours d'avance au 31/12	-		-	-	-
% SFP irriguée		-	-	+	+
Qté concentrés consommés (kg/vache)	+	-		+	+
Durée de tarissement (jours)	+	-	+		
Autonomie (100-%MS achats/MS totale utilisée)		-	+	-	-
SFP (ha)	-			+	+
Chargement apparent (UGB/ha SFP)	+	-	-	+	+
Effectif cheptel(EVL)					+
% maïs dans la SFP	+	-	-		
% Maïs irrigué/Maïs total		-		+	+

- : inférieur + : supérieur p_{value}>0,05 S+ = augmentation de la production laitière entre 2003 et 2004

Classes de % de chutes de lactation

Les structures, conduites et performances caractéristiques des exploitations des classes PS, MS et TS sur la période 1989-2010 ont été identifiées par ANOVAs. Les types d'exploitations TS et PS ont des profils opposés ; nous allons détailler les caractéristiques d'un seul de ces profils à savoir celles de la classe PS dans le but de soulever des leviers d'adaptations permettant de mieux résister aux années défavorables (Tableau 17).

Dans toutes les régions, les exploitations PS, ayant connu peu de chutes de lactation à la suite de 2003, année de sécheresse, sont des exploitations dont la PL/vache est supérieure à la moyenne de toutes les exploitations, qui obtiennent de meilleurs rendements en EM, distribuent une quantité plus importante de concentrés à leurs animaux, appliquent des durées de tarissement plus courtes et ont une part de maïs plus importante dans leur SFP avec de plus gros cheptels. Dans l'ensemble des régions, excepté en Montagnes, ces exploitations PS avaient en moyenne plus de stocks au 31 décembre, irriguaient une plus grande part de leur SFP et disposaient d'une SFP plus importante avec un chargement apparent plus élevé. En Montagnes, Ségalas et Causses, ces exploitations PS ont également obtenus de meilleurs rendements en EH. En Coteaux secs et Sud Aquitain, elles étaient plus autonomes que la moyenne. En Causses et Coteaux secs, elles irriguaient une plus grande part de maïs.

Tableau 17 : Variables significativement différentes pour les exploitations la classe PS (critère % de chutes) sur la période 1989-2011, en comparaison à l'ensemble des exploitations par région pédoclimatique. Résultats obtenus par ANOVA.

Classe PS	Montagnes [0,24,8] N=59 ; 34%	Ségalas [0,23,2] N=391 ;38%	Causses [0,20] N=109 ;32%	Coteaux secs [0,19,4] N=397 ;40%	Sud Aquitain [0,17,5] N=236 ;46%
Production laitière (L/vache)	+	+	+	+	+
Rendement EH (t/ha)	+	+	+		
Rendement EM (t/ha)	+	+	+	+	+
Variations de stocks (tMS/EVL)					
Nb de jours d'avance au 31/12		+	+	+	+
% SFP irriguée		+	+	+	+
Qté concentrés consommés (kg/vache)	-	-	-	-	-
Durée de tarissement (jours)	+	-	+		
Autonomie (100-%MS achats/MS totale utilisée)				+	+
SFP (ha)		+	+	+	+
Chargement apparent (UGB/ha SFP)		+	+	+	+
% maïs dans la SFP	+	+	+	+	+
Effectif cheptel(EVL)	+	+	+	+	+
% Maïs irrigué/Maïs total			+	+	

- : inférieur + : supérieur p_{value}>0,05 **PS**= *Faible % de chutes de lactation*

3.3. Evolutions de structure, de conduite et de performances suite à 2003

3.3.1. Evolutions à court terme selon la classe de sensibilité

Nous avons étudié les évolutions de chacune des variables d'intérêt entre 2003 et 2004, par exploitation, en fonction de leur classe de sensibilité (S-, PS et S+ ou TS et PS), par ANOVA. Cette analyse nous a permis de mettre en évidence les modifications entreprises par les exploitations suite à la sécheresse de 2003.

Classes de $\Delta_{2003}^{2004}\mathbf{PL}$

Exploitations « S- »

En Ségalas, Coteaux secs et Sud Aquitain, les exploitations S- ont diminué la quantité de concentrés consommée par vache entre 2003 et 2004 et augmenté la durée de tarissement (Tableau 18). Ces exploitations ont également connu une augmentation du *% de chutes* de lactation. En Ségalas, elles ont augmenté l'effectif de leur cheptel, obtenu de meilleurs rendements en EH en 2004 et augmenté la part de maïs irrigué. En Causses, elles ont obtenu de meilleurs rendements en EM en 2004. En Coteaux secs, elles ont également obtenu de meilleurs rendements en EH. Enfin, en Sud Aquitain, elles ont augmenté leur SFP entre 2003 et 2004 et augmenté leur niveau d'autonomie (moins d'achats en 2004).

Exploitations « PS »

En Montagnes, les exploitations PS ont diminué la taille de leurs troupeaux et leur chargement apparent et réduit la durée de tarissement des vaches (Tableau 18). En Ségalas, elles ont davantage irrigué leurs surfaces en maïs en 2004. En Coteaux secs, elles ont obtenu de meilleurs rendements en EM.

Exploitations « S+ »

En Ségalas, Coteaux secs et Sud Aquitain, les exploitations qui ont augmenté leur production laitière entre 2003 et 2004 ont augmenté la quantité de concentrés consommée par vache en 2004 (Tableau 18). En Ségalas et Sud Aquitain, elles ont diminué la durée de tarissement des vaches en 2004 et réduit leur niveau d'autonomie en Sud Aquitain en 2004 (plus d'achats). En Causses, elles ont

augmenté la variation de leurs stocks entre le début et la fin de l'année. Enfin, ces exploitations, qui ont réussi à améliorer leurs performances laitières entre 2003 et 2004 ont également eu de faibles *% de chutes* de lactation.

Tableau 18 : Evolutions significatives des variables d'intérêt entre 2003 et 2004, en fonction de la classe de variation de production laitière (S-, PS et S+), par région pédoclimatique. Résultats obtenus par ANOVA.

	Montagnes N_{S-}=70 N_{PS}=74 N_{S+}=17	Ségalas N_{S-}=262 N_{PS}=479 N_{S+}=273	Causses N_{S-}=75 N_{PS}=166 N_{S+}=80	Coteaux secs N_{S-}=314 N_{PS}=473 N_{S+}=170	Sud Aquitain N_{S-}=116 N_{PS}=277 N_{S+}=115
S-		Quantité de concentrés consommée ↓	Rendements EM ↑	Quantité de concentrés consommée ↓	
		Effectif cheptel ↑			
		Durée de tarissement ↑		Durée de tarissement ↑	
		% de chutes de lactation ↑		% de chutes de lactation ↑	
		Rendements en EH ↑		Rendements en EH ↑	SFP ↑
		% maïs irrigué ↑			Niveau d'autonomie ↑
PS	Effectif cheptel ↓	% Maïs irrigué ↑		Rendements en EM ↑	
	Durée de tarissement ↓				
	Chargement apparent ↓				
S+		Quantité de concentrés consommée ↑	Variations de stocks ↑	Quantité de concentrés consommée ↑	
		% de chutes de lactation ↓		% de chutes de lactation ↓	Autonomie ↓
		Durée de tarissement ↓			Durée de tarissement ↓

↑ : augmentation ↓ : diminution p_{value}>0,05 S- = diminution de la production laitière entre 2003 et 2004
PS = production laitière constante entre 2003 et 2004 S+ = augmentation de la production laitière entre 2003 et 2004

Classes de % de chutes de lactation

Exploitations « TS»

En Montagnes, Ségalas et Coteaux secs, les exploitations TS ont augmenté leurs stocks d'avance au 31 décembre entre 2003 et 2004 ($p<0,05$) (Tableau 19). En Ségalas, elles ont augmenté la durée de tarissement des vaches, augmenté la part de maïs dans leur SFP et diminué la quantité de concentrés consommée. En Coteaux secs, elles ont augmenté en moyenne le chargement apparent et irrigué une plus grande surface. En Ségalas et Sud Aquitain, ces exploitations qui ont souffert d'un fort *% de chutes* de lactation ont également vu leur niveau de PL/vache diminuer entre 2003 et 2004.

Exploitations « PS »

En Ségalas, les exploitations PS ont augmenté la quantité de concentrés consommée par vache entre 2003 et 2004 et ont connu une augmentation de leur PL/vache (Tableau 19). En Coteaux secs, elles ont diminué leur chargement apparent.

Tableau 19 : Evolutions significatives des variables d'intérêt entre 2003 et 2004, en fonction de la classe de % de chutes de lactation (TS et PS), par région pédoclimatique. Résultats obtenus par ANOVA.

	Montagnes N_{S-}=70 N_{PS}=74 N_{S+}=17	Ségalas N_{S-}=262 N_{PS}=479 N_{S+}=273	Causses N_{S-}=75 N_{PS}=166 N_{S+}=80	Coteaux secs N_{S-}=314 N_{PS}=473 N_{S+}=170	Sud Aquitain N_{S-}=116 N_{PS}=277 N_{S+}=115
TS	Nombre de jours d'avance au 31/12 ↑	Production laitière ↓		Nombre de jours d'avance au 31/12 ↑	Production laitière ↓
		Consommation de concentrés ↓		Chargement apparent ↑	
		Durée de tarissement ↑		% SFP irriguée ↑	
		% maïs dans la SFP ↑			
PS		Production laitière ↑			
		Consommation de concentrés ↑			
				Chargement apparent ↓	

↑ : augmentation ↓ : diminution p_{value}>0,05 TS = *Fort % de chutes* PS= *Faible % de chutes*

3.3.2. Evolutions à long terme de l'ensemble des exploitations

Nous avons réalisé une ANOVA de nos variables d'intérêt en fonction des périodes « Avant 2003 » et « Après 2003 » pour mettre en évidence les évolutions significatives suite à la sécheresse de cette année exceptionnelle.

Dans toutes les régions, les exploitations ont augmenté en moyenne la quantité de concentrés par vache après 2003 (Tableau 20). Dans toutes les régions, les exploitations ont globalement diminué leur niveau d'autonomie. Les variations de stocks ont augmenté après 2003 en Montagnes, Ségalas, Coteaux secs et Sud Aquitain. Les stocks d'avance au 31 décembre ont augmenté après 2003 en Ségalas mais diminué en Causses et Sud Aquitain. Toutes les exploitations, sauf celles du Sud Aquitain, ont diminué leur chargement apparent et la taille de la SFP a augmenté partout sauf en Montagnes. L'effectif des troupeaux a augmenté en Ségalas, Causses, Coteaux secs et Sud Aquitain. La part de maïs dans la SFP a diminué en Ségalas, Causses et Coteaux secs. Le maïs était moins irrigué après 2003 en Causses mais plus irrigué en Ségalas, Coteaux secs et Sud Aquitain. Au niveau des performances, le *% de chutes* de lactation est en moyenne plus élevé pendant les 5 ans après 2003, dans toutes les régions. Les rendements en EH ont augmenté en Ségalas, Causses, Coteaux secs et Sud Aquitain alors que les rendements en EM ont diminué en Ségalas, Coteaux secs et Sud Aquitain.

Tableau 20 : Evolution des variables d'intérêt entre « Avant 2003 » et « Après 2003 », pour l'ensemble des exploitations, par région pédoclimatique.

	Montagnes N=177	Ségalas N=1043	Causses N=338	Coteaux secs N=987	Sud Aquitain N=517
Rendement EH		↑	↑	↑	↑
Rendement EM		↓		↓	↓
% de chute de lactation	↑	↑	↑	↑	↑
Autonomie	↓	↓	↓	↓	↓
Variation de stocks	↑	↑		↑	↑
NB jour avance au 31/12		↑	↓		↓
Chargement apparent	↓	↓	↓	↓	
Taille SFP		↑	↑	↑	↑
Effectif cheptel		↑	↑	↑	↑
Quantité de concentré consommée par vache	↑	↑	↑	↑	↑
Part de maïs dans la SFP		↓	↓	↓	
Part du maïs irrigué		↑	↓	↑	↑

↑ : augmentation ↓ : diminution $p_{value}>0,05$

4. Discussion

4.1. Limites de l'analyse

Le jeu de données que nous avons utilisé peut contenir des valeurs erronées et qui ne peuvent pas être vérifiées. En effet, il correspond aux données qui sont renseignées par chaque contrôleur laitier en fin d'année pour chaque exploitation. Les erreurs possibles sont des erreurs de retranscription ou d'unité, qui ne peuvent pas être identifiées lorsque la valeur renseignée est dans l'ordre de grandeur attendu. Néanmoins, nous avons estimé que le nombre d'erreurs était négligeable par rapport au nombre de valeurs totales.

Notre analyse des liens entre climat, performances, structure et conduite des exploitations s'est focalisée sur une année climatique exceptionnellement chaude et sèche (année 2003) plutôt que sur l'ensemble de la période 1989-2010. D'une part, en l'absence de tendance significative d'évolution du climat sur l'ensemble de la zone entre 1989-2010, il n'était pas possible d'étudier les évolutions des exploitations en lien avec les évolutions du climat sur cette même période. En effet, malgré une augmentation significative des températures moyennes sur la zone étudiée depuis 1950, ou même 1980, la température moyenne n'a aucune tendance significative sur la période 1989-2010. De même, la baisse du bilan hydrique climatique est significative sur la période 1950-2010 mais ne l'est pas sur la période 1989-2010 pour la globalité de la zone (seules les évolutions en Montagnes et Coteaux secs sont significatives). D'autre part, nos premières analyses de la base de données ont porté sur l'ensemble de la période et ont montré qu'il n'était pas possible d'expliquer les performances laitières ou la gestion de l'exploitation par des indicateurs d'exposition au climat seulement (à l'échelle de la saison ou de l'année). Cette difficulté peut s'expliquer par plusieurs facteurs simultanés : (i) diversité des exploitations et modes de gestion sur une zone pédoclimatique, (ii) diversité des tactiques mises en œuvre par les éleveurs pour faire face à la variabilité climatique, (iii) diversité des moteurs non climatiques d'évolution des exploitations et de leurs performances (contextes économique, institutionnel et sanitaire).

Tester l'effet du climat sur les caractéristiques des exploitations et leurs performances lors d'une année climatique exceptionnelle nous a permis de nous affranchir partiellement des autres évolutions de contexte et aléas. En effet, les systèmes d'élevage sont exposés à des changements économiques (prix des intrants et des produits finis) et institutionnels (réglementation, subventions) qui sont prépondérants dans la stratégie, la tactique et les performances d'une exploitation. En outre, les exploitations que nous avons étudiées suivent une tendance généralisée d'intensification et de sécurisation des systèmes (Annexe 8) que nous aurions dû prendre en compte dans nos analyses si elles avaient portées sur plusieurs années et non sur une année unique. En effet, l'amélioration génétique, les améliorations techniques ainsi que l'intensification expliquent l'augmentation continue de la production laitière par équivalent vache depuis 1989 (Annexe 8). La sélection génétique permet en effet de créer des animaux de plus en plus performants, pour de nombreux critères, dont la quantité de lait produite. Ainsi, la tendance observée sur la période d'étude est l'intensification des élevages avec une augmentation de la production et de la quantité de concentrés, des effectifs et de la taille des exploitations (Annexe 8).

4.2. Stratégies et tactiques pour faire face à une année exceptionnellement chaude et sèche

Le profil de sensibilité des exploitations face à une année exceptionnellement chaude et sèche peut s'expliquer par des caractéristiques stratégiques (structure et objectifs de production) et tactiques (conduite de l'exploitation). En effet, une stratégie et une tactique correspondent à chaque classe de sensibilité de la production laitière entre 2003 et 2004. Deux stratégies ont été sensibles à l'année 2003 (classes S+ et S- selon le ΔPL) alors qu'une stratégie s'est révélée robuste face à 2003 (classe PS selon le ΔPL). Les exploitations S+ et S- ont eu des réactions différentes face à 2003:

1. les exploitations S- ont maintenu la production laitière en 2003 puis ont subi une diminution de la production laitière en 2004, alors que,
2. les exploitations S+ ont augmenté leur production laitière entre 2003 et 2004.

Les exploitations robustes face à 2003 n'ont pas eu à mettre en place d'adaptations particulières (classe PS selon le ΔPL). Elles sont caractérisées sur le long terme par une plus grande SFP, une plus grande part de surfaces fourragères irriguées, un chargement plus faible et une plus faible consommation de concentrés que la moyenne des exploitations. Par ailleurs, elles ont des rendements d'ensilage d'herbe supérieurs à ceux des autres exploitations. Ces caractéristiques témoignent d'un système extensif (chargement plus faible, plus grande SFP, moins de concentrés) qui sécurise les ressources fourragères face à la sécheresse (irrigation). Elles reflètent aussi un potentiel pédoclimatique pour l'herbe ou une maitrise technique plus grands que la moyenne des exploitations. Il s'agit donc de systèmes sous-optimaux se laissant ainsi plus de marges de manœuvres face à une situation climatique défavorable. En outre, le recours à l'irrigation permet de sécuriser la ressource fourragère face aux sécheresses.

Les exploitations dont la production laitière a baissé en 2004 (classe S-) sont des exploitations dont la structure sur le long terme permet une production laitière inférieure à la moyenne des exploitations. Elles sont plus petites (plus petite SFP et plus petit cheptel) et moins chargées (chargement inférieur à la moyenne). Leur nombre de jours d'avance au 31 décembre est inférieur et la part de maïs dans la SFP est supérieure à la moyenne des exploitations. Cette structure peu traduire un potentiel pédoclimatique plus faible (cf. chargement et production laitière plus faibles).

Elle peut également refléter une tendance à moins faire pâturer les animaux (cf. plus de jours d'avance) due soit à des conditions pédoclimatiques plus contraignantes pour la production herbagère que pour la culture de maïs (cf. plus de maïs), soit à une moins bonne maîtrise technique de la production de la ressource herbagère, soit enfin à l'éloignement de certaines parcelles par rapport à la salle de traite.

Face aux conditions climatiques de 2003 défavorables à la production herbagère dès début juin et à la production de maïs, ces exploitations S- ont pu maintenir leur production laitière en 2003 (PL supérieure à la moyenne des exploitations en 2003) malgré la diminution des fourrages disponibles. La plus faible production laitière des exploitations S- en 2004 par rapport aux autres pourrait expliquer le plus faible achat de concentrés en 2004 par rapport aux autres exploitations mais également par rapport à 2003 (moins de besoins à l'échelle du troupeau). On remarque également que les exploitations S- ont allongé la durée de tarissement de leurs vaches entre 2003 et 2004, probablement pour que les animaux retrouvent leur note normale d'état corporel, assurant ainsi la pérennité du troupeau. Plusieurs caractéristiques de ces exploitations S- se retrouvent notamment chez les exploitations TS (très sensible par rapport au *% de chutes* de lactation) lors de l'année 2004 : production laitière et quantité de concentrés achetés plus faibles que la moyenne des exploitations et durée de tarissement plus longue.

Les exploitations dont la production laitière a augmenté entre 2003 et 2004 (classe S+) sont des exploitations dont la structure sur le long terme permet une production laitière supérieure, de meilleurs rendements d'ensilage d'herbe et de maïs. Ces exploitations consomment plus de concentrés que la moyenne des exploitations, sont moins autonomes, ont un chargement plus haut et ont moins de jours d'avance au 31 décembre que la moyenne. Ces caractéristiques peuvent traduire des conditions pédoclimatiques plus favorables à la ressource herbagère et/ou une meilleure maîtrise technique (meilleurs rendements, chargement plus élevé) ainsi qu'une tendance à plus faire pâturer les animaux (cf. moins de jours d'avance). Elles traduisent également une plus grande flexibilité externe (moins d'autonomie, plus d'achat de concentrés). Ces exploitations, par leur niveau de production laitière élevée, leur faible autonomie et leur chargement élevé peuvent être qualifiées d'intensives.

Face aux conditions climatiques de 2003, ces exploitations S+ ont probablement subi une baisse de leur production laitière en 2003 (PL inférieure à la moyenne en 2003 alors qu'elle est supérieure à la moyenne sur la période 1989-2010). La diminution de la production laitière a probablement été obtenue par un tarissement plus précoce des vaches (cf. durée de tarissement plus long en 2003 et chutes de lactations supérieures en 2003 qu'en 2004). Le troupeau a ainsi pu maintenir sa note d'état et donc ses capacités reproductives et de lactations pour la campagne 2004. On observe en effet que la catégorie d'exploitation S+ contient une plus grande proportion d'exploitations dont le *% de chutes* a été plutôt bon en 2004 (16 % de l'ensemble des exploitations sont S+ pourΔPL et PS pour *% de chutes,* non montré) que d'exploitations avec des pourcentages de chutes plutôt mauvais (3,9 % de l'ensemble des exploitations sont S+ pourΔPL et TS pour *% de chutes,* non montré). La bonne santé du troupeau ainsi qu'un plus fort achat de concentrés (cf. plus de concentrés en 2004) expliquent l'augmentation de la production laitière en 2004 (cf. classe S+) pour atteindre un niveau de production supérieur à la moyenne des exploitations (cf. PL supérieure en 2004). Par ailleurs, deux caractéristiques des exploitations S+ se retrouvent chez les exploitations PS pour le *% de chutes* : le

niveau de production supérieure à la moyenne en 2004 et la plus grande quantité de concentrés achetés en 2004.

4.3. Conséquences d'une année climatique exceptionnelle sur la stratégie des exploitations

Notre étude a révélé certaines modifications sur le long terme suite à la sécheresse de 2003 (en considérant une fourchette de ±5 ans autour de 2003). Cependant, ces modifications ne peuvent pas être qualifiées d'adaptations stratégiques réactives si elles ne sont pas comparées avec les dynamiques plus globales sur la période 1989-2010. En effet, certaines de ces modifications semblent suivre la dynamique d'évolution de la période 1989-2010 telles que l'augmentation des *% de chutes* de lactation, l'augmentation de la SFP, l'augmentation de la taille du troupeau, l'augmentation de la quantité de concentrés distribués et l'augmentation de la part de maïs qui est irriguée. Par ailleurs, le retour à l'état initial peut prendre plusieurs années (Mosnier 2009) comme cela semble être le cas pour la variable « autonomie »: les stocks ont été épuisés en 2003 et plusieurs années peuvent être nécessaires pour reconstituer les stocks à l'état initial et ainsi revenir au niveau d'autonomie initiale[*]. Néanmoins, il semble ressortir des adaptations en rupture avec les tendances antérieures, à savoir la diminution du chargement apparent et la diminution de la part de maïs dans la SFP. La diminution du chargement est une adaptation qui permet de diminuer les besoins fourragers pour ainsi laisser une marge de sécurité lors des années défavorables. Dans les systèmes non irrigués, la diminution de la part de maïs dans la SFP permet de s'adapter à des étés plus secs en substituant les maïs par des prairies. En effet, le maïs est une espèce particulièrement sensible à la sécheresse estivale alors que les prairies ont une production étalée sur l'année. On peut également penser que les problématiques actuelles ou qui se profilent en lien avec l'irrigation sur la zone d'étude ont également motivé cette diminution de la part de maïs dans la SFP (diminution des volumes autorisés, diminution de l'eau disponible).

4.4. Perspectives

4.4.1. A partir de la base de données d'Optilait

Des analyses complémentaires à partir de la même base de données permettraient d'identifier s'il existe des stratégies et tactiques particulièrement peu adaptées aux années chaudes et sèches, et, par conséquent, au climat futur. En effet, en sélectionnant les exploitations qui étaient présentes dix-huit ans au moins sur la période 1989-2010 (vingt-deux ans), nous avons exclu de notre analyse les exploitations qui n'auraient pas su faire face à l'année 2003. Il serait intéressant de comparer les performances, structures et conduites caractéristiques des exploitations qui ont perduré suite à 2003 à celles qui n'auraient pas su faire face à l'aléa de 2003, à savoir les exploitations qui ne sont plus présentes à partir de l'année 2004.

La comparaison des adaptations tactiques mises en place suite en 2003 et en 2004 par rapport à l'ensemble des adaptations tactiques des années de la période 1989-2010 permettrait d'identifier si l'année 2003 correspond à un évènement climatique hors de la zone de confort des exploitations laitières. En effet, la zone de confort d'un système correspond aux situations auxquelles le système a l'habitude de faire face. Par conséquent, si les adaptations tactiques mises en places en 2003 et 2004

[*] La durée de récupération d'un système, c'est-à-dire le temps nécessaire au système pour retrouver un état d'équilibre, renvoie à la notion de résilience du système (Holling 2001; Sauvant and Martin 2010).

sont différentes des adaptations habituelles, alors l'année 2003 peut être considérée comme hors de la zone de confort des exploitations laitières du Sud-Ouest. Sinon, les exploitations laitières du Sud-Ouest peuvent être considérées comme étant adaptées à cette variabilité climatique.

D'autres composantes de la capacité d'adaptation des exploitations pourraient être prises en compte et testées dans des analyses complémentaires. Par exemple, la capacité financière pourrait être caractérisée par la taille de l'exploitation: plus l'exploitation est grande et comprend un grand nombre d'animaux, plus la capacité financière est grande. De même, la diversité des ressources pourrait être caractérisée par la diversité de l'assolement en utilisant par exemple l'indice d'entropie de Shannon* alors que la diversité des processus le serait par le nombre de périodes d'alimentations différentes du calendrier fourrager.

4.4.2. Par simulation de la dynamique des exploitations

L'utilisation de modèles de simulations d'exploitation pour plusieurs années climatiques défavorables successives permettrait d'identifier s'il existe des adaptations tactiques et stratégiques pour faire face à une succession d'années défavorables. Cette question est primordiale étant donné que la contrainte climatique pour les systèmes d'élevage vient plus de la succession d'années défavorables plutôt que d'une année défavorable isolée et extrême (Charpenteau and Duru 1983; Gibbons and Ramsden 2008). Néanmoins, cette analyse est impossible avec les données que nous avons présentées ici étant donné que sur la période 1989-2010 aucune succession d'années défavorables d'un point de vu des performances fourragères n'a été identifiée (Annexe 6). Dans une optique similaire, la simulation d'un élevage allaitant face à deux années défavorables a montré que la diminution des performances (le profit, les stocks, les rendements fourragers et la taille du troupeau) était accentuée lors de la deuxième année défavorable par rapport à la diminution de performances subvenue lors de la première année défavorable (Mosnier 2009).

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons caractérisé les stratégies et tactiques des exploitations bovines laitières en fonction de la sensibilité de leurs performances laitières face à une année climatique particulièrement chaude et sèche, pouvant représenter le climat futur. Nous avons mobilisé pour notre étude les données annuelles de performances, de structure et de conduite de 3053 exploitations du Sud-Ouest de la France suivies pendant au moins dix-huit ans sur la période 1989-2010 et réparties sur six régions pédoclimatiques. Les exploitations ont été classées selon la sensibilité de leurs performances laitières suite à l'année 2003 ; année la plus chaude est sèche de la période 1989-2010. Certaines exploitations ont des performances laitières qui se dégradent en 2004, d'autres voient leurs performances laitières s'améliorer en 2004 et enfin certaines exploitations ne voient pas leur performances laitières évoluer. Les indicateurs de performances laitières que nous avons utilisés sont la production laitière par vache et le pourcentage de chutes de lactation. Des ANOVAs ont permis d'identifier les performances, structures et conduites caractéristiques de chacune de ces classes de sensibilité 1- en 2003 et en 2004 (dimension tactique) et 2- sur la période 1989-2010 (dimension stratégique). Des ANOVAs ont également permis d'identifier les modifications de performances, structures et conduites de chacune des classes entre 2003 et 2004 (dimension

* Indice de Shannon $H = \sum_i p_i \log_2 p_i$, (Jost 2006) avec p_i la proportion d'un type de couvert *i* (prairie permanente, prairie temporaire, maïs-sorgho) dans la SFP.

tactique) et sur une fourchette de ± 5ans autour de 2003 (dimension stratégique). Dans un premier temps, nos analyses ont montré qu'il existe trois types de réactions face à un aléa climatique tel que 2003. La première, caractérisée par une production laitière stable suite à l'aléa, s'explique par un sous-chargement de l'exploitation et en une sécurisation des ressources fourragères par l'irrigation. La seconde et la troisième dépendent de la structure et des objectifs de l'exploitation. Les exploitations à haut niveau de production laitière vont avoir une baisse de leur niveau production l'année de l'aléa puis vont revenir à l'objectif de production l'année suivante, ou du moins le plus rapidement possible. Ces exploitations ont donc une augmentation de leur production laitière l'année suivant l'aléa. A l'inverse, les exploitations à faible niveau de production laitière vont maintenir leur production laitière lors de l'année défavorable, et la baisse de production se produit l'année suivante. Dans un second temps, nos analyses ont également montré que des adaptations stratégiques réactives ont été mises en place sur les exploitations, à savoir la diminution du chargement et la diminution de la part de maïs dans la SFP.

6. Références

Anwar M.R., Liu D.L., Macadam I. and Kelly G. 2012. Adapting agriculture to climate change: a review. *Theoretical and Applied Climatology*, **113**(1-2), 225–245, doi:10.1007/s00704-012-0780-1.

Belliveau S., Smit B. and Bradshaw B. 2006. Multiple exposures and dynamic vulnerability: Evidence from the grape industry in the Okanagan Valley, Canada. *Global Environmental Change*, **16**(4), 364–378, doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.03.003.

Braconnot P., Dufresne J., Salas y Mélia D. and Terray L. 2009. *Livre blanc Escrime: Analyse et modélisation du changement climatique*. 2nd ed.

Charpenteau J.L. and Duru M. 1983. Simulation of some strategies to reduce the effect on climatic variability on farming. The case of Pyrenees Mountains. *Agricultural Systems*, **11**(2), 105–125, doi:http://dx.doi.org/10.1016/0308-521X(83)90025-2.

Ciais P., Reichstein M., Viovy N., Granier a, Ogée J., Allard V., Aubinet M., Buchmann N., Bernhofer C., Carrara a, Chevallier F., De Noblet N., Friend a D., Friedlingstein P., Grünwald T., Heinesch B., Keronen P., Knohl a, Krinner G., Loustau D., Manca G., Matteucci G., Miglietta F., Ourcival J.M., Papale D., Pilegaard K., Rambal S., Seufert G., Soussana J.F., Sanz M.J., Schulze E.D., Vesala T. and Valentini R. 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, **437**(7058), 529–533, doi:10.1038/nature03972.

Cordier J., Erhel A., Pindard A. and Courleux F. 2008. La gestion des risques en agriculture de la théorie à la mise en œuvre : éléments de réflexion pour l'action publique. *Notes et Etudes Economiques*, **30**, 33–71.

Darnhofer I., Bellon S., Dedieu B. and Milestad R. 2010. Adaptiveness to enhance the sustainability of farming systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, **30**(3), 545–555, doi:10.1051/agro/2009053.

Dumont B., Fortun-Lamothe L., Jouven M., Thomas M. and Tichit M. 2013. Prospects from agroecology and industrial ecology for animal production in the 21st century. *Animal*, **7**(6), 1028–1043, doi:10.1017/S1751731112002418.

Gibbons J.M. and Ramsden S.J. 2008. Integrated modelling of farm adaptation to climate change in East Anglia, UK: Scaling and farmer decision making. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **127**, 126–134, doi:10.1016/j.agee.2008.03.010.

Holling C.S. 2001. Understanding the Complexity of Economic, Ecological, and Social Systems. *Ecosystems*, **4**(5), 390–405, doi:10.1007/s10021-001-0101-5.

Ingrand S., Baumont R., Farruggia A., Souriat M., Carrere P. and Guix N. 2011. La diversité des prairies : caractérisation agronomique et points de vue d ' éleveurs dans différents systèmes de production. *In Rencontres autour des recherches sur les ruminants*. p. 4.

Jost L. 2006. Entropy and diversity. *Oikos*, **113**(2), 363–375.

Moreau J., Ruget F., Ferrand M., Souverain F., Poisson S., Lannuzel F. and Lacroix B. 2008. Prospective autour du changement climatique : adaptation de systèmes fourragers. *In Rencontres autour des recherches sur les ruminants*. pp. 193–200.

Mosnier C. 2009. *Adaptation des élevages de bovins allaitants aux aléas de prix et de climat : Approches par modélisation*. PhD Thesis, Ecole Doctorale ABIES, France.

Nozières M.O., Moulin C.-H. and Dedieu B. 2011. The herd, a source of flexibility for livestock farming systems faced with uncertainties? *Animal*, **5**(9), 1442–1457, doi:10.1017/S1751731111000486.

Pachauri R.K. and Reisinger A. 2007. *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Pachauri, R.K & Reisinger, A., *eds.* Genève, Suisse. p. 103.

Sauvant D. and Martin O. 2010. Robustesse, rusticité, flexibilité, plasticité... les nouveaux critères de qualité des animaux et des systèmes d'élevage : définitions systémique et biologique des différents concepts. *Productions animales*, **23**(1), 5–10.

Smit B., Burton I., Klein R.J.T. and Wandel J. 2000. An anatomy of adapation to climate change and variability. *Climatic Change*, **45**, 223–251.

Ten Napel J., van der Veen A. a., Oosting S.J. and Groot Koerkamp P.W.G. 2011. A conceptual approach to design livestock production systems for robustness to enhance sustainability. *Livestock Science*, **139**(1-2), 150–160, doi:10.1016/j.livsci.2011.03.007.

Vertes F., Leon A.S., Aussems E., van Tilbeurgh V. and Thenail C. 2011. Place du changement climatique parmi les facteurs d'adaptation des systèmes fourragers dans les élevages laitiers du grand ouest de la France. *In Rencontres autour des recherches sur les ruminants*. p. 170.

Partie II : Exposition passée et future des systèmes d'élevage herbagers au changement climatique

« Bonjour,
des études le prouvent : l'humanité est beaucoup moins douée pour faire croitre son intelligence que la température à la surface de la terre. A tel point que le vieil adage "Y'a plus de saison ma bonne dame" est en train de devenir réalité. Ainsi le calendrier que nous avions l'habitude d'utiliser est complétement dépassé et on pourra bientôt dire "en juin ne te découvre pas d'un brin" ou alors "en juillet fais ce qu'il te plait, comme en mai ». Il faudra même peut-être inventer de nouveaux mois comme juillembre ou septil et puis les dictons qui vont avec. Par exemple "en janviars, météo de garce". Ou alors, "en févriaoût, poêle au mazout", tiens ! Ah, c'est rigolo…
L'âme occidentale pense que pour s'adapter au changement climatique il lui suffira de retirer un pull alors qu'en fait c'est l'humanité toute entière qui va se prendre une belle veste, avec des millions de morts de faim et de soif. Et peut-être même une troisième guerre mondiale. Car même en période de réchauffement on peut toujours compter sur l'être humain pour jeter un grand froid.
Merci. »

La minute nécessaire de Bridget Kyoto
" Ya pu d'saisons !", juin 2013
par Laure NOUALHAT, Eric LA BLANCHE et Maïa MI

Chapitre 3 - Des indicateurs saisonniers pour évaluer l'exposition des systèmes d'élevage herbagers au climat

Assessing climatic exposure of grassland-based livestock systems with seasonal-scale indicators*

Abstract:

Research aiming to reduce the vulnerability of agricultural systems to climate variability and change requires practical appraisal of their climatic exposure. We propose a method to map local climatic conditions over a given period to a set of productivity and management-related indicators that are specific to grassland-based livestock systems. Our method based on a reference system balances herbage production and feed requirements over a long period (≥ 30 years) and provides boundaries for productivity-defined seasons and indicators for surplus or shortage of herbage at seasonal and annual scales. This exposure-assessment method was applied to five climatically contrasting locations in south-western France. The trends and variability of the exposure indicators were analysed for past (1980-2010) and future (2035-2065) periods, considering the A1B scenario of the IPCC. Despite high year-to-year variability and the heterogeneity of the climatic situations studied, we show that climate change can modify the boundaries of productivity-defined seasons and seasonal herbage surplus or shortage. Moreover, the exposure indicators succeed in detecting climate-induced changes and distinguishing situations where a classical exposure indicator, such as annual forage production, could not. The exposure indicators highlight the forage productivity and the timing of production associated with local climatic conditions. These features fit the temporal scale at which farmers consider farm management and are highly suitable for identifying adaptation strategies that reduce the vulnerability of grassland-based livestock systems.

***Keywords**: climate change; climate variability; simulation; vulnerability*

1. Introduction

Awareness of the effect of current climatic trends and variability, as well as future climate change projections, is essential for farmers who may have to redesign their production systems and for public policy agencies that develop adaptation plans. In particular, several impacts can be expected in grassland-based livestock systems in which the farmer must satisfy the constant feed requirements of the herd despite the high variability of herbage growth due to climatic factors (both within and between years). Specifically, climate change may modify the vulnerability of grassland-based livestock systems. One of the indirect effects of climate change already observed at the farm scale concerns the animal feed supply by changing the seasonality of grassland production (Ma, *et al.* 2010). As the main drivers of grassland production are temperature, carbon dioxide concentration ($[CO_2]$) and available water, any change in climate averages (increasing temperature and $[CO_2]$) or variability (increased frequency of climatic extremes such as drought) is prone to modify both the quantity and temporal pattern of grassland production. Understanding the vulnerability of grassland-based livestock systems better and finding ways to respond to this threat is of high socio-economic importance and raises challenging research and development questions (e.g. Füssel 2007).

* This chapter is published and can be cited as: Sautier M., Martin-Clouaire R., Faivre R. and Duru M. 2013. Assessing climatic exposure of grassland-based livestock systems with seasonal-scale indicators. Climatic Change, 120, 341–355, doi:10.1007/s10584-013-0808-2.

Although the notion of vulnerability is commonly used in climate-change publications, no consensus yet exists on its definition. We use the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) definition of climate-change vulnerability (IPCC 2007,p. 883) and adapt it to grassland-based livestock systems: "the degree to which a system is susceptible to, or unable to cope with, adverse effects of climate change, including climate variability and extremes". According to this view, the vulnerability of a system depends on its exposure and sensitivity to climate change and on its adaptive capacity. Sensitivity is the degree to which the system responds to a given climatic input, and the adaptive capacity is the degree to which a system can adjust its practices, processes, or structures to moderate or offset the potential for damage or take advantage of opportunities created by a given change in climate (Schneider, *et al.* 2001). Exposure to climate is an external dimension of vulnerability usually referring to the duration, extent and frequency of weather perturbations that impact the system (Adger 2006). Sensitivity focuses explicitly on the response function and is expected to help understand the effect of small climate changes, the existence of thresholds at which significant changes occur in response to climate influence, and the properties of compensatory or synergistic effects among climatic factors. Since exposure refers to climatic conditions that impact the system, it is inherently linked to sensitivity; in many cases sensitivity and exposure are characterised simultaneously (Smit and Wandel 2006). For assessment purposes, both require knowledge about the relation between climate and the system. Exposure essentially characterises the background climate conditions that affect the system. It concerns weather events and patterns that are important from the farmer's perspective, particularly grassland productivity, the timing of production and their management repercussions. Two systems that are physically close and share the same climate exposure might have different vulnerabilities due to different sensitivities induced by differing management practices.

This paper describes part of a project in which farmers, advisors and scientists engaged in participatory design of less-vulnerable grassland-based livestock systems. It describes a set of indicators for assessing the exposure of these systems to climatic conditions at a given site. The approach maps climatic conditions into a vector of consequences on the system. The vector corresponds to a set of exposure indicators attached to a specific year and geographic location. To provide insight, the indicators must be calculated over a period long enough to overcome the effect of natural climate variability. The exposure assessment results from analysis of indicators over the period considered. It constitutes the first step in the vulnerability-reduction project and aims to provide a general view of the harmful or beneficial influence of the climate over a given period on typical grassland-based livestock systems in south-western France.

Characterising exposure examines whether it changed in the past or might change in the future (by using climate projections) and whether it differs among biogeographic regions. The exposure of grassland-based livestock systems to climate has and will change given that annual herbage growth is affected: growing seasons change in length, start and end dates and number of days of water and temperature stress (Rivington, *et al.* 2013). Classically, exposure is assessed by analysing temporal patterns of raw physical variables (e.g. temperature, precipitation) (Fraser, *et al.* 2011; McCrum, *et al.* 2009). Exposure is also assessed through summary climate indices which simplify a large amount of meteorological data into one value related to agronomic issues (e.g. aridity indices are used in a wide range of disciplines, while agro-meteorological metrics are specific to agricultural land-management decisions (Rivington, *et al.* 2013)). Unfortunately, these two approaches for assessing exposure were not suitable for our purposes because they are disconnected from the biophysical

processes underlying grassland production. The first method leaves the burden of interpreting the effect of change in physical variables on grassland behaviour to the analyst, which can be difficult even for experts, because climate effects on grass growth are often non-linear and interactive (compensatory or additive). The second method, based on summary climate indices, depends on purely statistical relations, which do not account for the causality involved in plant growth processes and does not deal easily with grassland production dynamics. Neither method has the power to address temporal aspects of grassland production and therefore provides limited insight into the management constraints that climate conditions might induce.

The aim of this paper is to present new exposure indicators concerning the beginning and duration of productivity-defined seasons and the seasonal balance of grazed or harvested forage. The indicators focus on the quantity of herbage produced and do not consider the quality of forage. Exposure is expressed as likely consequences on livestock systems at the seasonal scale, which is more appropriate than at the annual scale (George, *et al.* 2001; McKeon, *et al.* 2009). Estimating exposure on a seasonal timescale is crucial in grassland-based livestock systems, where the within and between-years variability of herbage production determines the herd diet and the cutting periods: (1) depending on the season, the herd is fed by grazed grass and stored forage (0 to 100% of the diet) and (2) herbage is harvested and stored for later use when herbage production exceed grazing. Accordingly, farm-management decisions depend on the quantity of forage produced and on the length and frequency of periods of surplus or shortage of grazing resources (Berentsen, *et al.* 2000; Gray, *et al.* 2008). Frequency-related aspects are not addressed in the paper. The indicators presented in this paper exploit scientific knowledge of herbage growth embedded in a dynamic simulation model that responds to various weather variables on a daily time scale. Understanding of the exposure indicators comes from both the use of concepts classically employed by livestock farmers (e.g. boundaries of productivity-defined seasons, forage balance) and the graphical nature of the results, concerning either past or potential future climate scenarios. The significance of the indicators for a given period and site can only be assessed when compared to those of another period or site.

2. Indicator-based characterisation of climatic exposure

2.1. Approach

Livestock farmers must match feed supply with energy requirements for maintenance and production targets. Feed demand can be satisfied by stored forage, such as hay or silage produced on the farm or purchased, and pasture produced on the farm. The exposure of grassland-based livestock systems to climate can be characterised by (1) the duration of periods in which pasture production is insufficient to meet herd demand and (2) the balance of forage consumed to forage produced. Our exposure indicators use as a reference a hypothetical balanced system in which herbage production equals herd intake over a sufficiently long period (at least 30 years, as in other studies (McKeon, *et al.* 2009)). In other words, the average herbage available equals the average feed needed by the herd over this period. The indicators divide a climatic year into three seasons, based on pasture-production dynamics, that are defined according to seasonal herbage availability. The exposure indicators refer to a location-specific reference value about average available herbage that is introduced next.

Average available herbage as a reference value

The exposure indicators are based on "average available herbage" (AAH), defined as the mean daily herbage growth (HG) over n years (Equation 1). Calculated for a given period and location, AAH represents daily mean herbage availability. In a balanced system, AAH is the daily feed required by the herd per area unit (g/m2/day). Daily HG can be predicted by any simulation model that considers grassland characteristics and defoliation practises due to grazing and cutting operations.

$$AAH = \left(\sum_{year=1}^{n} \sum_{jdoy=1}^{length(year)} HG_{jdoy}^{year} \right) / \sum_{year=1}^{n} length(year) \quad (1)$$

with n the number of years of the whole period, length(year) the number of days in the year considered, and jdoy the day-of-year number.

Definition of exposure indicators through characterisation of productivity-defined seasons and herbage availability

In temperate regions, rising temperatures in spring trigger the turnout to pasture when growth enables full-time grazing and cutting of hay or silage (the "high-growth season"). When water availability becomes low (the "moderate-growth season"), cow feeding from stored forage is needed (up to 100%) until rain returns. Finally, colder temperatures determine the "no-growth season". These seasons vary considerably among years and sites. In non-exceptional years, these three seasons correspond to spring, summer/fall, and winter, respectively. In the following sections, we will only use the terms "spring", "summer-fall" and "winter".

The three productivity-defined seasons are named spring, summer-fall and winter (Figure 8). The beginning of spring (B_{sp}) is the theoretical turnout date. We aggregated summer and fall in the compound summer-fall season because year-to-year variability of herbage growth in fall prevented identification of a starting date of fall. The beginning of summer-fall (B_{sf}) is the first day after the spring peak when full-time grazing is impossible. Winter begins (B_w) when grazing stops and ends when the next spring begins.

Because the change in productivity-defined seasons is calculated with thresholds of herbage growth (details in supplementary material) and to moderate effects of daily weather variability and focus on seasonal effects of climate on herbage growth, we smoothed daily herbage-growth values over 10-day windows.

Next, one estimates for each season the balance between herbage availability and herd feed requirements (Bal_{sea},), which can be positive (i.e. surplus) or negative (i.e. shortage). Formally, Bal_{sea} is defined as the sum of the difference between HG and AAH over the entire season (see supplementary material). In this way, the daily feed requirement is approximated by the daily mean value AAH without taking into account animal characteristics (e.g. live weight, live weight gain) and herd management (e.g. calving date). These characteristics, which may vary considerably from farm to farm, cannot be considered in this approach that relies on simple evaluation criteria in order to be applicable to any grassland system. Bal_{sea} can be converted into feeding days (see supplementary material) that facilitates comparison of sites with unequal potential for forage production.

Over a long period of n years (≥ 30 years), the sum of all seasonal herbage balances is equal to 0 by hypothesis. However, this sum can be either positive or negative for a specific year, which quantifies the amount of herbage either purchased or stored for later use, respectively (see supplementary material).

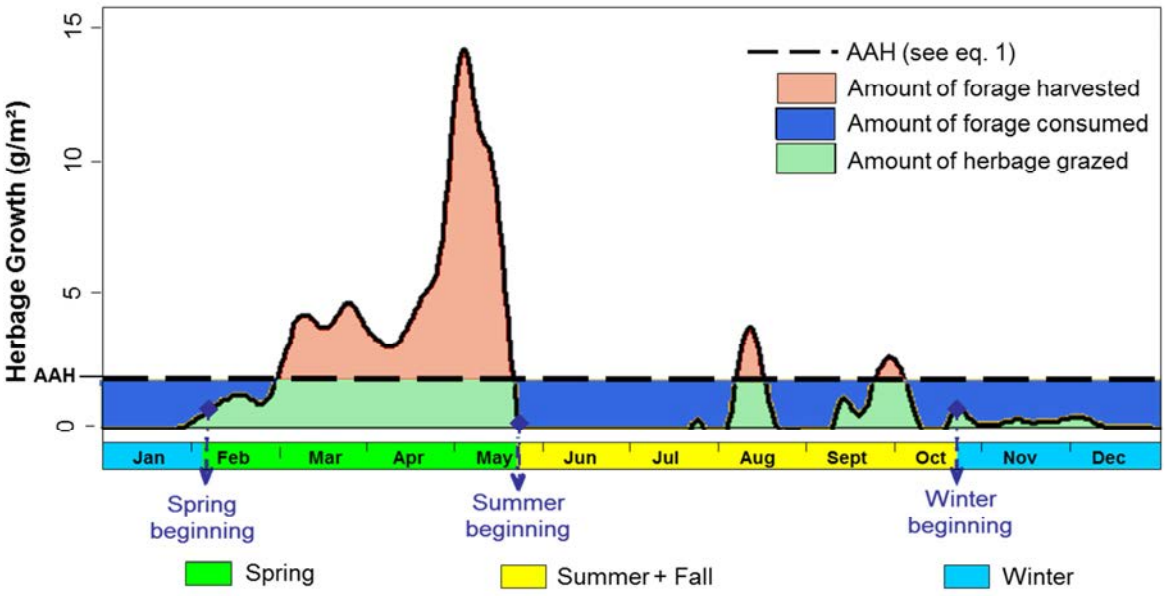


Figure 8: Determination of the season boundaries and the surplus or shortage of grazing resources according to herbage growth profile. The dark blue region under the dashed line indicates when the livestock is fed (partially in summer-fall and totally in winter) with silage or hay.

Statistical analysis of the first day, duration and herbage balance of each productivity-defined season enables identification of long-term trends and year-to-year variability. These climatic exposure indicators allow comparison of periods (e.g. past/future) or sites.

2.2. Case study

Site characteristics and weather data

We chose 5 locations in south-western France (plain, plateau and mountain) that cover a large climate gradient for temperatures and water availability: Aulus (latitude: 42° 47N; longitude: 1° 20E; altitude: 733 m), Saint-Girons (latitude: 43° 00N; longitude: 1° 06E; altitude: 414 m), Gourdon (latitude: 44° 44N; longitude: 1° 06E; altitude: 260 m), Millau (latitude: 44° 12N; longitude: 3° 02E; altitude: 714m) and Toulouse (latitude: 43° 36N; longitude: 1° 26E; altitude: 150m). These 5 locations represent, within a small area, 4 of the 13 environmental zones in Europe (Metzger, *et al.* 2005) and thus have different potentials for forage production. More detailed information is given in the supplementary material.

We used 1980-2011 weather data for a past scenario and climate patterns predicted for 2035-2065 for a future scenario. Past values came from recorded daily variables whereas future values came from climate simulations of the IPCC A1B SRES scenario (Nakicenovic, *et al.* 2000) by the ARPEGE-climate model (Déqué, *et al.* 1994) that were statistically downscaled using the Boé method based on weather-typing (Pagé, *et al.* 2008) to generate local (8 x 8 km) precipitation and temperature series although this method underestimates the intensity of future climate extremes (Graux, *et al.* 2013).

Growth model and statistical aspects

Daily HG is predicted using the herbage growth model developed by Duru et al. (2009). It was calibrated and validated for a large range of grass species and growing conditions in terms of temperature and water availability (Duru, *et al.* 2010). This dynamic model needs daily values of precipitation (P), potential evapotranspiration (PET), solar radiation and mean temperature (T). It also depends on parameters representing soil properties and typical management strategies.

Radiation-use efficiency was increased by 15% (compared to that of the past period) in simulations of the future period to represent the effect of increased [CO_2] on stomatal closure (Martin, *et al.* 2011). HG was simulated with a constant set of parameters characterising soil (e.g. soil water-holding capacity (WHC) = 80 mm), species (cocksfoot - *Dactylis glomerata* L., which is a ubiquitous specie over the considered locations) and fertilisation rate enabling 80% of potential growth to calculate variations in HG that are due purely to weather conditions. We chose intermediate harvest frequency (early cut before flowering *followed* by 2 or 3 grazing periods) and grazing intensity (residual sward height of 4 cm) to limit the effect of defoliation management upon herbage growth rate (Parsons, *et al.* 1988). In this way, the model predicted an HG profile for each year, which we used to determine the boundaries and herbage balance of the productivity-defined seasons.

Regression analysis was used to examine whether a trend existed for the past and for the future climates. Regression results with a p-value lower than 10% were considered significant. Comparison of past and future scenarios was performed by analysis of variance (ANOVA). Past and future values were considered different when the p-value of the ANOVA exceeded 1%, with a minimal confidence interval of 90%. Statistical analysis was performed using R software.

Indicator model and sensitivity analysis

The values of exposure indicators are a function of parameters used to predict herbage growth (e.g. soil WHC, site, year, period) and those used to calculate starting dates of seasons from HG (e.g. smoothing factor length, seasonal thresholds). As such, each exposure indicator follows the model:

$$\text{Indicator} = f(\text{Period}, \text{Year}, \text{Site}, \text{Soil}, \text{Smoothing}, \text{Thr}_{\text{Spring}}, \text{Thr}_{\text{Summer+Fall}}, \text{Thr}_{\text{Winter}}) \quad (2)$$

where Thr is the seasonal threshold.

We performed a sensitivity analysis to determine if the choice of the parameters used to calculate starting dates of seasons from HG has greater consequences on exposure indicator values than the environmental condition considered. We estimated the influence of input parameters on exposure indicator values using 100 combinations (Latin hypercube sampling) of soil WHC (40-120 mm), smoothing factor (3-17 days), and spring, summer-fall and winter thresholds. According to the definitions of seasonal thresholds (see supplementary material), spring threshold was varied from 0.75*AAH to 1*AAH, summer-fall threshold was varied from 0.75*AAH to 1*AAH, and winter threshold was varied from 0.25*AAH to 0.5*AAH. For each combination, exposure indicators were calculated for 5 sites for 5 years randomly selected from the past period and for 5 years randomly selected from the future period.

The sensitivity index chosen is the percentage of variance explained (r^2). Total sensitivity index for each parameter were computed according to a multiple polynomial metamodel of degree 3 (Faivre 2013); the results are reported in supplementary material.

3. Results

3.1 Weather data

In the past scenario, mean annual T changed significantly at 4 of the 5 studied locations (from -0.35 to +0.37°C/decade). Despite considerable year-to-year variability (coefficients of variation = 30-300%), effective rainfall (P-PET) significantly decreased at 3 locations, though PET and P did not change significantly (see Table 1 and supplementary material).

In the future scenario, no significant change in variability was observed in the weather variables. Mean annual T, however, significantly increased at all 5 locations (from +0.38 to +0.44°C/decade). P-PET decreased significantly only in Toulouse (-0.15 mm/decade).

Weather differed significantly in past and future scenarios. For all 5 sites, mean annual T was significantly higher in the future (from +1.5°C to +2.4°C) while P and P-PET were significantly lower (P: -178 to -440 mm, P-PET: -0.3 to -1.5 mm/day), except in Millau.

Table 1: Mean and trend of mean annual temperature (T, in °C) and climatic water deficit (P-PET, in mm) for past and future climates at each site.

	T								P-ETP							
	Past			Future			Future - Past		Past			Future			Future - Past	
	mean	trend	sign	mean	trend	sign.		sign.	Mean	trend	sign.	mean	trend	sign.		sign.
Aulus	9.5	↘	*	11.1	↗	***	↗	***	2.336	↗	ns	0.831	↘	ns	↘	***
Gourdon	12.7	↗	**	15.1	↗	***	↗	***	-0.169	↘	.	-0.470	↘	ns	↘	*
Millau	10.9	↗	**	13.4	↗	***	↗	***	-0.761	↘	*	-0.586	↗	ns	↗	ns
St-Girons	12.3	↗	.	14.5	↗	***	↗	***	0.385	↘	ns	-0.345	↘	ns	↘	***
Toulouse	14.0	↗	ns	15.9	↗	***	↗	***	-0.777	↘	.	-1.302	↘	*	↘	***

Levels used to test significance of trend for each period and difference between future and past values:
*** = 0.001, ** = 0.01, * = 0.05, . = 0.1.

3.1. Starting dates and length of productivity-defined seasons

According to the sensitivity analysis (see supplementary material), the metamodel explains at least 86% of the variability of season starting dates. This variability is mainly due to the site and the year considered. Soil water capacity, smoothing factor and the seasonal thresholds have little influence on the season starting dates. Therefore site and year effects are the major determinants of the season starting dates whereas computational parameters are much less influencing them. Consequently, we applied the method with a 10-day smoothing factor, a spring threshold of 0.75*AAH (turnout to pasture), a summer-fall threshold of 0.75*AAH (full-time grazing is impossible) and a winter threshold of 0.5*AAH (no grazing at all).

In the past scenario, the mean spring, summer-fall and winter starting dates among the sites varied from February-March, June-August and October-November, respectively (supplementary material), with a standard deviation (SD) of 10-12, 25-38 and 16-41 days, respectively. We identified a trend for the spring starting date only in Aulus, with a shift towards a later start (by 4.4 days per decade). In the other sites, the variability described above (Figure 9) precluded detection of a significant trend. Similarly, the mean season length was 129-166 days for spring, 121-267 days for summer-fall and 97-139 days for winter. Among sites and seasons, season length had a SD of 21-46 days, which precluded detection of a significant trend. Extreme events were detected (Figure 9) as an early start of summer-fall (72 days before the mean date) and of winter (147 days early) in 2003 in Toulouse, a late spring (42 days later) in 1993 in Gourdon and an early winter (ca. 120 days early) in 1985 in Gourdon, Millau, Saint-Girons, and Toulouse, inducing a short summer (1, 2, 2 and 22 days, respectively). Extremely early winters was due to the absence of fall regrowth for the years considered.

Season starting dates and lengths differed between past and future scenarios (Table 2). In the future scenario, springs occurred significantly earlier at each site and were significantly shorter (except in Millau). Summer-fall occurred significantly earlier (except in Millau) and was significantly longer (except in Toulouse), whereas winters occurred significantly later only in Aulus and were significantly shorter only at Aulus and Saint-Girons.

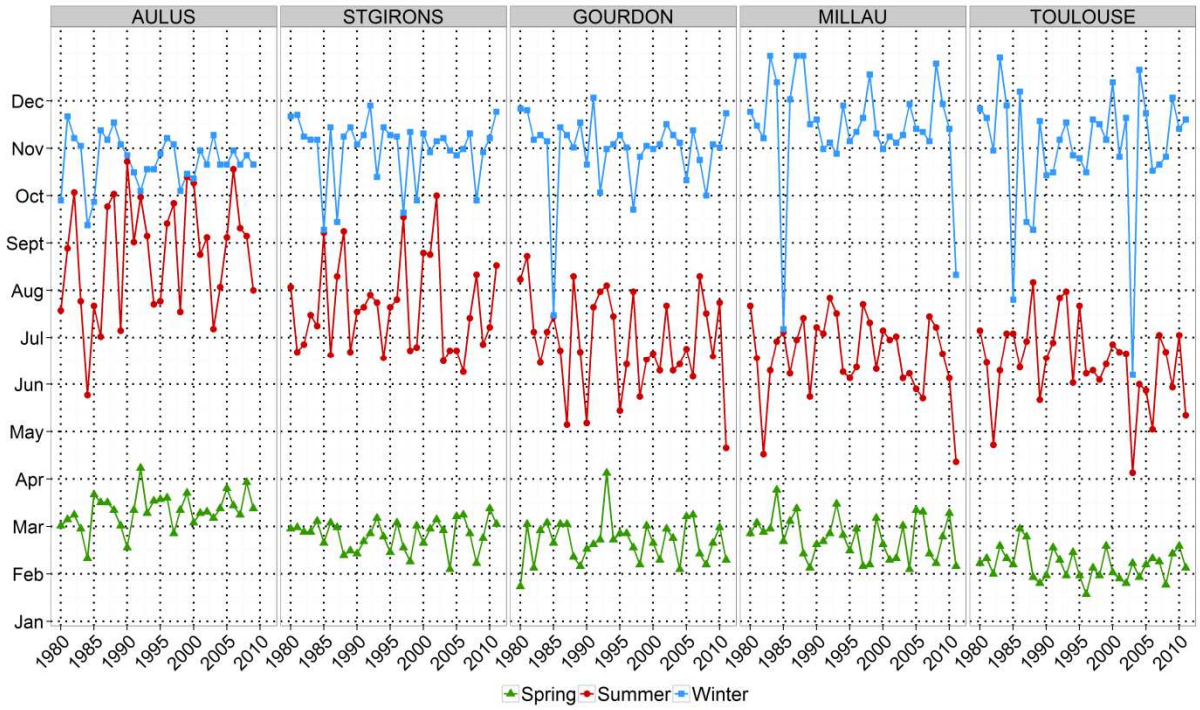


Figure 9: Simulated values of the starting day of spring, summer and winter for the past climate at each site.

Table 2: Difference in days between past and future values of beginning (a) and length (b) of the seasons.

Past vs Future		Spring			Summer-fall			Winter		
		Future-Past	% of the past value	sign.	Future-Past	% of the past value	sign.	Future-Past	% of the past value	sign.
Beginning (j day)	Aulus	-5.7	-8%	*	-37.7	-16%	***	20.9	7%	***
	St-Girons	-4.7	-8%	*	-31.1	-15%	**	9.2	3%	ns
	Millau	-10.0	-18%	**	-16.1	-9%	ns	23.3	7%	ns
	Gourdon	-6.7	-13%	*	-22.6	-13%	**	15.1	5%	ns
	Toulouse	-4.3	-12%	.	-19.3	-12%	**	3.5	1%	ns
Length (day)	Aulus	-32.1	-19%	***	58.6	29%	***	-26.8	-8%	***
	St-Girons	-26.4	-18%	***	40.3	23%	**	-16.3	-5%	**
	Millau	-6.1	-5%	ns	39.5	25%	***	-31.3	-9%	ns
	Gourdon	-16.0	-12%	*	37.8	24%	***	-24.1	-8%	ns
	Toulouse	-15.0	-11%	*	22.8	15%	ns	-12.5	-4%	ns

Levels used for testing the significance of difference between past and future:
*** = 0.001, ** = 0.01, * = 0.05, . = 0.1.

3.2. Herbage balance

The sensitivity analysis (see supplementary material) shows that the metamodel explains at least 95% of the variability of herbage balance and that site effect and year effect are the major determinants of the herbage balance whereas the choices concerning computational parameters have much less influence. In a given year, annual herbage production can be above average even if one season experiences a shortage (Figure 10). For example, in Millau in 2008, annual production had 39 feeding days of surplus (+63 feeding days in spring and +35 feeding days in winter) even though summer-fall herbage balance fell below the mean by 80 feeding days. In contrast, Toulouse in 1997 had a 32-feeding-day shortage at the annual scale despite a summer-fall herbage balance 57 feeding days above the mean.

Seasonal herbage balances can reflect trends within a period and show differences between past and future scenarios even when no trend or difference is detected at the annual scale. In the past scenario at the annual scale, the only significant trend was detected in Aulus, with a decrease in

annual production (supplementary material). In contrast, at a seasonal scale, herbage balance significantly decreased in summer-fall in Aulus and Millau and in winter in Aulus. In the other cases, high variability precluded identification of significant trends (supplementary material and Figure 10). In the future scenario, annual production differed from that in the past scenario, but only significantly so in Saint-Girons, with 20% fewer feeding days. Considering the seasonal scale (Table 3), summer-fall herbage balance was significantly lower (except in Aulus) and winter herbage balance was significantly higher at two sites in the future scenario. The difference between past- and future-scenario of spring herbage balance was significant only in Millau. Examining changes in differences between seasonal herbage balances in the same year is also useful (supplementary material). Compared to the past scenario, the future scenario had significantly greater difference between spring and summer-fall balances at two sites, significantly less difference between summer-fall and winter balances (except for Toulouse) and significantly less difference between spring and winter balances at three sites.

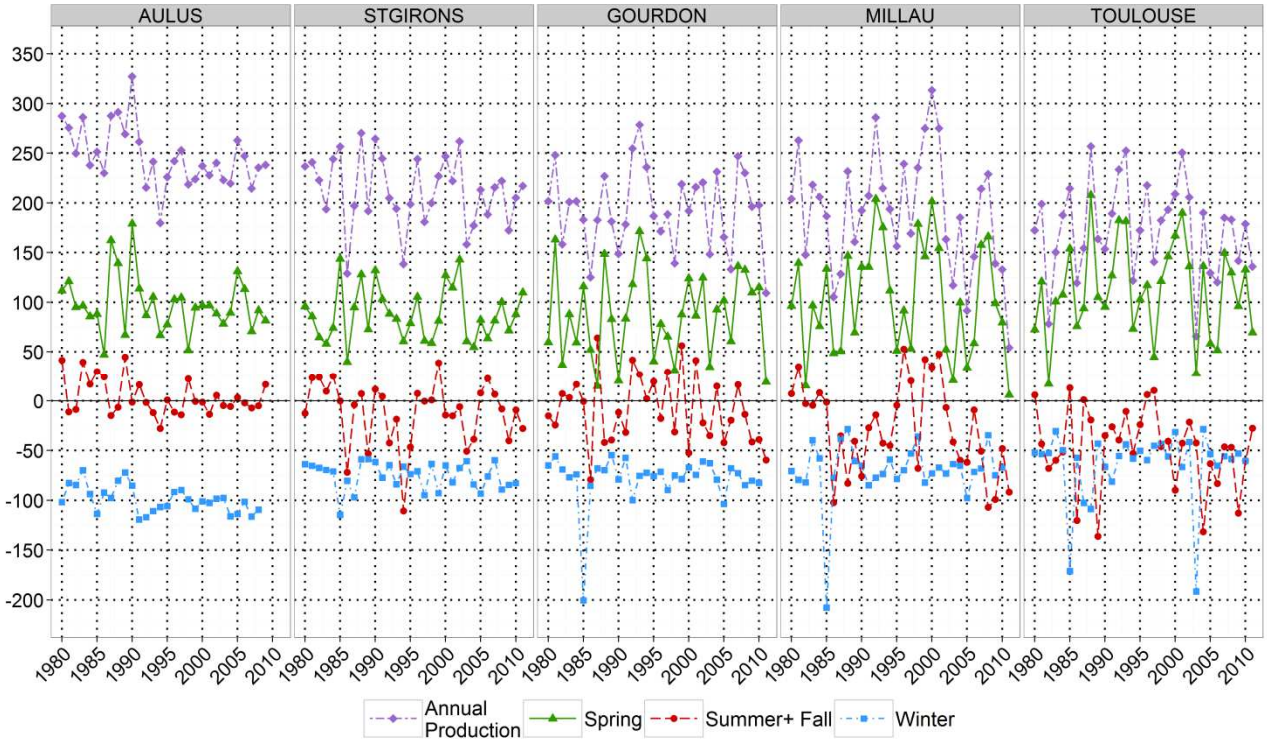


Figure 10: Values of exposure indicators at annual (annual production) and seasonal scale (spring surplus, summer-fall surplus or shortage and winter shortage) for past climate, expressed in feeding-days.

Table 3: Past/future difference (in feeding days) with respect to seasonal herbage balance and annual production.

	Spring				Summer-fall				Winter				Annual Prod.		
	Future - Past	% of the past value	% of the past annual prod.	sign.	Future - Past	% of the past value	% of the past annual prod.	sign.	Future - Past	% of the past value	% of the past annual prod.	sign.	Future - Past	% of the past annual prod.	sign.
Aulus	0	0%	0%	ns	-1	-29%	0%	ns	21	-21%	9%	***	4	2%	ns
St-Girons	-14	-15%	-6%	ns	-39	326%	-18%	***	12	-16%	6%	***	-42	-20%	***
Millau	37	36%	20%	**	-25	91%	-13%	.	29	-41%	15%	ns	24	13%	ns
Gourdon	7	8%	4%	ns	-25	288%	-13%	*	23	-30%	12%	ns	-9	-5%	ns
Toulouse	-10	-9%	-6%	ns	-29	61%	-17%	*	3	-5%	2%	ns	-10	-6%	ns

Levels used for testing the significance of difference between past and future:
*** = 0.001, ** = 0.01, * = 0.05, . = 0.1.

4. Discussion

4.1. New insights provided by the exposure indicators

In comparison to approaches based on climatic variables our exposure indicators provides additional insights into possible impacts of climate change on grassland-based livestock systems. The methodological progresses made with these indicators enabled to study climate-induced changes at the seasonal scale.

Model-based exposure indicators performed better than raw meteorological data for detecting whether any climate-induced changes have occurred. Changes at annual scale of temperature and water deficit do not necessarily impact annual herbage balance. At seasonal scale, past changes of weather did not impact seasonal herbage balance. A plausible explanation is that climate trends might offset one another (e.g. George et al. 2001). For example, in Gourdon the beneficial increase in T (growth rate increases with T from 0-18°C) might have offset the detrimental decrease in P and P-PET. Another possibility is that the physical changes observed might not have influenced the factors involved in grass growth limitation. For example, a change in T without water shortage (e.g. in Aulus, where annual P reaches 1600 mm) would change annual production, whereas a change in T with water shortage (e.g. in Saint-Girons, where annual P reaches 950 mm) would not.

Comparing past and future climate time series, we found that exposure indicators can reveal significant changes at the seasonal scale even if no changes in annual herbage production occur. The model used did not predict significant changes in annual herbage production. This finding could be explained by the time horizon chosen (2035-2065), which may correspond to a transitional phase between a period of neutral or positive effects and a period of negative effects of climate change on herbage production at the annual scale. A previous study of 32 sites in France anticipated higher yields by 2020 (except at 6 sites in south-eastern France) under the hypothesis of higher temperatures, small (no significant) decrease in rainfall and a beneficial effect of [CO2] increase. However, this study envisioned lower yields by 2070 for the “high” IPCC emission-scenario (i.e. scenario A2) due essentially to water shortage (Ruget, *et al.* 2010), which counteracts the positive effects of elevated [CO2] on annual grassland production (Graux, *et al.* 2013).

According to the future scenario, climate change led to changes in seasonal boundaries, herbage production and production gaps between seasons but did not greatly impact annual herbage production. Like studies of climate-change effects on the growing season (Linderholm 2006; Rivington, *et al.* 2013), we have shown that the growing season will tend to occur earlier and last longer, with an earlier and shorter spring associated with a longer summer. Concerning seasonal herbage production, even though modelling studies have been performed on seasonal grass production and use (e.g. Berentsen et al. 2000), we are not aware of publications about the potential impact of climate change on herbage production at the seasonal scale. Our results highlighted shifts in production between productivity-defined seasons, which is of primary importance in the management of grassland-based systems, as detailed further.

Even though the direction of changes is not homogeneous among areas, spatial variability of climate change should be considered to direct adaptation efforts to areas with the greatest exposure to climate change, from continental to regional scales (Smit and Wandel 2006). By comparing sites at different altitudes or biogeographic regions, farmers can exploit a design-by-analogy approach that considers that the future weather of a site is likely to be similar to that experienced at a different site

in the past (e.g. Saint Girons will experience conditions similar to those of Toulouse in the past). Because our indicators come from basic meteorological data, they can be calculated regardless of scale and can help develop comparable vulnerability assessments (Polsky, *et al.* 2007) of grassland-based livestock systems.

4.2. Critical analysis

Our exposure indicators consider a reference system with balanced herbage production and feed requirements over many years, allowing estimation of the average amount of feed required per day (i.e. AAH); this pivotal reference point for grassland management is used to define the boundaries of productivity-defined seasons. The indicators of this approach have three original qualities:

- First, calculation of AAH directly links climatic exposure to a system's grazing potential, which can be interpreted as feeding and grassland-management constraints. Due to the link to both the timing (beginning and length of productivity-defined seasons) and quantity of herbage production, the exposure indicators are more useful to farm managers than indicators based on temperature thresholds (e.g. growing season length, Rivington et al. 2013) or the net amount of herbage produced per fixed-date seasons (e.g. Graux et al., 2013).
- Second, the indicators enable comparison of climatic exposure of grassland-based systems in different areas. AAH considers local carrying capacity, helps determine season boundaries, and enables switching from a quantity-oriented to a management-oriented perspective (available feeding days based on herd feed requirements). Herbage balance is expressed in an area-independent unit (feeding days) which allows comparison of location-specific climatic exposure. Expressing the starting dates of seasons as the day-of-year also eases comparison.
- Third, the effect of climate on herbage production is assessed at the seasonal level as well as the annual level, which fits better with the temporal resolution at which farmers think about their systems (Girard, *et al.* 2001). Existing indices, constructed at an annual scale or for seasons of fixed length, are not suitable in this respect. With the indicators, farmers can foresee potential management problems induced by climate change (e.g. intensive work periods, riskier harvests, potential infrastructure problems).

Indicator values depend on choices made during the modelling process. Parameters for factors such as soil properties, plant species and management practices have strong influence on model predictions. As mentioned, these parameters were fixed to focus on the effect of climate change on grassland growth. In particular, the same parameter values had to be used to be able to compare past and future weather patterns, which precluded, for instance, the consideration of some species that are expected to be better adapted to future climate (e.g. C4 species, summer dormant species). The growth model assumes a relatively high influence of future [CO_2] increases on plant growth (Martin, *et al.* 2011), an assumption maintained when simulating the future scenario. Herbage production predicted in the future scenario was therefore likely an upper bound; consequently, the differences in herbage productivity between past and future scenarios are likely to be greater than those predicted in this study. A more complex model incorporating recent results of the [CO_2] effect (e.g. Kersebaum *et al*. 2009) could be incorporated into the method and used to predict effects of different hypotheses about increasing [CO_2].

In contrast, the indicators help study exposure to climate variability and change regardless of the values of computational parameters chosen (e.g. smoothing factor, seasonal thresholds). The

sensitivity analysis showed that indicators based on the chosen growth model responded as expected to climatic drivers and were not too sensitive to the computational parameters used to define seasonal boundaries.

The values of exposure indicators under the future climate also depend on the socio-economic scenario, the climate model and, possibly, the downscaling method used. For example, we chose the IPCC A1B SRES scenario (Nakicenovic, *et al.* 2000) for the years 2035-2065, which has no large differences in climate compared to other IPCC scenarios (Graux, *et al.* 2013). This is not the case for periods further in the future; climate scenarios differ greatly in the second half of the 21st century. We believe, however, that the exposure assessment must be kept simple to make it usable in participative-design workshops that do not involve modellers (Duru, *et al.* 2012).

4.3. Concluding remarks

Being based on the boundaries and herbage balance of productivity-defined seasons, the information provided by the exposure indicators is in a format relevant to stakeholders for evaluating harmful or beneficial consequences exclusively of climatic influence (Duru, *et al.* 2012).

They can support contextual presentation of the climatic exposure of grassland-based livestock systems. Intended to be used in participatory workshops, the presentation of climatic exposure provides participants with a general idea of a system's vulnerability and potential changes. The indicators refer to concrete management-related aspects of these systems and, as such, offer a practical view of ways that the concept of exposure can help identify adaptations that reduce vulnerability (e.g. Duru et al., 2012). Including the biophysical processes that influence plant growth increases the relevance of the indicators for intended users.

Finally the indicators can also expand the material that can be used to study and communicate about climate change and variability in grassland-based livestock systems. They make it possible, in particular, to characterise types of climatic years and their variation of frequencies due to climate change from past to expected future. In addition, the change of occurrence and succession of extreme seasons can also be examined.

Future work will involve estimating the sensitivity to climate change of systems with different management practices, refining an iterative design process that uses these indicators and developing adaptation options that can be tuned and combined to yield more flexible and less vulnerable livestock systems.

5. References

Adger W.N. 2006. Vulnerability. *Global Environmental Change*, **16**(3), 268–281, doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006.

Berentsen P.B.M., Giesen G.W.J. and Renkema J.A. 2000. Introduction of seasonal and spatial specification to grass production and grassland use in a dairy farm model. *Grass and Forage Science*, **55**, 125–137.

Déqué M., Dreventon C., Braun A. and Cariolle D. 1994. The ARPEGE/IFS atmosphere model : a contribution to the French community climate modelling. *Climate Dynamics*, **10**, 249–266, doi:10.1007/BF00208992.

Duru M., Adam M., Cruz P., Martin G., Ansquer P., Ducourtieux C., Jouany C., Theau J.P. and Viegas J. 2009. Modelling above-ground herbage mass for a wide range of grassland community types. *Ecological Modelling*, **220**(2), 209–225, doi:10.1016/j.ecolmodel.2008.09.015.

Duru M., Cruz P. and Theau J.-P. 2010. A simplified method for characterising agronomic services provided by species-rich grasslands. *Crop and Pasture Science*, **61**(5), 420–433, doi:10.1071/CP09296.

Duru M., Felten B., Theau J.P. and Martin G. 2012. A modelling and participatory approach for enhancing learning about adaptation of grassland-based livestock systems to climate change. *Regional Environmental Change*, **12**(4), 739–750, doi:10.1007/s10113-012-0288-3.

Faivre R. 2013. Exploration par construction de métamodèles. *In* Faivre, R., Iooss, B., Mahévas, S., Makowski, D. & Monod H, *eds. Analyse de sensibilité et exploration de modèles. Applications aux modèles environnementaux*. Quae, pp. 159–194.

Fraser E.D.G., Dougill A.J., Hubacek K., Quinn C.H., Sendzimir J. and Termansen M. 2011. Assessing Vulnerability to Climate Change in Dryland Livelihood Systems: Conceptual Challenges and Interdisciplinary Solutions. *Ecology and Society*, **16**(3), doi:10.5751/ES-03402-160303.

Füssel H.-M. 2007. Adaptation planning for climate change: concepts, assessment approaches, and key lessons. *Sustainability Science*, **2**(2), 265–275, doi:10.1007/s11625-007-0032-y.

George M., Bartolome J., McDougald N., Connor M., Vaughn C. and Markegard G. 2001. Annual Range Forage Production. *Rangeland Management Series*, **8018**, 1–9.

Girard N., Bellon S., Hubert B., Lardon S., Moulin C.-H. and Osty P.-L. 2001. Categorising combinations of farmers' land use practices: an approach based on examples of sheep farms in the south of France. *Agronomie*, **21**(5), 435–459, doi:10.1051/agro:2001136.

Graux A.-I., Bellocchi G., Lardy R. and Soussana J.-F. 2013. Ensemble modelling of climate change risks and opportunities for managed grasslands in France. *Agricultural and Forest Meteorology*, **170**, 114–131, doi:10.1016/j.agrformet.2012.06.010.

Gray D.I., Kemp P.D., Kenyon P.R., Morris S.T., Brookes I.M., Matthew C. and Osborne M. 2008. Strategies used to manage climatic risk: Lessons from farmers with expertise in dryland farming. *In Proceedings of the New Zealand Grassland Association 70*. pp. 59–68.

IPCC. 2007. Appendix I: Glossary. *In* Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., Linden, P.J. van der & Hanson, C.E., *eds. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press: Cambridge, UK, p. 976.

Kersebaum K.C., Nendel C., Mirschel W., Manderscheid R., Weigel H.-J. and Wenkel K.-O. 2009. Testing different CO2 response algorithms against a face crop rotation experiment and application for climate change impact assessment at different sites in Germany. *Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, **113**, 79–88.

Linderholm H.W. 2006. Growing season changes in the last century. *Agricultural and Forest Meteorology*, **137**(1-2), 1–14, doi:10.1016/j.agrformet.2006.03.006.

Ma W., Liu Z., Wang Z., Wang W., Liang C., Tang Y., He J.-S. and Fang J. 2010. Climate change alters interannual variation of grassland aboveground productivity: evidence from a 22-year measurement series in the Inner Mongolian grassland. *Journal of Plant Research*, **123**(4), 509–517, doi:10.1007/s10265-009-0302-0.

Martin G., Felten B. and Duru M. 2011. Forage rummy: A game to support the participatory design of adapted livestock systems. *Environmental Modelling & Software*, **26**(12), 1442–1453, doi:10.1016/j.envsoft.2011.08.013.

McCrum G., Blackstock K., Matthews K., Rivington M., Miller D. and Buchan K. 2009. Adapting to climate change in land management: the role of deliberative workshops in enhancing social learning. *Environmental Policy and Governance*, **19**(6), 413–426, doi:10.1002/eet.525.

McKeon G.M., Stone G.S., Syktus J.I., Carter J.O., Flood N.R., Ahrens D.G., Bruget D.N., Chilcott C.R., Cobon D.H., Cowley R.A., Crimp S.J., Fraser G.W., Howden S.M., Johnston P.W., Ryan J.G., Stokes C.J. and Day K.A. 2009. Climate change impacts on northern Australian rangeland livestock carrying capacity: a review of issues. *The Rangeland Journal*, **31**, 1–29, doi:10.1071/RJ08068.

Metzger M.J., Bunce R.G.H., Jongman R.H.G., Mücher C.A. and Watkins J.W. 2005. A climatic stratification of the environment of Europe. *Global Ecology and Biogeography*, **14**, 549–563, doi:10.1111/j.1466-822x.2005.00190.x.

Nakicenovic N., Alcamo J., Davis G., de Vries B., Fenhann J., Gaffin S., Gregory K., Grubler A., Jung T.Y., Kram T., Emilio la overe E., Michaelis L., Mori S., Morita T., Pepper W., Pitcher H., Price L., Riahi K., Roehrl A., Rogner H.H., Sankovski A., Schlesinger M., Shukla P., Smith S., Swart R., van Rooyen S., Victor N. and Dadi Z. 2000. Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. SUMMARY FOR POLICYMAKERS. p. 12.

Pagé C., Terray L. and Boé J. 2008. *Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle: les scénarii SCRATCH08*. Toulouse. p. 21.

Parsons A.J., Johnson I.R. and Harvey A. 1988. Use of a model to optimize the interaction between frequency and severity of intermittent defoliation and to provide a fundamental comparison of the continuous and intermittent defoliation of grass. *Grass and Forage Science*, **43**(1), 49–59, doi:1111/j.1365-2494.1988.tb02140.x.

Polsky C., Neff R. and Yarnal B. 2007. Building comparable global change vulnerability assessments: The vulnerability scoping diagram. *Global Environmental Change*, **17**(3-4), 472–485, doi:10.1016/j.gloenvcha.2007.01.005.

Rivington M., Matthews K.B., Buchan K., Miller D.G., Bellocchi G. and Russell G. 2013. Climate change impacts and adaptation scope for agriculture indicated by agro-meteorological metrics. *Agricultural Systems*, **114**, 15–31, doi:10.1016/j.agsy.2012.08.003.

Ruget F., Moreau J., Ferrand M., Poisson S., Gate P., Lacroix B., Lorgeou J., Cloppet E. and Souverain F. 2010. Describing the possible climate changes in France and some examples of their effects on main crops used in livestock systems. *Advances in Science and Research*, **4**(2007), 99–104, doi:10.5194/asr-4-99-2010.

Schneider S., Sarukhan J., Adejuwon J., Azar C., Baethgen W., Hope C., Moss R., Leary N., Richels R. and Ypersele J.-P. van. 2001. Overview of impacts, adaptation, and vulnerability to climate change. *In* McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J. & White, K.S., *eds. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press: Cambridge, UK, pp. 77–103.

Smit B. and Wandel J. 2006. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change*, **16**(3), 282–292, doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.03.008.

Chapitre 4 - Caractérisation de l'exposition des systèmes d'élevage herbagers au changement et à la variabilité climatiques

Use of productivity-defined indicators to assess exposure of grassland-based livestock systems to climate change and variability*

Abstract:

Climate change research that aims to accelerate the adaptation process of agricultural production systems first requires understanding their climatic vulnerability, which is in part characterised by their exposure. This paper's approach moves beyond traditional metrics of climate variables and proposes specific indicators for grassland-based livestock systems. They focus on the variation in seasonal boundaries and seasonal and yearly herbage productivity in response to weather conditions. The paper shows how statistical interpretations of these indicators over several sites and climatic years (past and future) enable the characterisation of classes of climatic years and seasons as well as their frequencies of occurrence and their variation from the past to the expected future. The frequency of occurrence and succession of seasonal extremes is also examined by analysing the difference between observed or predicted seasonal productivity and past mean productivity. The data analysis and corresponding statistical graphics used in our approach can help farmers, advisers and scientists envision site-specific impacts of climate change on herbage production patterns. An illustrative analysis is performed on three sites in south-western France using a series of climatic years covering two 30-year periods in the past and the future. We found that the herbage production of several clusters of climatic years can be identified as "normal" (i.e. frequent) and that the most frequent clusters in the past become less common in the future, though some clusters remain common. In addition, the year-to-year variability and the contrast between spring and summer-fall herbage production are expected to increase.

Key words: *herbage balance, rainfall, temperature, abnormal weather pattern*

1. Introduction

Climate is a primary determinant of agricultural productivity. In particular, livestock systems that rely on pasture resources are increasingly exposed to threats from increased climatic variability and, in the long run, to climate change (Graux, *et al.* 2013). Abnormal changes in air temperature and rainfall and resulting increases in frequency and intensity of drought events have long-term implications for the viability of these production systems. Designing new systems adapted to new climatic contexts is therefore necessary. Addressing this issue first requires a better understanding of such systems' exposure to climate change at particular locations and periods in the future. Exposure to climate is an external dimension of a system's vulnerability and usually refers to the duration, extent and frequency of weather perturbations that impact it (Adger 2006). Classically, exposure is assessed by analysing temporal patterns of raw physical variables (e.g. temperature, precipitation, evapotranspiration) (Fraser, *et al.* 2011; McCrum, *et al.* 2009). To contribute to farmer-centred redesign of production systems, the notion of exposure must be re-engineered in a way that corresponds to farmers' mental models and facilitates connecting scientific knowledge with action

* This chapter is published and can be cited as: Sautier M., Martin-Clouaire R. and Duru M. 2013. Use of productivity-defined indicators to assess exposure of grassland-based livestock systems to climate change and variability. Crop and Pasture Science, **64**, 641–651, doi:http://dx.doi.org/10.1071/CP13076.

(Meinke, *et al.* 2009). In contrast to climatologists who emphasise the physical and natural science dimension, farmers make sense of climate change primarily through their perception of potential risks encountered in their production systems (Hulme, *et al.* 2009). Through their experiences and memories, they can build implicit categories of "normal" or "abnormal" climatic patterns and events. However, retaining and recalling past weather is often biased towards extremes or exceptional episodes, such as the 2003 drought in Europe (Ciais, *et al.* 2005).

Livestock farms, especially those which are essentially grassland-based, are highly vulnerable to climatic trends and variability because feedstuffs are mainly provided by grasslands through cutting and grazing (Hopkins and Del Prado 2007). These systems, due to soil and climate induced constraints, are unable to grow annual crops (especially irrigated), dual-purpose crops (e.g. maize for grain or silage) or intercrops to cope with climate variability. They also cannot rapidly change plant genotypes when their grassland system is based on permanent pastures. In temperate regions, the impact of climatic trends and variability on livestock farms can be assessed through two main features relating weather to feeding management: (i) the dates and periods when grazing is sufficient to feed the herd and surplus herbage yield transformed into hay or silage (ii) and when there is a herbage shortage for grazing and feedstuffs should be supplied as hay or silage (Girard, *et al.* 2001). Accordingly, exposure indicators should be determined according to herbage production at a seasonal scale, although most approaches in applied research use annual production as the primary indicator. When season-scale approaches are considered, unrealistic assumptions are often made, such as fixed calendar-based definitions of seasons (e.g. Graux, *et al.* 2013); these approaches also refer to and use ad-hoc expertise that is difficult to generalise (Chapman, *et al.* 2008). Furthermore, exposure assessments should consider inter-annual variability (Chapman, *et al.* 2008) and alternation of favourable and unfavourable weather episodes because feeding system exposure depends less on the occurrence of a single unfavourable event than on a succession of two or more (Charpenteau and Duru 1983; Gibbons and Ramsden 2008).

The essence of farm management deals with change and uncertainty, in both the short and long term. Technical activities (day-to-day actions) are driven by management strategies that coherently organise activities over time as a function of farm resources and production objectives. These strategies incorporate flexibility to deal with weather variability, enabling them to cope with perturbations that are within the bounds of typical variability (Sebillotte and Soler 1990; Vanclay 2004). With larger deviations (e.g. the 2003 drought) the usual flexibility is no longer sufficient, which can prompt farmers to consider a far-reaching farming system redesign.

Regarding future climate, most farmers in France consider high annual weather variability a greater problem than long-term climate change (Duru, *et al.* 2012). Similar observations have occurred in other countries (e.g. Australia; Pannell 2010), where extreme events are more intense and frequent than in temperate regions such as the one considered in this paper. Farmers have almost no benchmarks for future climate conditions; at most they have heard about global-change scenarios with little regional contextualisation (Zhang, *et al.* 2007). Thus, they need site-specific projections of the weather and its impacts on production. Model-based agronomic knowledge can help to assess the potential consequences of new climatic conditions, which is a first step toward designing adapted systems. For this purpose, we previously proposed (Sautier, *et al.* 2013) six model-based exposure indicators that outline key distinguishing features of the *behaviour* of a grassland-based livestock system under a given climatic scenario. Briefly, these indicators characterise a climatic year, also called a "forage year", as three productivity-defined seasons. For each season, the

herbage shortage or surplus at grazing is assessed with respect to the herd's feeding demand. Identifying the boundaries of these weather-dependent seasons and calculating seasonal surplus or shortage contribute directly to characterising climatic exposure as a function of the duration and extent of the impact (Sautier, *et al.* 2013). The frequency dimension involved in defining exposure requires consideration of a set of climatic years and the performance of statistical analyses of the values of each indicator each year. This paper presents two frequency-focused analyses of the exposure of grassland-based livestock systems using the seasonal-scale indicators mentioned above. The first analysis identifies clusters of climatic years in past and future datasets according to forage productivity and the timing of production and compares the resulting cluster frequencies between past and future. The second analysis examines the frequency of extreme values of seasonal balances. It highlights a change in the frequency of anomalies, whose amplitudes are reported as multiples of standard deviations (σ) from the mean of past years' seasonal balances.

2. Material and methods

2.1. Exposure indicators

We followed the method described in a previous article (Sautier, *et al.* 2013) to calculate six exposure indicators specific to grassland-based livestock systems: the dates of the beginning of spring, summer-fall and winter (resp. B_{sp}, B_{sf} and B_w) and the balance between herbage availability and herd feed requirements for each season (resp. Bal_{sp}, Bal_{sf} and Bal_w).

Each exposure indicator is calculated from the "average available herbage" (AAH), defined as the mean daily herbage growth (HG) over n years as follows

$$AAH = \left(\sum_{year=1}^{n} \sum_{jdoy=1}^{length(year)} HG_{jdoy}^{year} \right) / \sum_{year=1}^{n} length(year)$$

with n the number of years of the whole period, length (year) the number of days in the year considered, and jdoy the day-of-year number.

Calculated for a given period and location, AAH represents daily mean herbage availability. In a balanced system, AAH is the daily feed required by the herd per area unit (g/m²/day). Daily HG can be predicted by any simulation model that considers grassland characteristics and defoliation practises due to grazing and cutting operations. As explained in Sautier, *et al.* (2013), we used the herbage growth model developed by Duru, *et al.* (2009) to calculate daily HG. Herbage growth was simulated with a constant set of parameters characterising soil (e.g. soil water-holding capacity = 80 mm), species (cocksfoot - Dactylis glomerata L.) and fertilisation rate enabling 80% of potential growth to calculate variations in herbage growth that are due purely to weather conditions. We chose intermediate harvest frequency (early cut before flowering followed by 2 or 3 grazing periods) and grazing intensity (residual sward height of 4 cm) to limit the effect of defoliation management upon herbage growth rate.

A year is divided into three productivity-defined seasons – spring, summer-fall and winter (Figure 8, p93) – defined from AAH. The beginning of spring (Bsp) is the theoretical beginning of grazing. Summer and fall are aggregated into the compound summer-fall season because year-to-year variability of herbage growth in fall prevented identification of a fall starting date. The beginning of summer-fall (Bsf) is the first day after the spring peak when full-time grazing is impossible. Winter begins (Bw) when grazing stops and ends when the next spring begins. Practically, during a phase of

accelerating herbage growth (e.g. between winter and spring), spring grazing can begin once sufficient herbage has accumulated. In this case, grazing begins before herbage growth equals AAH, which means that the spring threshold of herbage growth could be set to any value less than AAH. In the same way, during a phase of decelerating herbage growth (e.g. between spring and summer or fall and winter), grazing can be extended beyond the date at which daily herbage growth equals AAH to graze the herbage accumulated during the latest surplus period, which means that the summer-fall and winter thresholds of herbage growth could be set to any value less than AAH. As explained in Sautier, *et al.* (2013), we smoothed daily herbage-growth values over 10-day windows and applied the method with a spring threshold of 0.75×AAH, a summer-fall threshold of 0.75×AAH and a winter threshold of 0.5×AAH.

The balance between herbage availability and herd feed requirements (Balsea, in g/m2) is defined as the sum of the difference between HG and AAH over the entire season. Balsea can be positive (i.e. surplus that can be cut for hay or silage) or negative (i.e. shortage that requires feeding the herd with hay or silage) and can be converted into feeding days. One feeding day represents the amount of herbage needed per area unit to feed the herd for one day, which equals AAH in a balanced system.

2.2. Clustering years and characterising abnormality and frequency of seasons

Climatic-year clustering according to the exposure indicators

Variability in seasonal conditions for herbage growth is often analysed empirically by grouping seasons with roughly similar profiles (e.g. early vs. late start of growth, short vs. long summer period, high vs. low annual production) (Chapman, *et al.* 2008). We retained the idea of dividing climatic years into classes (clusters) with similar natures, which is useful for understanding and summarising large datasets. Clusters were defined by agglomerative hierarchical clustering (AHC) of the exposure indicators using Ward's criterion.

We built eight clusters of climatic years by performing AHC of their seasonal characteristics (season beginning and herbage balance) for the 60-year dataset presented below (30 years each in the past and future, see "Case Study" section). To facilitate visual comparison, clusters were ranked by letter according to decreasing annual herbage production (i.e. cluster "A" the highest and cluster "H" the lowest). ANOVAs and multiple-range tests were performed to determine which indicators were most discriminating between the clusters. Then, for each site, the relative frequency of each cluster (the number of years in the cluster divided by the sample size) was calculated for the past and future periods. Cumulative distributions of the relative frequency of clusters, put in order of decreasing relative frequency, were used to visualise differences between past and future and identify the smallest set of clusters that covered at least 80% of the years. These years were considered "normal" years. All statistical analyses were performed using Statgraphics (StatPoint Technologies, Warrenton, VA, USA).

Standard-deviation classification

A second kind of statistical analysis was performed to highlight the years with extreme values of seasonal herbage balance and to study the change in their frequencies from past to future. Several studies consider the standard deviation of a dataset as the typical magnitude of variations and its multiples (up to 3) as anomalies (Anwar, *et al.* 2012; Hansen, *et al.* 2012;). In this manner, Niu, *et al.* (2009) classified climate data using long-term means and standard deviations.

The mean and standard deviation of each indicator over the 30 years of the past scenario were used to classify the indicator's annual value in both past and future scenarios. The deviation of the

indicator's annual value from its past mean was divided by its past standard deviation to determine its class. Seven classes were defined from σ-based intervals:]-∞, -3σ],]-3σ, -2σ],]-2σ, -σ],]-σ, σ[, [σ, 2σ[, [2σ, 3σ[, and [3σ, +∞[. The further the interval from 0, the more abnormal the season compared to its usual variability in the past.

2.3. Case study

The approach was applied in a research project aimed at assessing the climatic vulnerability of grasslands and livestock-farming systems in mainland France. Typically, when dealing with short-term adaptations, farmers and advisors tend to discuss small changes in farm structure and management. The 2050 time horizon was chosen because considering long-term adaptations encourages stakeholders to propose more substantial changes. We used 1980-2010 weather data (precipitation, potential evapotranspiration, solar radiation and mean temperature) for the past and scenarios of climate patterns generated for 2035-2065. For these future scenarios we used climate simulations of the IPCC A1B SRES scenario (Nakicenovic, *et al.* 2000). Climate simulations were provided by Météo France via the ARPEGE-Climat model (Déqué, *et al.* 1994) and were statistically downscaled by the CERFACS using the Boé08 method (Pagé, *et al.* 2008) to generate the weather series at local scale (8 x 8 km).

The southern Midi-Pyrenees (France) was chosen as a case-study region to develop and discuss climate-change adaptation options in livestock-farming systems. Three locations were selected (Table 4):

- Aulus, located in the Pyrenees Mountains. Farms are beef-cattle production systems based on semi-natural grasslands practising long-distance transhumance for summer pasturing.
- Saint Girons, located in the Pyrenean foothills. Farms are beef- and dairy-cattle production systems based on grasslands (e.g. grass-legume mixtures) for beef-cattle farms and forage crops (e.g. silage maize) for dairy farms.
- Toulouse, located in the Garonne River valley, was used as a reference to compare its current climate to the future climate of Saint Girons and Aulus. Currently, the agriculture of this zone is essentially oriented toward cash crops, with a small amount of livestock production.

Table 4. Locations and De Martonne aridity indices (P/(T+10) (P= annual precipitation, T= mean annual temperature)) of the three study sites for the period 1980-2010 and the year 2003.

Site	altitude	latitude	longitude	Envrionmental zones†	Aridity index for past (mm/°C); (2003)
Aulus	733m	42° 47N	1° 20^{E}	Mediterranean mountains	82 (80)
St Girons	414m	44° 49N	1° 23^{E}	Mediterranean North	43 (37)
Toulouse	150m	43° 36N	1° 26^{E}	Lusitanian (oceanic)/ Mediterranean North	27 (21)

† after Metzger *et al.* 2005

The past climate of the three locations can roughly be compared with the de Martonne aridity index (Table 4), defined as P/(T+10), where P is annual precipitation (mm) and T mean annual temperature (°C). Due to hot and dry summer, Toulouse has the lowest index. Aulus has the highest index thanks to its mountainous location.Toulouse is the most arid.

3. Results

3.1. Inter-annual variability of seasonal indicators for past and future periods

A visual examination of the indicators for past and future periods for each site reveals that some features are common to the three locations (Figure 11a, b, c):

- beginning dates and herbage balances in winter were significantly correlated, meaning that either variable can be used for further analysis;
- the variability in beginning date was lower for spring than for summer-fall and winter, and the variability in herbage balance was higher for spring than for other seasons;
- compared to the past scenario, the future scenario had an earlier summer and later winter, and to a lesser extent, earlier spring and lower herbage surplus (or greater shortage) in summer.
- Comparing sites (Figure 11), we noticed (i) a small shortage of herbage in summer in Aulus but a large one in Toulouse, (ii) the difference in herbage balance between spring and summer was the lowest in Aulus and the highest in Toulouse, and (iii) the difference in herbage balance between spring and winter was the lowest in Toulouse and the highest in Aulus.

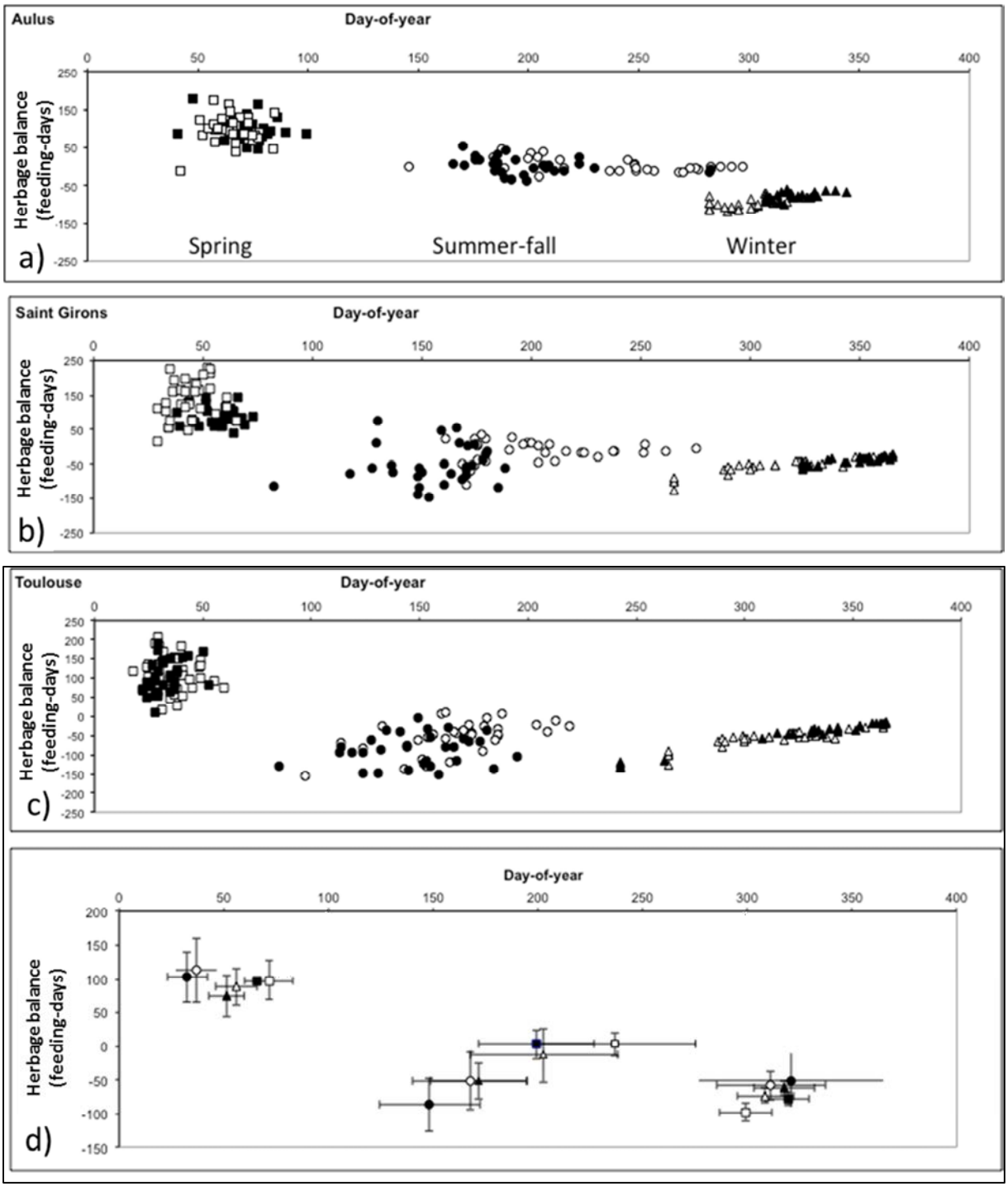


Figure 11: Scatter plot of exposure indicators at the seasonal level (spring, summer-fall, winter) for the past (1980-2010, unfilled symbols) and future (2035-2065, filled symbols).
2a, b, c: Herbage balance (y-axis in feeding days) and beginning date of season (x-axis in day-of-year) in Aulus, Saint Girons and Toulouse. Each symbol corresponds to one season in a given year (□ = spring, ○ = summer-fall, Δ = winter).
2d: summary of 2a, 2b and 2c. Means and standard deviations of beginning date of season (x-axis) and seasonal herbage balance (y-axis) for past (1980-2010, unfilled symbols) and future (2035-2065, filled symbols) climates for Aulus (□), Saint Girons (Δ) and Toulouse (○). Seasonal herbage balance equals herbage production minus the amount of herbage needed to feed animals.

3.2. Clustering of forage climatic years according to seasonal indicators

As the above analysis showed that the beginning of spring had low variability and the winter start date and herbage balance were correlated, the indicators “beginning of spring” and “beginning of winter” were excluded from the clustering. Thus, the AHC was performed on the basis of four indicators: the seasonal herbage balance for each season (Bals, Balsf and Balw) and the beginning of summer-fall (Bsf).

The clustering resulted in distinct classes of forage years. The ANOVA of clusters per site based on the four exposure indicators shows that three clusters (out of eight) for each site significantly ($P<0.05$) differed from each other (Table 5) for at least three of the indicators. When considering only three of the four indicators, the number of distinct clusters grew from three to four (data not shown). The multiple-range test for the four indicators indicates that, depending on the site and the indicator considered, two to five clusters (out of eight) significantly ($P<0.05$) differed from each other (Table 5).

Table 5. Number of significantly ($P<0.05$) different clusters (out of 8) per indicator and identity of those significantly different for at least 3 of the indicators.

	Beginning of summer	Spring balance	Summer-fall balance	Winter balance	Identity
Aulus	3	4	4	2	D,E,F,G
Saint Girons	5	3	3	3	A,B,H
Toulouse	4	3	2	3	A,B,E

Annual herbage production was discriminated most by spring surplus, then by the summer beginning and the herbage balance of summer-fall (as shown in Figure 12). For each row (site) and each column (indicator) of the figure, the 8 clusters (from A to H on the x-axis of each case) of climatic years (30 years each in the past and future) are ranked according to decreasing annual herbage production; the y-axis (labelled on top of each column) is expressed as day-of-year for the date and feeding days for the herbage balance. For each indicator, the range is kept constant over locations and criteria. When the boxplot panel exhibits a negative slope for a given indicator, the order of clusters according to this indicator is consistent with the order induced by the annual production. In all three sites, the higher the herbage surplus in spring, the higher annual production (panels b, f and j). In Saint Girons and Toulouse (panels e and i), the beginning of the summer-fall season was correlated with annual herbage production (a late summer-fall corresponding to high annual production). In Saint Girons the summer-fall herbage balance had a significant influence on annual production (panel g), meaning that a high-production year resulted most often from the conjunction of a favourable spring and favourable summer.

In Toulouse and only there, the median and mean values of the summer-fall herbage balance were negative for every cluster (Figure 12, panels c, g and k). For Saint Girons and Aulus, both negative and positive values were observed. Putting the clusters together (i.e. considering the full sample of 60 years), large variability was observed in the spring balance at the three sites (panels b, f and j). Variability in the summer-fall balance was larger for Toulouse and Saint Girons and smaller for Aulus (panels c, g and k). Variability in the winter balance was relatively large in Toulouse due to the high variability in the beginning of winter (panels d, h and l).

Similar annual production can be achieved with different distributions of herbage production during the year (Figure 12). Indeed, different combinations of seasonal balances were observed for forage-year clusters with similar annual herbage production (i.e. two clusters of adjacent rank). For example, in Aulus, a high spring balance and a negative summer balance were observed for cluster D, whereas a low spring balance and positive summer balance were observed for cluster E. Similar phenomena were observed in Toulouse and Saint Girons with the pairs of clusters (B, C) and (D, E), respectively.

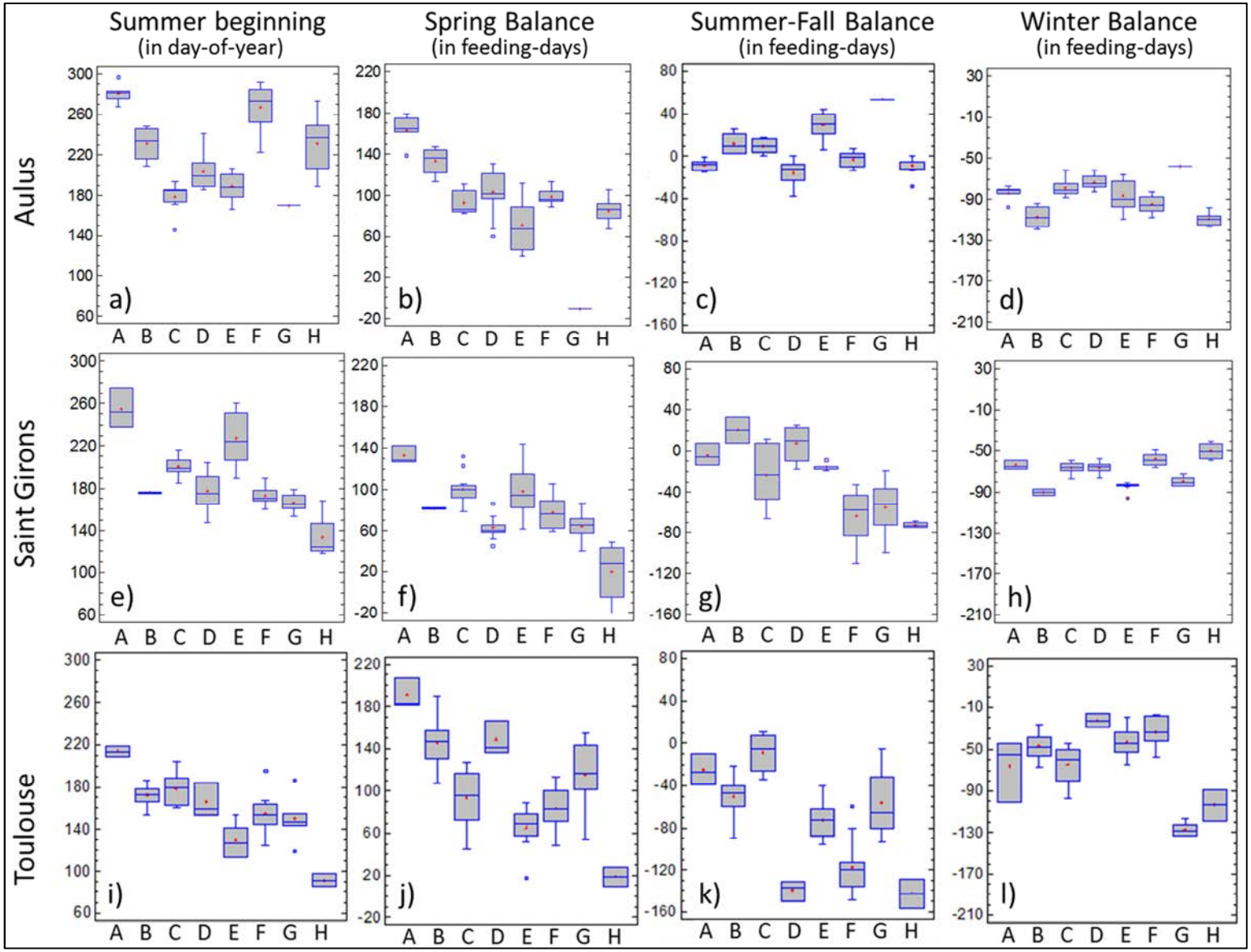


Figure 12: Medians (lines), inter-quartile ranges (boxes), and outliers (dots) of the beginning of summer (left) and seasonal herbage balances for spring, summer-fall and winter (right).

Depending on the site and the time series considered, covering 80% of the sample required grouping three to five forage-year clusters. Therefore, no single cluster could be identified as a prototype of "normal" forage years. For all sites and both periods, at least three clusters occurred more than 12.5% of the time. This threshold (Table 6) represents an equal distribution of years among clusters (100% divided by 8 clusters = 12.5%). A cluster was subsequently considered "frequent" if its relative frequency exceeds 12.5%. For each site, there was a highly frequent cluster (relative frequency ≥ 16%) in both the past and the future (cluster F in Aulus, C in Saint-Girons and B in Toulouse) (Table 6).

Table 6. Cluster sizes (as a percentage of the sample size) in past and future scenarios.

	Aulus		Saint-Girons		Toulouse	
Year cluster	Past	Future	Past	Future	Past	Future
A	8	7	0	10	10	0
B	23	3	0	6	32	23
C	3	23	23	23	26	0
D	13	7	10	19	3	7
E	3	40	0	23	10	20
F	20	17	37	10	13	30
G	0	3	17	10	3	17
H	30	0	13	0	3	3

In bold: %≥12.5

The relative frequencies of clusters differed significantly between past and future scenarios, with the most frequent clusters in the past becoming less common in the future and vice versa (new clusters appearing in the future, some disappearing). Some common clusters in the past were not observed or were infrequent in the future (e.g. clusters B and H in Aulus, F and H in Saint Girons, C in Toulouse) (Table 6). The opposite was true for clusters C in Aulus, E in Saint Girons and F in Toulouse (Table 6). Broadly speaking, from the past to the future, the frequency of years with high annual herbage production (clusters A and B) decreased in Aulus and Toulouse, but increased in Saint Girons. At the same time, the frequency of years with low herbage production (clusters G and H) decreased in Aulus and Saint Girons but increased in Toulouse. After reordering clusters of years according to decreasing frequency (from 1 to 8 in Figure 13), a clear change was identified in the characteristics of dominant forage years from past to future climates. The three most common clusters in the past covered more than 71% of cases, whereas these three clusters covered at most 53% of cases in the future (Figure 13). The greatest change was observed in Aulus (greatest distance between past and future curves in Figure 13). Moreover, the three most frequent clusters in the past included 71-77% of past years, whereas the three most frequent clusters in the future included 65-80% of future years.

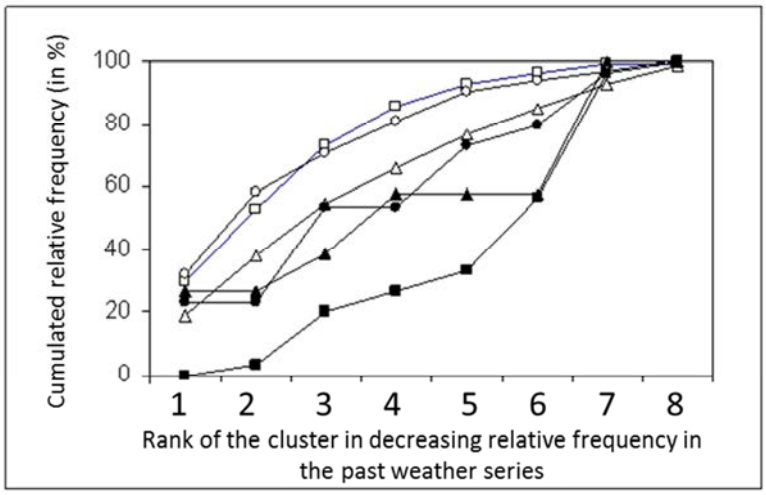


Figure 13 : Cumulative relative frequency of forage-year clusters ranked (from 1 to 8) according to decreasing relative frequency in the past weather series for three sites (Aulus (□), Saint Girons (Δ) and Toulouse (○)). The three upper curves represent the past (open shapes), while the other three concern the future (filled shapes).

3.3. Standard-deviation classification based on past mean seasonal herbage balance

The standard-deviation classification reveals and quantifies the amplitude and frequency of divergence of seasonal balances compared to their means in the past. The percentage of seasons in classes]-∞, -2σ] and [2σ, +∞[changed from 7% in the past to 18% in the future in Aulus, 12% in the past to 17% in the future in Saint Girons, and 3% in the past to 11% in the future in Toulouse (Table 7). Consequentially, the frequency of seasons corresponding in the]-σ, σ[interval decreased by at least 11% in the future (Table 7). Seasons in the extreme classes (above 3σ or below -3σ) were exceptional in the past (only one case observed in Saint Girons), whereas the future time series shows two, three and four seasons in the extreme classes in Aulus, Saint Girons and Toulouse, respectively (Figure 14). The largest deviations were generally positive in winter and negative in summer-fall in the future climate (Figure 14).

Table 7: Relative frequency (%) of deviation classes defined by σ, calculated considering the seasonal indicators for each year.

Range	Past			Future		
	Aulus	St Girons	Toulouse	Aulus	St Girons	Toulouse
]-∞, -2σ]	1	6	3	6	9	7
]-2σ, -σ]	10	9	8	8	21	9
]-σ,σ[	72	69	80	50	52	69
[σ, 2σ[	11	10	9	24	10	11
[2σ, +∞[	6	6	0	12	8	4

Sequences of seasons are also worth studying because the consequences of climate change are more severe for farmers when two consecutive seasons fall into extreme classes. Examination of sequences of seasons during the most critical years in the past (2003) and the future (2057, Figure 14) showed that in Toulouse, herbage balance lay below the mean for three consecutive seasons (especially summer-fall, which lay 2-3σ below) (Figure 14, Table 8). A similar pattern was observed in

Saint Girons, but nothing significant was noticed in Aulus. In the future, the number of successive seasons below the mean was greater in Toulouse than in the other two sites, and there was a trend toward a worsening situation (the balance decreases further below the mean for two seasons but less so for the last season).

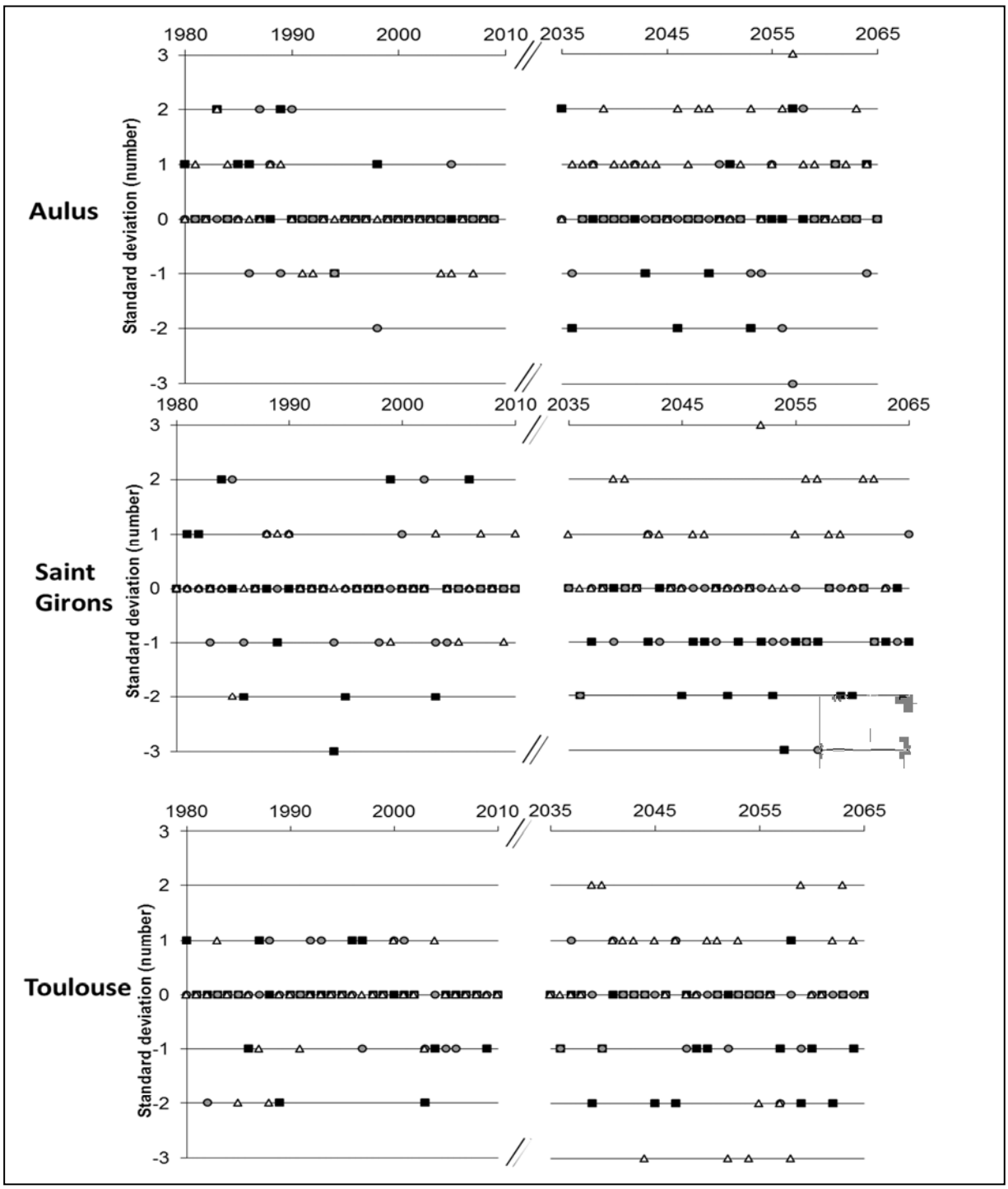


Figure 14: Deviations of herbage balances in spring (○), summer-fall (■) and winter (Δ) in past and future climate series from their means in the past climate series. Classes based on the number of standard deviations are denoted by a number from -3 to 3, where -3 represents]-∞, -3σ]; -2 represents]-3σ, -2σ]; -1 represents]-2σ, -σ]; 0 represents]-σ, σ[; 1 represents [σ, 2σ[; 2 represents [2σ, 3σ[; and 3 represents [3σ, +∞[.

Table 8. Deviation (expressed as the number of standard deviation) of seasonal herbage balance indicators from their means in the past climate series for the two most critical periods during past and future climate series.

	2002	2003			2004	2056	2057			2058
	winter	spring	summer-fall	winter	spring	winter	spring	summer-fall	winter	spring
Aulus	0	0	0	0	-1	2	-3	2	3	2
Saint Girons	0	-1	-2	1	-1	1	-3	-1	2	0
Toulouse	0	-1	-2	-1	0	0	-2	-1	-2	0

4. Discussion

4.1. Lessons about climate change and variability

The indicators break down annual potentials into seasonal potentials, making it possible to: (i) predict whether productivity-defined seasons become hindrances or opportunities, (ii) determine, over several years, whether a favourable productivity-defined season can counterbalance an unfavourable one and (iii) compare sites.

Regardless of the method used for characterising years (year clustering or σ-based classes), we found it nearly impossible to define a single average or normal productivity-oriented climatic year for past or future climate series. For a given site, we identified several clusters of forage years with a significantly high probability of occurrence. Such climatic years, however, differ in the characteristics of their seasons, which can have favourable or unfavourable forage production. Sometimes above-average grass production occurs in the spring, followed by a dry summer, while in other years the inverse occurs. These differences between years are particularly important from a management perspective. Unusual patterns of favourable or unfavourable seasons induce constraints that strongly impact on management (Charpenteau and Duru 1983), especially in the case of a dry spring, even when followed by a wet summer (Aulus in 1998).

In contrast with research that focuses only on summer biomass production (e.g. Lamarque 2012), our results show that the amount of herbage surplus in spring (depending on temperature and water availability) and surplus or shortage in summer (depending on water availability) need to be considered jointly for the adaptation of grassland-based livestock systems. The year 2003 in Toulouse, which was considered exceptional at the European level (Ciais, *et al.* 2005), brought about the greatest deviation from mean herbage balance (-σ for spring and -2σ for summer); i.e. it simultaneously exhibited the lowest herbage surplus in spring, the greatest herbage shortage in summer-fall and the earliest beginning of summer-fall (cluster H, Figure 12). The two other sites, located at higher altitudes, did not experience such dramatic consequences, which is consistent with de Martonne aridity indices (Table 4).

For the future climate, results of several crop simulation models predict that the expected impact of climate change on grassland production depends greatly on the geographic area and time horizon considered. After a slight increase in forage production in the first half of the 21st century, a reduction is expected in France (e.g. Graux, *et al.* 2013) and the rest of Europe (Höglind, *et al.* 2013). More specifically, Ruget, *et al.* (2010) showed that for France in the near future (2020-2050), a

production increase is expected in almost all regions, while towards the end of the century the trends differ by region, with a production decrease expected, especially in south-western France. Comparing the periods 1980-2010 and 2035-2065, we found an average decrease in biomass production for Toulouse (-6%) and Saint Girons (-12%) and a slight increase for Aulus (+2%) (Sautier, *et al.* 2013). These results are within the range of changes obtained in the above mentioned studies that concerned lower scales (national or regional rather than local) and different (although overlapping) periods. They corroborate the intuitive prediction that the switch from increasing to decreasing annual production will occur later in mountainous zones. In addition to these results, we found that climatic shifts are expected in four ways:

- infrequent forage-year clusters in the past become frequent in the future;
- some clusters with high annual herbage production in the past are expected to disappear (cluster B in Aulus and clusters A or C in Toulouse);
- clusters with low annual herbage production that did not occur in the past are likely to occur in the future (cluster G in Aulus and Saint Girons);
- variability in seasonal herbage production increases.

Based on comparison of forage-year clusters (Figs. 3 and 4), as well as quantification of variations from the mean (Figure 14), we substantiated the claim that a shift in seasonal biomass production is expected. Clusters of climatic years infrequent in the past will become more common, and new clusters will emerge. The magnitude and direction of change in weather induced by climate change indicate that a substantial readjustment in management practices will be required. Therefore, incremental adaptations will probably be insufficient to cope with climate change. Instead, transformational (e.g. land-use) changes (Rickards and Howden 2012) and adaptive risk-management approaches will be required.

Consistent with Seneviratne, *et al.* (2012), our simulation results indicate a probable increase in year-to-year climate variability and an accentuation of the contrast between spring and summer-fall herbage balance (productivity increases for spring and decreases for summer-fall). These changes, highlighted by the methods presented here, have important management implications for farmers. Shifting the grazing period due to an earlier spring and summer requires organisational adaptations. It could lead to changing the temporal distribution of work, with more harvesting in spring due to higher herbage growth and more time spent distributing conserved feed in summer due to a shorter grazing period. More generally, higher seasonal variability requires specific risk-management strategies (e.g. larger forage stocks or other feeding resources), and this need increases if between-year variability also increases.

4.2. Contribution to the participative design process

The data analysis and corresponding statistical graphics used in our approach can help farmers, advisers and scientists envision site-specific impacts of climate change on herbage production patterns. Such information can provide useful material for participatory design workshops focusing on adaptation of grassland systems to new climatic conditions (Duru *et al*. 2012).

The originality of our two methods of weather-pattern characterisation stems from the concept of a “forage year”, defined as seasonal dynamics of forage production and intake. The seasonal assessment of herbage surplus or deficit makes it possible either to categorise a series of years into a small number of clusters or to classify seasons according to their deviations from past means. When

represented graphically, these synthetic and quantitative descriptions can become generic tools due to the model-based assessment involved, its suitability for any soil or climatic context and the ease of obtaining the required data. Climatic years and seasons are quantified as the number of days of feed available (Figure 12), which fits well with farmers' management-oriented mental models, as previously experienced in grazing management projects (Cros, *et al.* 2004; Duru, *et al.* 2000). Such representations are therefore cognitive tools (Duru and Martin-Clouaire 2011) that can be used to raise agricultural stakeholders' awareness of climate change and its likely consequences on grassland systems.

The approach for characterising climate exposure presented in this paper applies to roughly defined grassland systems. It does not deal, for instance, with specific field characteristics (e.g. topography, soil bearing capacity). Other indicators sensitive to these aspects are required when more elaborate characterisation of livestock systems' climatic exposure is needed.

These two methods were developed as part of a project to design grassland-based livestock systems that are less vulnerable to climate change and variability. The vehicle for implementing the methodology is a series of participative-design workshops. Each workshop begins with the facilitator introducing the game-based design methodology (Martin, *et al.* 2011) and playing material. The system to design must initially comply with the system features desired by the participants and then consider the weather conditions encountered, which takes the form of a weather time-series and contextual data about past weather and projected future weather. This part of the method is specifically described in the present paper. The design problem consists of dimensioning the system, configuring and planning land-use, and devising conditional adjustments to cope with adverse situations or to take advantage of opportunities. Participative design is truly an iterative, on-going interactive process. Participants are provided a methodology to continually assess the system under construction and adapt to newly introduced constraints or changes. The interaction between farmers in the workshops promotes understanding and learning about the potential threat brought by climate change and ways to reduce the system vulnerability (Fleming and Vanclay 2010). In the design process, the visual and tangible representations of climate change and variability provide a science-based account of the uncertainty about possible future weather. The tools presented in this paper contribute insightful design information by enabling comparison of forage-year clusters in time and space. For instance, for clusters that were rare in the past and are likely to become common in the future, farmers can design systems similar to those that survived such difficult weather conditions in the past. Also, by comparing sites at different altitudes or biogeographic regions, farmers can exploit a design-by-analogy approach that considers the future weather of a site is likely to be similar to that experienced at a different site in the past.

5. Conclusion

The exposure of grassland-based livestock systems to climate change and variability drives the identification and evaluation of management adaptations. However, exposure is difficult to assess from only climate data given the joint effects of weather variables on grass growth throughout the year. Therefore, we proposed two methods for defining and ranking clusters of "forage years" to characterise climate change and variability. The methods were tailored to produce outputs that can serve as cognitive tools for farmers and agricultural advisors. Forage years were defined from exposure indicators specific to grazing systems: starting dates of seasons and seasonal grass production surplus or deficit. The first method clustered years with similar herbage growth profiles,

while the second classified the deviation of seasonal herbage balances from their respective means. Both methods can be used as an initial step for designing farming system adaptations for feeding herds. They provide a synthetic and quantitative view of problematic weather patterns likely to occur in the future. Since exposure indicators were based on generic grass-growth models, the method is easily applicable to other sites and periods than those considered here. The main lessons from the case studies are the following:

- Several "normal" forage years can be identified, albeit with different seasonal patterns.
- While no trend of change was observed in exposure indicators over the last 30 years, a shift is expected for the medium future (2050 ± 15 years); the most frequent clusters of climatic years in the past become less common, although some clusters remain common.
- An increase in year-to-year variability in seasonal herbage balance and an accentuation of the contrast between spring and summer-fall herbage balance are expected, which call for substantial adaptations to livestock systems.

6. References

Adger W.N. 2006. Vulnerability. *Global Environmental Change*, **16**(3), 268–281, doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006.

Anwar M.R., Liu D.L., Macadam I. and Kelly G. 2012. Adapting agriculture to climate change: a review. *Theoretical and Applied Climatology*, **113**(1-2), 225–245, doi:10.1007/s00704-012-0780-1.

Chapman D.F., Kenny S.N., Beca D. and Johnson I.R. 2008. Pasture and forage crop systems for non-irrigated dairy farms in southern Australia. 2. Inter-annual variation in forage supply, and business risk. *Agricultural Systems*, **97**(3), 126–138, doi:10.1016/j.agsy.2008.02.002.

Charpenteau J.L. and Duru M. 1983. Simulation of some strategies to reduce the effect on climatic variability on farming. The case of Pyrenees Mountains. *Agricultural Systems*, **11**(2), 105–125, doi:http://dx.doi.org/10.1016/0308-521X(83)90025-2.

Ciais P., Reichstein M., Viovy N., Granier a, Ogée J., Allard V., Aubinet M., Buchmann N., Bernhofer C., Carrara a, Chevallier F., De Noblet N., Friend a D., Friedlingstein P., Grünwald T., Heinesch B., Keronen P., Knohl a, Krinner G., Loustau D., Manca G., Matteucci G., Miglietta F., Ourcival J.M., Papale D., Pilegaard K., Rambal S., Seufert G., Soussana J.F., Sanz M.J., Schulze E.D., Vesala T. and Valentini R. 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, **437**(7058), 529–533, doi:10.1038/nature03972.

Cros M.., Duru M., Garcia F. and Martin-Clouaire R. 2004. Simulating management strategies: the rotational grazing example. *Agricultural Systems*, **80**(1), 23–42, doi:10.1016/j.agsy.2003.06.001.

Déqué M., Dreventon C., Braun A. and Cariolle D. 1994. The ARPEGE/IFS atmosphere model : a contribution to the French community climate modelling. *Climate Dynamics*, **10**, 249–266, doi:10.1007/BF00208992.

Duru M., Adam M., Cruz P., Martin G., Ansquer P., Ducourtieux C., Jouany C., Theau J.P. and Viegas J. 2009. Modelling above-ground herbage mass for a wide range of grassland community types. *Ecological Modelling*, **220**(2), 209–225, doi:10.1016/j.ecolmodel.2008.09.015.

Duru M., Ducrocq H. and Bossuet L. 2000. Herbage volume per animal: a tool for rotational grazing management. *Journal of Range Management*, **53**, 395–402, doi:10.2307/4003750.

Duru M., Felten B., Theau J.P. and Martin G. 2012. A modelling and participatory approach for enhancing learning about adaptation of grassland-based livestock systems to climate change. *Regional Environmental Change*, **12**(4), 739–750, doi:10.1007/s10113-012-0288-3.

Duru M. and Martin-Clouaire R. 2011. Cognitive tools to support learning about farming system management: a case study in grazing systems. *Crop and Pasture Science*, **62**, 790–802, doi:10.1071/CP11121.

Fleming A. and Vanclay F. 2010. Farmer responses to climate change and sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, **30**(1), 11–19, doi:10.1051/agro/2009028.

Fraser E.D.G., Dougill A.J., Hubacek K., Quinn C.H., Sendzimir J. and Termansen M. 2011. Assessing Vulnerability to Climate Change in Dryland Livelihood Systems: Conceptual Challenges and Interdisciplinary Solutions. *Ecology and Society*, **16**(3), doi:10.5751/ES-03402-160303.

Gibbons J.M. and Ramsden S.J. 2008. Integrated modelling of farm adaptation to climate change in East Anglia, UK: Scaling and farmer decision making. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **127**, 126–134, doi:10.1016/j.agee.2008.03.010.

Girard N., Bellon S., Hubert B., Lardon S., Moulin C.-H. and Osty P.-L. 2001. Categorising combinations of farmers' land use practices: an approach based on examples of sheep farms in the south of France. *Agronomie*, **21**(5), 435–459, doi:10.1051/agro:2001136.

Graux A.-I., Bellocchi G., Lardy R. and Soussana J.-F. 2013. Ensemble modelling of climate change risks and opportunities for managed grasslands in France. *Agricultural and Forest Meteorology*, **170**, 114–131, doi:10.1016/j.agrformet.2012.06.010.

Hansen J., Sato M. and Ruedy R. 2012. Perception of climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **109**(37), E2415–23, doi:10.1073/pnas.1205276109.

Höglind M., Thorsen S.M. and Semenov M.A. 2013. Assessing uncertainties in impact of climate change on grass production in Northern Europe using ensembles of global climate models. *Agricultural and Forest Meteorology*, **170**, 103–113, doi:10.1016/j.agrformet.2012.02.010.

Hopkins A. and Del Prado A. 2007. Implications of climate change for grassland in Europe: impacts, adaptations and mitigation options: a review. *Grass and Forage Science*, **62**(2), 118–126, doi:10.1111/j.1365-2494.2007.00575.x.

Hulme M., Dessai S., Lorenzoni I. and Nelson D.R. 2009. Unstable climates: Exploring the statistical and social constructions of "normal" climate. *Geoforum*, **40**(2), 197–206, doi:10.1016/j.geoforum.2008.09.010.

Lamarque P. 2012. *Une approche socio-écologique des services écosystémiques. Cas d'étude des prairies subalpines du Lautaret.* PhD Thesis, Université de Grenoble, France.

Martin G., Felten B. and Duru M. 2011. Forage rummy: A game to support the participatory design of adapted livestock systems. *Environmental Modelling & Software*, **26**(12), 1442–1453, doi:10.1016/j.envsoft.2011.08.013.

McCrum G., Blackstock K., Matthews K., Rivington M., Miller D. and Buchan K. 2009. Adapting to climate change in land management: the role of deliberative workshops in enhancing social learning. *Environmental Policy and Governance*, **19**(6), 413–426, doi:10.1002/eet.525.

Meinke H., Howden S.M., Struik P.C., Nelson R., Rodriguez D. and Chapman S.C. 2009. Adaptation science for agriculture and natural resource management—urgency and theoretical basis. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, **1**(1), 69–76, doi:10.1016/j.cosust.2009.07.007.

Metzger M.J., Bunce R.G.H., Jongman R.H.G., Mücher C.A. and Watkins J.W. 2005. A climatic stratification of the environment of Europe. *Global Ecology and Biogeography*, **14**, 549–563, doi:10.1111/j.1466-822x.2005.00190.x.

Nakicenovic N., Alcamo J., Davis G., de Vries B., Fenhann J., Gaffin S., Gregory K., Grubler A., Jung T.Y., Kram T., Emilio la overe E., Michaelis L., Mori S., Morita T., Pepper W., Pitcher H., Price L., Riahi K., Roehrl A., Rogner H.H., Sankovski A., Schlesinger M., Shukla P., Smith S., Swart R., van Rooyen S., Victor N. and Dadi Z. 2000. Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. SUMMARY FOR POLICYMAKERS. p. 12.

Niu X., Easterling W., Hays C.J., Jacobs A. and Mearns L. 2009. Reliability and input-data induced uncertainty of the EPIC model to estimate climate change impact on sorghum yields in the U.S. Great Plains. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **129**(1-3), 268–276, doi:10.1016/j.agee.2008.09.012.

Pagé C., Terray L. and Boé J. 2008. *Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle: les scénarii SCRATCH08*. Toulouse. p. 21.

Pannell D.J. 2010. Policy for climate change adaptation in agriculture. *In 54th Annual Conference of the Australian Agricultural and Resource Economics Society*. Adelaide, Australia, p. 18.

Rickards L. and Howden S.M. 2012. Transformational adaptation: agriculture and climate change. *Crop and Pasture Science*, **63**(3), 240, doi:10.1071/CP11172.

Ruget F., Moreau J., Cloppet E. and Souverain F. 2010. Effect of climate change on grassland production for herbivorous livestock systems in France. *In* Schnyder, H., Isselstein, J., Taube, F., Auerswald, K., Schellberg, J., Wachendorf, M., Herrmann, A., Gierus, M., Wrage, N. & Hopkins, A., *eds. Grassland in a Changing World*. Organising Committee of the 23th General Meeting of the European Grassland Federation: Kiel, Germany, pp. 75–77.

Sautier M., Martin-Clouaire R., Faivre R. and Duru M. 2013. Assessing climatic exposure of grassland-based livestock systems with seasonal-scale indicators. *Climatic Change*, **120**(1-2), 341–355, doi:10.1007/s10584-013-0808-2.

Sebillotte M. and Soler L.G. 1990. Les processus de décision des agriculteurs. I. Acquis et questions vives. *In* Brossier, J., Vissac, B. & Lemoigne, J.L., *eds. Modélisation systémique et systèmes agraires.* Inra éditons: Paris.

Seneviratne S.I., Nicholls N., Easterling D., Goodess C.M., Kanae S., Kossin J., Luo Y., Marengo J., McInnes K., Rahimi M., Reichstein M., Sorteberg A., Vera C. and Zhang X. 2012. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. *In* Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M. & Midgley, P.M., *eds. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).* Cambridge University Press,: Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 109–230.

Vanclay F. 2004. Social principles for agricultural extension to assist in the promotion of natural resource management. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, **44**, 213–222, doi:10.1071/EA02139.

Zhang B., Valentine I. and Kemp P.D. 2007. Spatially explicit modelling of the impact of climate changes on pasture production in the North Island, New Zealand. *Climatic Change*, **84**(2), 203–216, doi:10.1007/s10584-007-9245-4.

Partie III : Renforcer les capacités d'adaptation des systèmes agricoles au changement et à la variabilité climatiques par la conception de systèmes

« The good news is we are far from helpless in preparing for these consequences. »

Ban Ki-moon
dans son discours « Adapting to Climate Change »
à Ulaanbaatar (Mongolie), le 27 Juillet 2009

Chapitre 5 - Une méthode de conception de systèmes de production agricoles adaptés au changement et à la variabilité climatiques

1. Introduction

Dans le contexte du changement climatique, l'enjeu est d'anticiper les adaptations à mettre en place dans les systèmes dépendant du climat. En effet, pour faire face ou tirer profit d'évolutions d'exposition, les systèmes doivent s'adapter, c'est-à-dire modifier indépendamment ou conjointement leurs ressources, leurs processus, leurs productions ou leur structure. Il s'agit d'adaptations incrémentales lorsque les modifications faites ne sont pas de plus grande ampleur que ce qui est déjà présent sur le système pour faire face à la variabilité climatique. Lorsque les modifications sont de plus grande ampleur, ou lorsqu'elles n'ont pas été encore appliquées dans la zone d'étude, il s'agit d'adaptations de transformation (Kates, *et al.* 2012).

Pour gérer une exploitation agricole, l'agriculteur construit ses décisions en considérant à la fois le temps long et le temps court. Les sciences de gestion distinguent trois types de choix en fonction de l'horizon temporel en jeu. Les choix stratégiques se rapportent aux choix à long terme et portent sur les objectifs, la dimension, la structure de l'exploitation agricole et sur les ressources à mobiliser et les compétences à développer. Les choix tactiques se rapportent aux choix à moyen et court terme et portent sur les ressources mobilisées et sur la succession des interventions dans le temps. Les choix opérationnels se rapportent au court terme, par exemple sur la façon de faire une intervention. Ces différents choix s'appuient sur des raisonnements différents (cf. modèle général de l'agriculteur selon Sebillotte and Soler, 1990). D'après le modèle général de l'agriculteur, la gestion stratégique s'élabore à partir d'une perception de la moyenne du contexte alors que la gestion tactique se construit en considérant un intervalle de variation, considéré comme prévisible par l'agriculteur, atour de cette moyenne. Par ailleurs, le système de production n'est pas construit pour faire face de manière planifiée aux évènements extrêmes, car il s'agit d'évènements très peu fréquents, non prévisibles dont la prise en compte préalable conduirait à des coûts très élevés. Lorsqu'un évènement extrême survient, l'exploitation est amenée à faire appel à des mesures d'urgences, inhabituelles et qui n'étaient pas prévues (aides, assurances, achat extérieur, vente du cheptel…); l'exploitation est en danger (risque de cessation d'activité, de reconversion).

En modifiant la situation climatique moyenne et la variabilité climatique, le changement climatique est susceptible d'entrainer des modifications de stratégie ou de tactique des exploitations agricoles. Plus les ressources et les produits de l'exploitation sont dépendants du climat, plus l'exploitation est exposée à ce changement. Les élevages herbagers sont particulièrement exposés à une modification du climat tant sur leur niveau de production (le climat est un facteur de la quantité et de la qualité des fourrages produits) que sur l'organisation du calendrier agricole (le climat conditionne les dates de disponibilité des fourrages). En effet, nous avons préalablement montré que le changement climatique pourrait avoir, dès 2050, des conséquences sur le fonctionnement des systèmes d'élevage herbagers par la modification de l'exposition de ces systèmes aux conditions climatiques (Chapitres 3 et 4). Le changement climatique pourrait :

1- provoquer un décalage des saisons fourragères (Chapitre 3),
2- augmenter la variabilité interannuelle des quantités d'herbe disponibles à chaque saison (Chapitre 4),
3- modifier les types d'années climatiques les plus fréquents (Chapitre 4)
4- et augmenter l'écart de production entre l'été et le printemps (Chapitre 3).

Il s'agit à la fois de changements d'exposition à la variabilité climatique (augmentation de la variabilité interannuelle des productions saisonnières d'herbe) et au climat à proprement parler (changement des types d'années les plus fréquents, décalage des saisons fourragères, augmentation du contraste de production entre été et printemps).

L'évaluation d'une adaptation au changement climatique doit prendre à la fois en compte la situation moyenne et la variabilité climatique associée (Smit, *et al.* 1999). En effet, même sans changer la variabilité (i.e. sans changer la forme ou la variance de la distribution), une modification de la moyenne entraine un déplacement de la distribution. Ainsi, en modifiant la moyenne d'une variable climatique (e.g. température), le changement climatique modifie sa variabilité interannuelle. De plus, le changement climatique peut modifier la distribution des variables climatiques : augmentation de l'amplitude de la variabilité et déformation de la distribution (cf. Chapitre 4 : augmentation des années exceptionnelles écartées de la moyenne et modification des types d'années fréquents). Ainsi, l'adaptation des systèmes au changement climatique doit prendre en considération que la situation climatique courante du futur inclura des évènements exceptionnels d'aujourd'hui, alors que les évènements courants d'aujourd'hui pourront devenir des évènements exceptionnels. Il s'agit alors de traiter de la transformation du climat, caractérisée par des évolutions lentes et progressives des moyennes et par le déplacement des évènements extrêmes.

L'évaluation d'une adaptation à un scénario de changement climatique doit également prendre en compte l'incertitude liée au caractère imprévisible du climat. En effet, même s'il est possible de décrire chaque variable climatique par sa distribution (moyenne, variabilité et type de distribution), il est impossible de prédire la réalisation d'un évènement climatique sauf à très court terme. Connaître la distribution d'une variable à partir par exemple d'un historique de données ou d'un ensemble de simulations permet d'estimer la probabilité qu'un évènement survienne mais ne permet pas de prédire le moment auquel il va se produire. Face à cette incertitude, le système doit être en permanence assez flexible, i.e. comporter une diversité d'options alternatives, ou assez robuste pour faire face à la gamme de situations qui constituent la variabilité du climat.

Néanmoins, la majorité des travaux sur l'adaptation des systèmes de production au changement climatique ne tiennent pas compte de la variabilité et de l'incertitude qui caractérisent les variables climatiques (Estrada, *et al.* 2011). En effet, les méthodes d'évaluation et/ou de conception de systèmes face au changement climatique s'intéressent le plus souvent à l'évolution des moyennes climatiques ou aux risques liés aux évènements extrêmes (e.g. Lamarque 2012; Martin, *et al.* 2011; McCrum, *et al.* 2009; Rinaudo, *et al.* 2012; Schaap, *et al.* 2013). L'évaluation ou la conception n'est alors réalisée qu'à partir d'une situation particulière et ne permet pas de rendre compte de la pertinence du système pour l'ensemble du climat considéré. Dès lors, le système conçu risque de ne pas être assez flexible pour faire face à la variabilité du climat. En outre, ces méthodes prennent rarement en compte le caractère imprévisible du climat : la conception est réalisée en connaissant la situation climatique à l'avance et l'évaluation est effectuée sur l'année d'intérêt. Le système ainsi conçu risque de ne pas être assez robuste ou flexible pour faire face à un évènement qui n'aurait pas été anticipé. Certains travaux permettent de prendre en compte la variabilité du climat uniquement, alors que d'autres s'intéressent plus particulièrement à intégrer l'aspect incertain des variables climatiques. Nous n'avons cependant pas connaissance de travaux qui intègrent dans l'évaluation ou

la conception à la fois le changement climatique, la variabilité climatique et l'incertitude liée au climat.

Deux types d'approches s'intéressent en parallèle à concevoir et évaluer des élevages adaptés aux conditions climatiques futures. D'une part, les approches participatives proposent des adaptations imaginées à l'aide de méthodes collectives de construction de scénarios à partir de critères définis au cours du processus. Elles ont pour objectif de répondre à une interrogation de façon pertinente pour un collectif cible, traiter de problèmes complexes en faisant appel à l'expertise et aux compétences d'acteurs diversifiés, et accéder à des connaissances tacites ou non formalisées par les scientifiques. Cependant, ces démarches demandent de s'inscrire dans une dynamique de projet en collaboration avec des acteurs et de se dérouler sur le temps long. En effet, la recherche de consensus ou simplement la nécessité de laisser toutes les voix s'exprimer implique des temps de réalisation importants. C'est pourquoi les approches participatives sont rarement utilisées pour traiter plusieurs années climatiques, plusieurs systèmes de production ou plusieurs régions géographiques. De plus, l'évaluation des adaptations est fortement dépendante du contexte et des participants au projet (critères choisis pour l'évaluation, qualification ou quantification du critère pour évaluer un système donné). Il est alors difficile de comparer des adaptations provenant de projets différents. D'autre part, les approches par modélisation qui n'incluent pas les praticiens à la construction ou à l'utilisation du modèle soit proposent des adaptations à partir de méthodes d'optimisation de critères prédéfinis comme le rendement, la rentabilité, le travail ou l'impact environnemental, soit évaluent des adaptations à partir de méthodes de simulation dynamique. A partir d'indicateurs quantitatifs prédéfinis, elles permettent de:

- tester des systèmes et des adaptations pour un grand nombre de situations climatiques (e.g. Graux, *et al.* 2013), c'est-à-dire tester plusieurs scénarios climatiques sur différentes régions géographiques,
- prendre en compte des évolutions de contexte économique ou différents niveaux d'aversion au risque (e.g Mosnier 2009),
- et comparer le comportement de plusieurs systèmes (Lurette, *et al.* 2013).

Ainsi, ces approches de modélisation permettent de fournir des éléments prospectifs à destination des décideurs à l'échelle nationale et supranationale. Cependant, ces approches par modélisation sont critiquées pour leur manque de crédibilité, pertinence et légitimité auprès des acteurs et porteurs d'enjeux du monde agricole à l'échelle locale. La crédibilité de ces approches par modélisation est limitée par le manque d'intelligibilité des modèles utilisés, appelé effet boite noire. Ces approches sont souvent perçues comme peu connectées aux préoccupations ou critères d'évaluation des acteurs et porteurs d'enjeux, ce qui diminue de fait leur pertinence. Enfin, comme les modèles de simulation sont le plus souvent imaginés et développés par les chercheurs, ces modèles ne prennent en compte qu'une seule vision du monde ce qui diminue ainsi la légitimité sociale de telles approches.

Dans ce chapitre, nous présentons une méthode de conception de systèmes adaptés au changement climatique. Notre méthode a deux originalités. D'abord elle permet de traiter à la fois du changement climatique moyen, de la variabilité et du caractère imprévisible du climat. Ensuite,

elle permet de décomposer le processus de conception des choix stratégiques vers des choix tactiques.

Pour cela, nous avons choisi d'hybrider les approches par modélisation et les approches participatives. Ainsi l'évaluation du système imaginé peut être effectuée à dire d'expert ou être assistée par des modèles de simulation pour donner des informations quantifiées sur les rendements ou sur les performances de l'exploitation. En l'occurrence, la modélisation des systèmes biophysiques nous permet de quantifier à l'échelle de la semaine la disponibilité en ressources fourragères pour une année climatique donnée alors que le participatif nous permet d'élargir l'évaluation du système à des critères non quantifiés ou non quantifiables. L'approche participative intègre de plus l'aspect décisionnel, difficilement modélisable dans la dynamique du système conçu étant donné que les décisions de l'éleveur reposent sur des connaissances tacites et des choix multicritères. Enfin, le participatif nous permet de faire appel à l'expérience et aux compétences des praticiens pour imaginer et évaluer des adaptations cohérentes avec les contraintes de leur zone et système de production. La conception, qui est effectuée par des éleveurs au cours d'ateliers, prend en compte le changement climatique moyen mais aussi la variabilité climatique future et le caractère imprévisible du climat. Elle est réalisée à l'échelle de l'exploitation agricole et prend ainsi en compte à la fois la sensibilité du système biophysique face au climat et la capacité de l'éleveur à adapter la gestion de son exploitation en fonction des ressources disponibles. La capacité d'adaptation du système piloté est appréhendée en mettant des éleveurs en situation de gestion d'un système d'élevage virtuel avec l'objectif de concevoir et évaluer une stratégie et une tactique d'exploitation. En atelier, les éleveurs conçoivent et évaluent collectivement un système à priori adapté au climat moyen futur et à sa variabilité. Pour cela, des objets intermédiaires permettent de matérialiser les choix de conception ou, à l'aide de simulations informatiques ou d'expertises, de quantifier l'exposition et la sensibilité du système au climat futur. En effet, nous utilisons des modèles de simulations existants pour représenter les effets d'un nouveau climat sur les ressources fourragères disponibles. Des références zootechniques sont utilisées pour évaluer la satisfaction des besoins des animaux. L'évaluation des scénarios de systèmes ainsi conçus prend en compte deux dimensions :

- elle est effectuée par des calculs lorsqu'il s'agit de quantifier la satisfaction des besoins des animaux (à l'aide d'une feuille de calcul préformatée)
- elle est réalisée par l'expertise des éleveurs lorsqu'il s'agit d'autres critères tels que la charge de travail, l'acceptabilité sociale ou la pertinence économique du système.

Notre démarche consiste à travailler, réfléchir et communiquer sur le changement climatique et ses conséquences. L'objectif est d'anticiper les adaptations à mettre en place pour faire face au changement climatique soit en modifiant les systèmes actuels en vue des évolutions du climat, soit en planifiant différentes voies d'adaptations possibles. Un manque d'anticipation abouti à des adaptations en réaction au changement, souvent inefficaces sur le long terme ou à plus grande échelle (Adger, *et al.* 2005). De plus, pour Adger *et al.* (2005), les adaptations par réactions ont tendance à augmenter la vulnérabilité car elles augmentent les inégalités (les meilleurs font face alors que les autres voient leur situation s'aggraver). En anticipant les adaptations possibles, notre méthode permet d'éviter de s'engager dans une voie d'adaptation qui augmenterait la vulnérabilité du système. Dans un premier temps, nous la présentons et la mettons à l'épreuve pour traiter de la question de l'adaptation des élevages au changement climatique au cours d'ateliers réunissant

éleveurs et scientifiques. Dans un deuxième temps, nous discutons des apports et des limites de notre méthode par rapport aux méthodes existantes au regard des systèmes conçus au cours des ateliers et du déroulement des ateliers.

2. Matériels et Méthodes

2.1. Une méthode pour concevoir et évaluer un système adapté au changement et à la variabilité du climat

2.1.1. Les étapes de la conception

Pour prendre explicitement en compte l'évolution du climat et sa variabilité, notre méthode de conception met en parallèle le modèle général de l'agriculteur avec la décomposition du climat en situation moyenne et en variabilité autour de la moyenne. Elle décompose le processus de conception en plusieurs étapes, de la situation climatique moyenne pour faire émerger une stratégie, à une gamme de situations pour faire émerger une tactique ou réviser la stratégie.

Notre méthode articule la conception autour de deux grands types d'ateliers : des ateliers « changement » et des ateliers «variabilité ». Un atelier « changement » s'intéresse à une situation climatique moyenne future alors qu'un atelier « variabilité » s'intéresse à élargir le climat considéré à la variabilité climatique future (Figure 15). Au terme d'un cycle de conception (trois ateliers consécutifs), les participants auront testé un système pour trois situations climatiques différentes : une année moyenne (atelier 1) et deux autres années (atelier 2 et atelier 3). Chaque atelier se déroule selon trois phases (Figure 16) :

Phase 1 - Présentation du climat d'intérêt et propositions d'adaptations,

Phase 2 - Conception du système (construction ou modification de la stratégie et de la tactique),

Phase 3 - Evaluation du système.

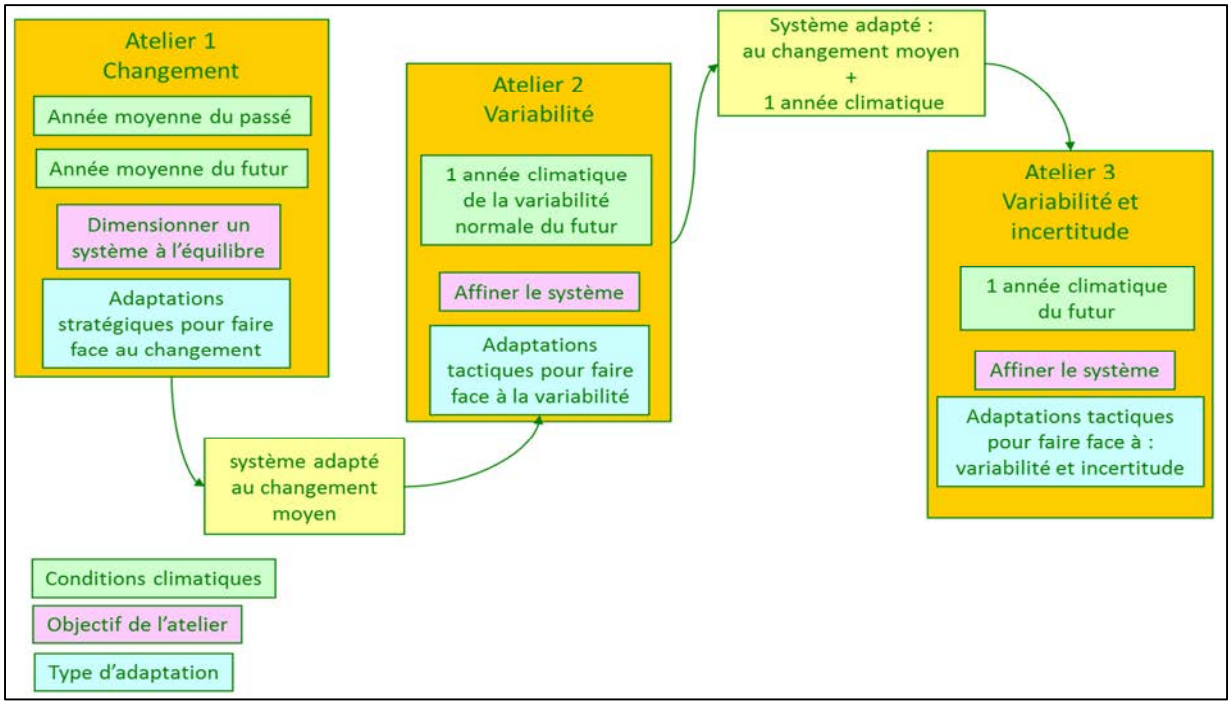


Figure 15 : Enchainement des trois ateliers de conception.

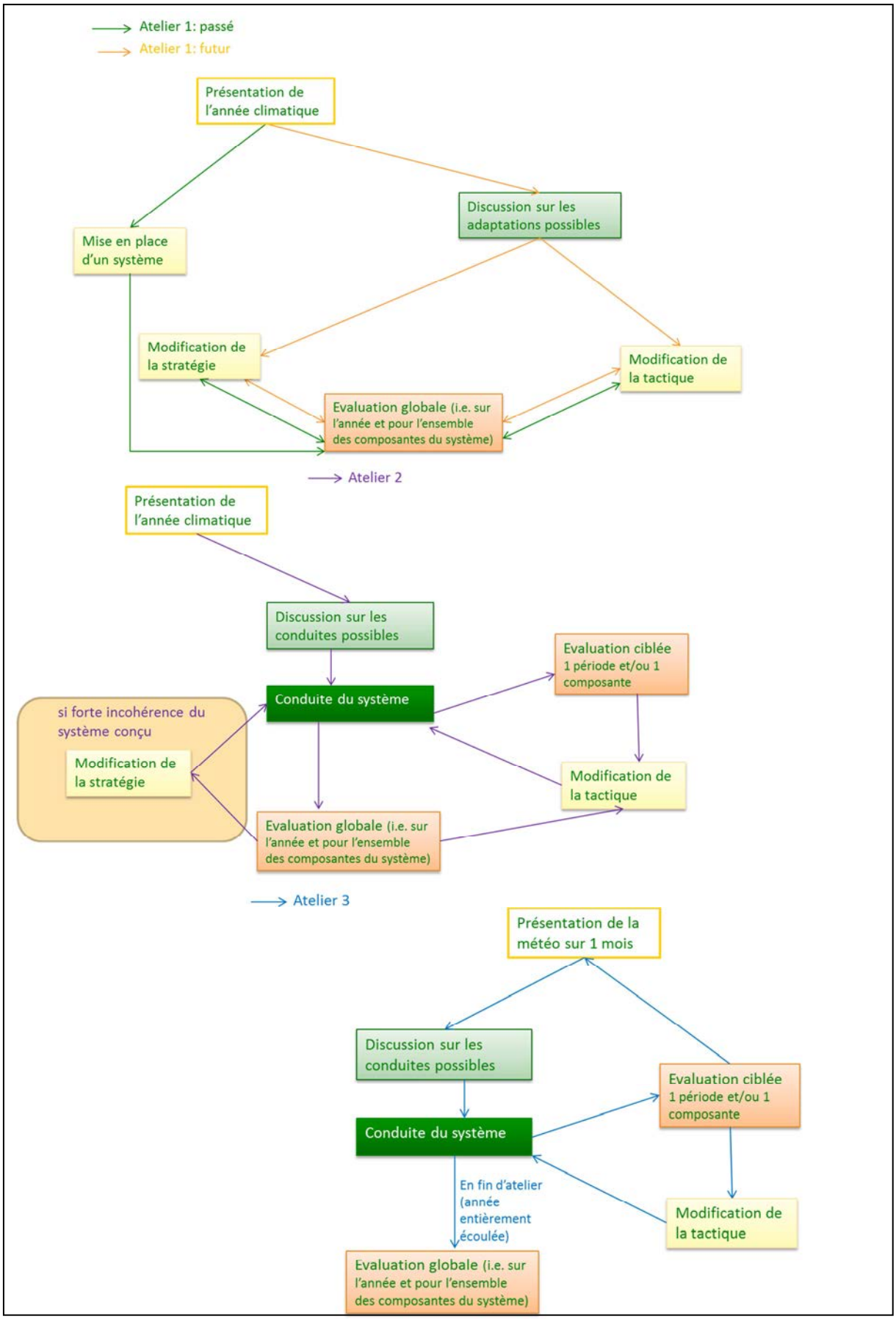


Figure 16 : Déroulement des ateliers selon différentes étapes.

Au cours de tous les ateliers, l'évaluation de la vraisemblance du système conçu est effectuée par les participants. Cette évaluation est à la fois effectuée à dire d'expert et assistée par des modèles de simulation pour donner des informations quantifiées sur les rendements fourragers et sur les performances de l'exploitation. L'évaluation doit permettre d'identifier et d'écarter des systèmes incompatibles avec le climat futur. Les discussions menées entre les participants pendant la conception contribuent à expliciter les motivations des choix effectués.

Le climat est présenté soit pour une année entière (atelier 1 et 2), soit pour une période plus courte (atelier 3). La stratégie est construite en atelier 1 et testée en atelier 2 et 3 ; elle peut être révisée en atelier 2. La conduite est construite en atelier 1, testée et détaillée en atelier 2 et 3 ; elle peut être révisée en atelier 2. L'évaluation est globale (i.e. sur toute l'exploitation, sur toute l'année) lorsqu'il s'agit d'évaluer la stratégie (atelier 1 et, dans une moindre mesure, ateliers 2 et 3). L'évaluation est ciblée sur une période précise ou un composant du système précis lorsqu'il s'agit d'évaluer la conduite du système (ateliers 2 et 3).

Ainsi, la conception est décomposée en trois étapes pour lesquelles la complexité de la prise de décision est croissante :

- Dans le premier atelier, les participants doivent mobiliser leurs connaissances sur le fonctionnement des élevages, leurs références de dimensionnement (part des prairies permanentes, des céréales, du maïs, niveau de production des ressources fourragères et des animaux, UGB/ha possibles) pour les mettre en lien avec l'année climatique qui est présentée (année moyenne). Il s'agit de mobiliser des connaissances et des informations pour répondre à la question : « En général, qu'est-ce que je fais ? ».
- Dans le second atelier, les connaissances sur le fonctionnement des élevages doivent être à la fois mises en lien avec l'année présentée mais l'éleveur doit garder à l'esprit l'année moyenne sur laquelle il a travaillé précédemment. Il s'agit de répondre à la question « Etant donné le système que j'ai (i.e. les ressources dont je dispose et la structure qui m'est imposée) qu'est-ce que je fais dans cette situation climatique particulière ? Est-il nécessaire que je remette en cause ma stratégie ? ».
- Dans le troisième atelier, l'éleveur mobilise ses connaissances et son savoir-faire pour les mettre en lien avec l'année moyenne, l'année qu'il a déjà étudiée, et le climat qui se déroule devant lui. A chaque fois que le climat pour la période est présenté, il s'agit de répondre à la question « Etant donné le système que j'ai et le climat dans lequel je suis (la situation moyenne et sa variabilité possible), qu'est-ce que je fais pour profiter de cette situation climatique particulière tout en conservant le maximum de possibilités pour les périodes suivantes? ».

Même si les ateliers suivent les mêmes phases (présentation du climat d'intérêt et propositions d'adaptations, conception du système et évaluation du système), ils se distinguent par leurs objectifs et leur déroulement (Tableau 21).

L'atelier 1, ou « atelier changement » débute par l'appropriation de l'outil de conception par les participants. Des supports pour représenter le climat et l'exploitation sont utilisés. Le cas échéant un modèle de simulation ainsi qu'un modèle d'évaluation peuvent être utilisés. Les participants doivent concevoir un système pour le climat moyen actuel ; ils peuvent notamment reproduire un système

existant comme par exemple leur exploitation. Ce temps permet aux participants de prendre connaissance de l'outil, de ses contraintes et de ses limites sans avoir à se projeter dans un contexte nouveau (climat, système de production). L'atelier 1 se poursuit par la construction d'un système à priori adapté au climat moyen futur. Il s'agit principalement de fixer les dimensions du système.

Tableau 21 : Particularités de chaque atelier.

	Atelier 1	**Atelier 2**	**Atelier 3**
Introduction à l'atelier	- 30 min - Tour de table - Présentation des 3 étapes (les 3 ateliers) - Présentation de l'outil	- 15 min - Rappel de l'atelier précédent et des 3 étapes - Présentation des nouveautés de l'outil	- 2 min - Rappel des ateliers précédents et des 3 étapes
Tours de jeu	- Passé: 1h30 - Futur: 25 min	- 1h40	- 2h
Situation de conception	- 2 années à traiter - Moyenne du passé - Moyenne du futur - Toute l'année étant connue	- 1 année à traiter - Année de la variabilité normale du futur - Toute l'année étant connue	- 1 année à traiter - Année du climat futur - « en situation »
Objectif	- Dimensionner un système à l'équilibre	- Conduire le système	- Conduire le système
Outil *grain temporel* *grain spatial* *grain de conduite* Itinéraire technique Ration et vêlages stocks Pâturage	 - 4 semaines - Metaparcelle - la metaparcelle. - le lot - quantité dans la grange par « grand » type de stock - pas de possibilité de gérer le pâturage	 - 1 semaine - Metaparcelle - la metaparcelle. - le lot - quantité dans la grange par « grand » type de stock le lot x metaparcelle	 - 1 semaine - Metaparcelle - la metaparcelle. - le lot - quantité dans la grange par « grand » type de stock le lot x metaparcelle
Discussion de synthèse collective	–	–	–
Questionnaire individuel	- Quelles adaptations aimeriez-vous tester la prochaine fois?	- Qu'ont permis les modifications de l'outil?	- Si vous deviez supprimer un atelier, ce serait lequel? - Si vous deviez garder un atelier, ce serait lequel?

L'atelier 2, ou « atelier variabilité » a pour but d'affiner et de mettre à l'épreuve le système conçu dans l'atelier 1. L'objectif est d'obtenir un système d'élevage adapté à la variabilité normale du climat futur. Les participants détaillent la tactique du système initial pour une année climatique qui n'est ni moyenne ni exceptionnelle. Les participants peuvent également modifier la gestion stratégique du système initial.

L'atelier 3, ou « atelier variabilité + mise en situation » a pour but d'affiner et de mettre à l'épreuve le système conçu dans les ateliers précédents. L'objectif est la conduite « en situation » du système en question. Il ne s'agit plus de concevoir la gestion stratégique du système mais de la tester dans une situation proche de la réalité, c'est-à-dire pour laquelle la météo n'est pas connue à l'avance alors que le climat moyen et la gamme de variabilité du climat le sont. L'année est dévoilée au fur et à mesure de l'atelier (mois par mois). Le participant ne peut alors pas raisonner en

considérant l'année climatique dans son intégralité. Il ajuste alors le système initial en fonction de la situation actuelle mais aussi en fonction de l'incertitude qui est portée sur le climat à venir ; c'est à dire en fonction de l'intervalle de variation du climat. L'année support à cet atelier est choisie selon les conditions du projet de recherche (objectifs scientifiques, objectifs appliqués, outils de conception et d'évaluation utilisés). Utiliser une année climatique non extrême permet d'évaluer si le système conçu est adapté au climat futur en prenant en compte des contraintes réalistes de gestion (irréversibilité des décisions, incomplétude de l'information). Utiliser une année climatique extrême permet d'évaluer la capacité d'adaptation du système face aux aléas climatiques extrêmes, en prenant en compte les mêmes contraintes réalistes de gestion. La définition du caractère extrême d'une année climatique dépend des objectifs du projet ; elle peut porter sur des indicateurs climatiques primaires (précipitations, nombre de jours de gels, nombre de jours avec température >25°C) ou sur des indicateurs agroclimatiques (production annuelle, disponibilité d'herbe au printemps…). Les participants n'ont pas connaissance du caractère extrême ou non de l'année support pendant l'atelier.

2.1.2. *Les supports pour la conception*

L'atelier 1 a mobilisé le Rami Fourrager (Martin, *et al.* 2011), outil de conception de scénario de systèmes d'élevage herbager. Le Rami Fourrager prend la forme d'un jeu de plateau et permet la valorisation de l'expertise des agriculteurs, conseillers et chercheurs (Figure 17).

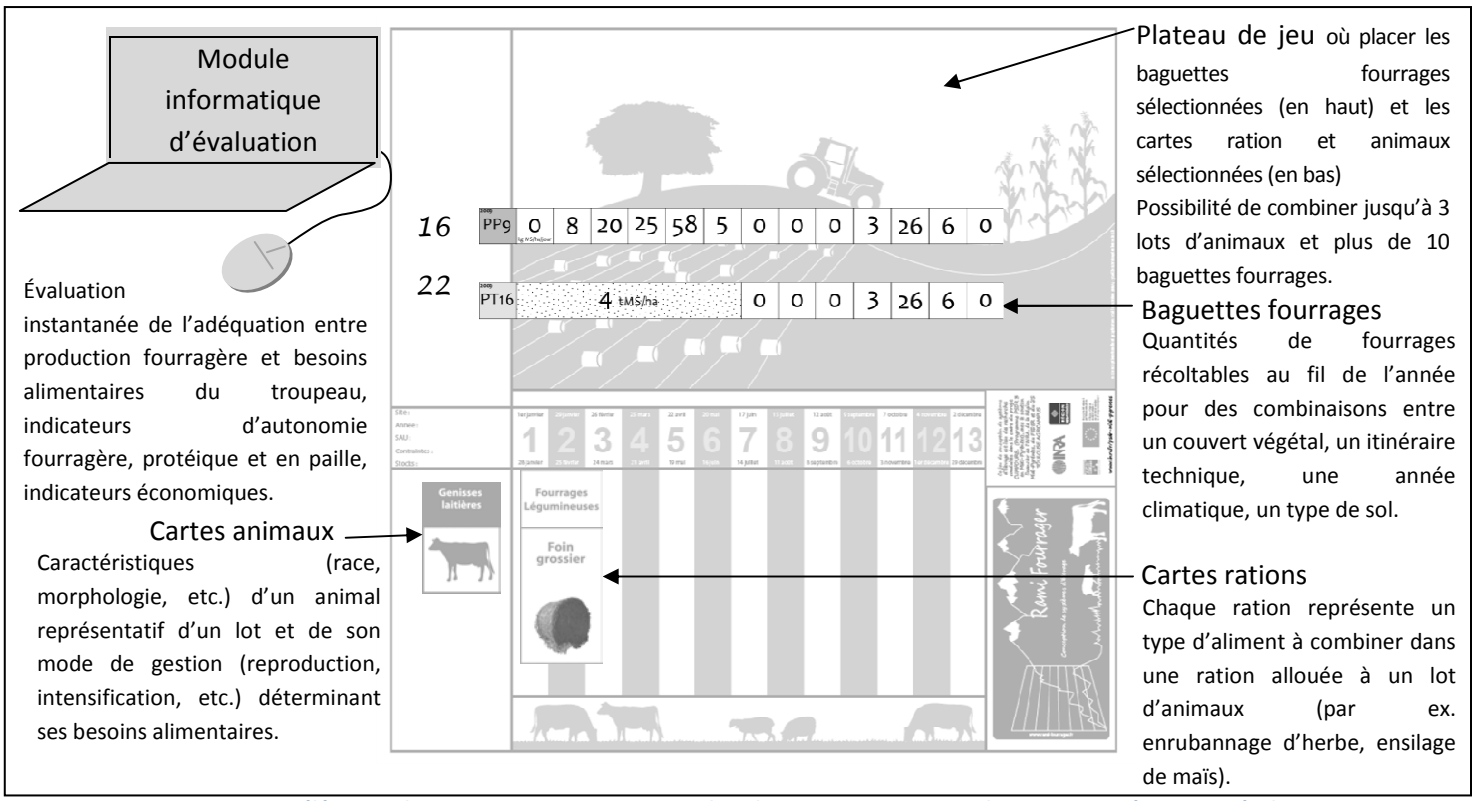


Figure 17 : Cinq éléments du Rami Fourrager que manipulent les participants aux ateliers pour représenter et évaluer un élevage d'après Piquet et al. (2013). Tous ces éléments sont adaptables pour chaque contexte local (sol, climat, pratiques, espèces cultivées, etc.).

Le Rami Fourrager repose sur des supports informatifs (sur le climat passé et futur) et interactifs (sur les entités biologiques gérées -cultures, prairies et animaux-) qui matérialisent différentes composantes d'un système d'élevage herbager et de son environnement. Les supports interactifs

sont des objets qui peuvent être manipulés par les joueurs. Les supports informatifs et interactifs sont des objets intermédiaires car ils sont des vecteurs de communication entre les joueurs et les chercheurs (Duru and Martin-Clouaire 2011). Ils peuvent être support à la conception et support à l'évaluation du système. Les informations qu'ils contiennent sont utilisées soit en tant que telles soit par comparaison à une situation de référence (année moyenne, exploitation type…).

Les supports informatifs et interactifs sont obtenus par expertise ou par simulation :

- L'**environnement** du système d'élevage est caractérisé par le climat. Celui-ci est représenté par des supports informatifs : données météorologiques moyennes du climat passé et du climat futur ; profil saisonnier de croissance de l'herbe pour ces climats. Ces supports informatifs relatifs au climat doivent donner à la fois des informations sur la disponibilité de la ressources fourragère et sur son accessibilité. Ils doivent renseigner les contraintes climatiques en lien avec la gestion sur une année de l'élevage (car la conception se fait pour 1 an) avec une précision d'au moins 4 semaines (car la conception et l'évaluation se fait au grain de 4 semaines). En cela, les indicateurs d'exposition que nous avons proposé dans la Partie II de cette thèse ne peuvent pas être utilisés comme support informatifs dans nos ateliers. En effet, ils ne permettent pas de caractériser la météo d'une année climatique au grain de 4 semaine (ce sont des indicateurs à l'échelle de la saison) et ne tiennent pas compte de l'accessibilité de la ressource fourragère. En revanche, des supports informatifs montrant les températures journalières, les précipitations et le bilan hydrique climatique peuvent renseigner sur la portance du sol ou sur des risques de gels ou de neige. Par ailleurs, ces mêmes supports permettent aux participants de comprendre certains ralentissements, arrêts ou reprises de croissance de l'herbe qui sont reportés sur le support profil de croissance de l'herbe. Il est également possible de représenter le contexte socio-économique par des types de systèmes d'élevage (structures, composantes du revenu agricole).
- Le **système fourrager** est matérialisé par le plateau de jeu (Figure 17). Il est divisé horizontalement en 13 périodes de quatre semaines, soit une année.
- Les **entités biologiques gérées** (cultures, prairies et animaux) sont considérées au travers de supports interactifs (cartes rations, baguettes[*] indiquant la disponibilité en ressources fourragères par combinaison entre un type de couvert et un itinéraire technique, et pour un climat spécifié, etc.). Ceux-ci sont des vecteurs de communication entre les joueurs et les chercheurs (Figure 17). Ces supports interactifs sont présentés, puis mis à disposition des joueurs.
- La **cohérence technique** des systèmes conçus est évaluée en cours de l'atelier par des modèles numériques permettant de calculer des bilans fourragers. Un module sur logiciel Excel permet d'évaluer et de visualiser l'adéquation entre production fourragère et besoins alimentaires des animaux tout au long de l'année, à l'échelle de 4 semaines.

Pour les ateliers 2 et 3, nous avons effectué plusieurs modifications du Rami, avec l'objectif d'augmenter les possibilités offertes par l'outil pour adapter le système face à la variabilité du climat. En effet, une première expérience nous a permis d'identifier plusieurs limites à l'utilisation de la version classique du Rami dans notre démarche en trois ateliers (non publié). Le Rami classique suffit pour faire émerger des modifications de stratégie (chargement, utilisation des sols, conduite du

[*] Une baguette est une frise dont les cases correspondent à une période de l'année

système d'élevage) pour s'adapter au changement climatique moyen (e.g. Martin *et al.*, 2011) mais la représentation du système fourrager et de sa conduite sont trop simplifiées pour permettre la représentation et l'évaluation d'adaptations tactiques pour faire face à la variabilité climatique. Par exemple, la gestion du pâturage (date de mise à l'herbe, périodes de plein pâturage) est représentée à l'échelle de quatre semaines, ce qui est trop fruste pour traiter d'une adaptation pour une année particulière, notamment concernant la période de printemps, considérée comme la période pendant laquelle les décisions sont les plus importantes. De plus, l'ensemble des animaux (chaque lot) est considéré comme ayant accès à toutes les surfaces de l'exploitation, ce qui n'est plus pertinent si l'on veut représenter la conduite du système fourrager et ses modifications pour faire face à la variabilité climatique (allocations dynamique des lots sur certaines surfaces).

Nos modifications de l'outil sont les suivantes :

- **Prendre en compte la flexibilité apportée par la gestion des stocks** par la représentation des stocks fourragers sur la table de jeu (tout type d'aliments confondu). Des « cartes stocks » sont entreposées dans la « grange » pour être ensuite distribuées par les participants à chaque période de 4 semaines. Une récolte ou un achat augmente la quantité de cartes stocks dans la grange. Le module d'évaluation n'a pas été modifié. Aussi, il n'est pas possible de représenter la distribution aux animaux d'un aliment stocké ; l'évolution des stocks dans le temps est calculée automatiquement à partir de la ration choisie et des besoins des animaux.
- **Mieux prendre en compte la variabilité intra-annuelle de la croissance de l'herbe** par un découpage de l'année qui mette en valeur les périodes charnières dans la gestion de la ressource fourragère (printemps et automne). Ce découpage est différent d'une année à l'autre en fonction des dates de début et fin de printemps et d'automne. Le découpage en périodes de 4 semaines est conservé et peut être réduit à un découpage par période de 1 semaine lorsque la variabilité de la pousse de l'herbe est la plus forte (printemps, début d'été, automne le cas échéant). En conséquence, les baguettes fourrages ont des cases dans lesquelles il est inscrit la production journalière moyenne de biomasse soit sur 1 semaine, soit sur 4 semaines. De même, le module d'évaluation a été modifié : la ration est définie pour chaque semaine et l'évaluation de la satisfaction des besoins des animaux est évaluée à l'échelle de la semaine.
- **Mieux prendre en compte la flexibilité apportée par la gestion du pâturage via la gestion des lots** par la possibilité de déplacer des lots d'une métaparcelle[*] à l'autre. Pour chaque lot, les participants disposent un pion sur une case (i.e. une période) d'une baguette fourrage pour signifier soit l'entrée et soit la sortie du lot sur la métaparcelle. Le module d'évaluation a été modifié de sorte que la satisfaction des besoins des animaux ne soit plus évaluée à partir de l'ensemble de la biomasse disponible au pâturage sur l'exploitation mais uniquement à partir de la biomasse disponible des parcelles sur lesquelles est placé le lot.

[*] Métaparcelle : groupe de parcelles ayant le même couvert et le même itinéraire technique. La métaparcelle est l'entité primaire de gestion des surfaces dans le Rami Fourrager; elle est matérialisée par une baguette fourrage.

2.2. Cas d'étude

2.2.1. Scénario de conception

Pour s'affranchir de la difficulté pointée par Adger *et al.*, (2005) de dissocier les adaptations au changement climatique des adaptations à d'autres changements de contexte (démographique, culturel, économique, technologique), nous avons considéré une situation virtuelle dans laquelle seules les conditions climatiques changent. Contrairement à des travaux qui se projettent aussi dans des modifications de contexte socio-économique (cf. Martin, *et al.* (2011)), nous nous sommes uniquement focalisés sur les adaptations au changement climatique.

2.2.2. Zone et système d'étude

Notre zone d'étude est la petite région agricole de l'Aubrac, zone d'élevage extensif de moyenne montagne, située dans le sud du Massif Central, en Aveyron (France). Les exploitations sont principalement des exploitations d'élevage bovin, situées entre 900 et 1300m d'altitude. Les précipitations annuelles moyennes sont de 1400mm et le déficit moyen annuel est de 550mm. La sole est composée majoritairement de prairies temporaires (82 % de la SAU) et de prairies permanentes (15 % de la SAU). Il n'y a pas de cultures annuelles. En 2010, la SAU moyenne des exploitations en Aubrac est de 78 ha (Agreste, 2010[*]). En élevages laitiers, la race majoritaire est la Simmentale et en élevage à viande ce sont les races Limousine et Aubrac. Les élevages de bovins viande pratiquent la transhumance.

Le système de production étudié est la production bovine laitière. Les exploitations laitières, plus que les exploitations allaitantes, doivent maintenir un niveau de production constant d'un jour à l'autre à partir de ressources fourragères dont la disponibilité est très variable au sein d'une année (variations saisonnières) et d'une année à l'autre (variabilité interannuelle).

Dans la zone Aubrac, les élevages laitiers sont dans le périmètre de l'AOC de Laguiole. Ainsi, le lait peut être vendu à la coopérative Jeune Montagne afin de le transformer en fromage au lait cru. Le lait utilisé pour le fromage de Laguiole suit un cahier des charges qui porte à la fois sur la qualité du lait et sur les pratiques d'élevage. Concernant les pratiques, le lait doit provenir d'une vache Simmental ou Aubrac, le niveau de production par vache ne doit pas dépasser 6000L de lait par an, et les fourrages utilisés pour l'alimentation doivent être produits sur la zone. L'ensilage d'herbe et de maïs sont interdit. Par conséquent, le pâturage y est fortement encouragé.

2.2.3. Classification et choix des années

Nous avons choisi de travailler sur un horizon lointain (2085) plutôt qu'un horizon moyen (2050) car les différences de climat et donc de disponibilité fourragère avec la situation passée sont plus marquées lorsque l'on considère l'horizon lointain. Lors d'une première application de la méthode pour des scénarios à 2050 (non publié), nous avions constaté que les différences générées par les modifications du climat n'excédaient pas la variabilité actuelle du climat et que les adaptations misent en place étaient à la marge, de l'ordre d'adaptations incrémentales. Le travail de conception n'étaient pas stimulant ni pour les éleveurs ni pour les scientifiques.

[*] http://agreste.agriculture.gouv.fr/recensement-agricole-2010/resultats-donnees-chiffrees/

Les années climatiques utilisées lors des ateliers proviennent :

- de l'extrapolation des données de point de grille 12x12km fournies par Météo-France pour les années passées, et,
- des simulations climatiques faites par Météo France à l'aide du modèle ARPEGE-Climat (Déqué, *et al.* 1994) qui ont été régionalisées à l'échelle 8x8km par le CERFACS à l'aide de la méthode Boé08 (Pagé, *et al.* 2008) pour les années futures.

Les fonctions de répartition de la production fourragère annuelle du passé et du futur nous ont permis d'établir des seuils d'écart à la moyenne selon lesquels nous qualifions une année de fréquente, moyenne ou exceptionnelle. Une année moyenne a une production fourragère annuelle écartée à moins de 0,5 écart type de la moyenne, une année fréquente a une production fourragère écartée à moins de 1,5 écart type de la moyenne et une année exceptionnelle est une année écartée à plus de 1,5 écart type de la moyenne (Figure 18)

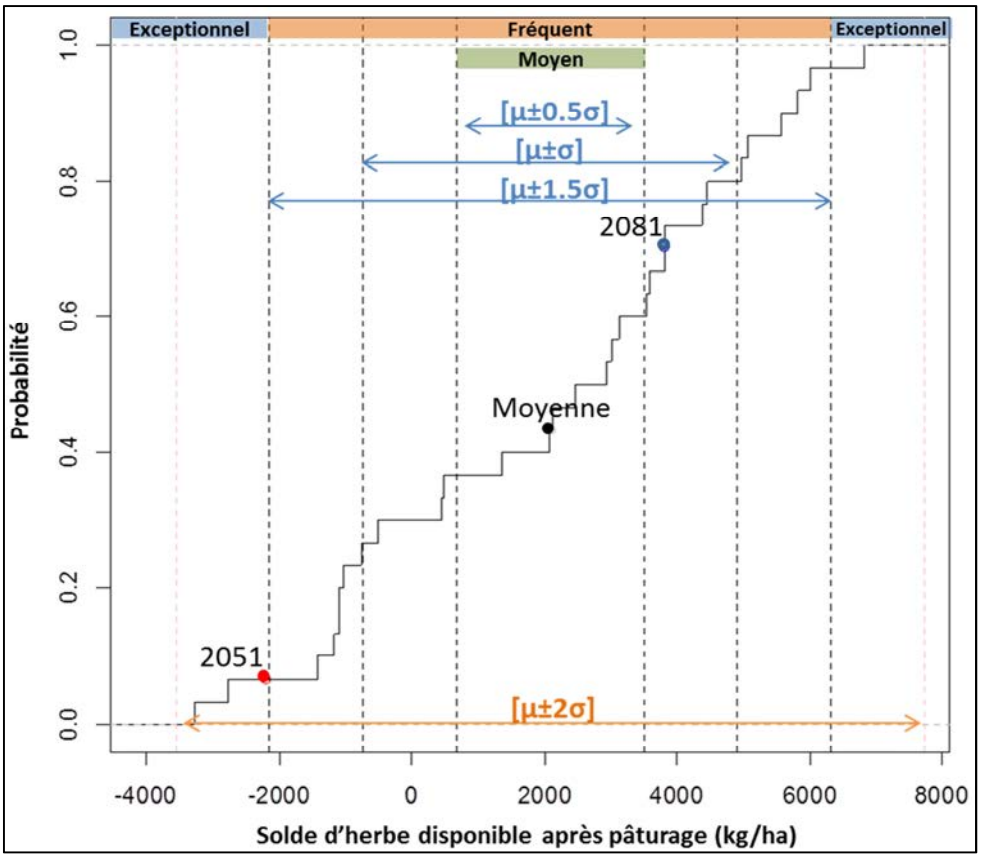


Figure 18 : Fonction de répartition empirique du bilan annuel entre 2070 et 2100. en bleu : 2081 (atelier 2), en noir : moyenne du futur (atelier 1), en rouge : 2051 (atelier 3). Lignes horizontales : intervalles « moyenne ±0,5 écarts types », « moyenne ±1ET », « moyenne ±1,5ET », « moyenne ± 2ET ».

Les années moyennes passées et futures (atelier 1) ont été reconstruites à partir des deux jeux de données (passé et futur). Les températures moyennes journalières et le rayonnement quotidien ont été calculés en réalisant leurs moyennes journalières sur les périodes considérées (passé : 1980-2009, futur : 2070-2100) (Tableau 22). Pour représenter une occurrence réaliste des précipitations sur l'année (le calcul des précipitations journalières moyennes sur 30 ans uniformise la répartition des pluies sur l'année), les précipitations ont été reprises d'une année dont les productions

fourragères annuelle et saisonnière étaient moyennes (écartées à moins d'1/2 écart type de la moyenne) pour la période considérée.

Les années des ateliers 2 et 3 ont été choisies parmi les simulations climatiques de la période 2030- 2100 comme pouvant présenter des difficultés de gestion par rapport à la situation moyenne. Un premier tri a été réalisé à partir des indicateurs d'exposition présentés dans la Partie II. Nous avons sélectionné les années à partir de l'indicateur « production fourragère annuelle », calculé pour chaque année et comparé à l'échantillon 2070-2100. Pour l'atelier 2 nous avons sélectionné les années fréquentes mais pas moyennes (entre 0,5 et 1 écart type de la moyenne). Pour l'atelier 3, comme nous voulions tester la robustesse de la stratégie et de la conduite adoptée face à l'ensemble de la variabilité climatique future, nous avons sélectionné les années exceptionnelles en termes de production annuelle fourragère (écart à la moyenne supérieur à 1,5 écarts type) (Figure 18). Les années retenues ont été sélectionnées par comparaison visuelle de leur profil de croissance de l'herbe avec celui en année moyenne, avec identification de périodes critiques. Il peut s'agir d'un décalage des périodes de production d'herbe (printemps plus précoce pour les années de l'atelier 2 et de l'atelier 3), de fortes précipitations à un moment donné pouvant empêcher la fauche ou le pâturage (atelier 2), une forte croissance de l'herbe (atelier 2), une longue période sans croissance de l'herbe (atelier 3), un arrêt momentané et inopiné de la pousse de l'herbe (atelier 2 et atelier 3).

Tableau 22 : Années support à chaque atelier : origines, précipitations annuelles, concentration de CO_2 atmosphérique et coefficient de correction d'utilisation de rayonnement.

Année	Calcul Origine	Précipitations	CO_2 (ppm)	Correction de l'efficacité d'utilisation du rayonnement
Moyenne passé	Moyennes journalières des températures, du rayonnement et de l'ETP sur la période 1980-2009 Précipitations de l'année 2009	1200 mm	550	1
Moyenne futur	Moyennes journalières des températures, du rayonnement et de l'ETP sur la période 2070-2100 Précipitations de l'année 2082	1600 mm	650	1,2
Atelier 2	2081 printemps moyen, forte repousse d'automne mais qui n'est pas accessible à priori (beaucoup de précipitations)	1150 mm	650	1,2
Atelier 3	2051 été très long + déficit de printemps	810 mm	650	1,2

Par rapport à l'année moyenne du passé, la disponibilité fourragère annuelle est supérieure de 27 % pour l'année moyenne du futur. En outre, l'année moyenne du futur a un printemps et un été plus précoces ainsi qu'un hiver plus tardif que l'année moyenne du passé (Tableau 21).

Par rapport à l'année moyenne du futur, l'année support à l'atelier 2 (année 2081) est plus favorable sur le critère de la disponibilité fourragère annuelle (+19 % de disponibilité fourragère annuelle). Elle est classée 11éme sur 31 années selon la disponibilité fourragère décroissante. Son printemps est plus tardif que celui de l'année moyenne du futur et son été et son hiver sont plus précoces (Tableau 23).

Enfin, l'année support à l'atelier 3 (année 2081, Tableau 23) a une disponibilité fourragère annuelle inférieure à la moyenne du futur (-48 % de la disponibilité fourragère annuelle). Elle est classée 30ème sur 31 années selon la disponibilité fourragère décroissante. Son printemps est plus

précoce que celui de l'année moyenne du futur, son été est plus précoce et son hiver plus tardif (Tableau 23).

Tableau 23 : Années support à chaque atelier selon les indicateurs d'exposition : date de printemps, date d'été, date d'hiver et herbe disponible sur l'année. Zone Montagne.

	Année	Date print •	Date été•	Date hiver•	Différence d'herbe disponible • *(tMS/ha par rapport à l'année moyenne passé ; % par rapport au passé ; % par rapport au futur)*	Chargement potentiel ¤ (EqVL/ha)	Rang, selon le critère de la quantité d'herbe disponible au pâturage †
	Moyenne passé	5 avril	3 août	18 octobre	*NB, ref=6,9*	*Ref :1,5*	NA
	Moyenne futur	14 mars	18 juillet	28 octobre	+2,1 *; +27% ; NA*	+ 0,4	NA
2081	Atelier 2	23 mars	19 juin	20 octobre	+3,8 *; +53% ; +19%*	+ 0,8	11/31 des années futures i.e. 60% des années ont un bilan plus faible
2051	Atelier 3	22 février	4 juillet	10 novembre	-2,2 *; -33% ; -48%*	- 0,5	30/31 des années futures i.e. 3% des années ont un bilan plus faible

• : calculé selon la méthode de Sautier, *et al.* (2013), avec : couvert de type B, pâturage tournant, indice de fertilisation=0,8, période de référence : 1980-2010.

¤ : Chargement potentiel = Production annuelle/4,75. 4,75 tonnes étant la quantité de matière sèche consommée par un équivalent vache laitière.

† : sur la période 2070-2100, soit 31 années

2.2.4. Objets intermédiaires utilisés

Système d'élevage

Des enquêtes préalables auprès de quatre éleveurs (dont trois participeront aux ateliers) ont permis d'identifier différentes pratiques de conduite du système d'élevage sur cette zone de Montagne. Les vêlages sont soit étalés sur l'année, soit groupés (en hiver, au printemps ou en automne) ; l'âge au premier vêlage est de 36 mois, et le niveau de production est entre 4500 et 5500 litres de lait par vache et par an.

Les cartes « animaux » que nous avons proposées dans les ateliers permettent de construire la conduite du système d'élevage en combinant :

- un niveau de production : 4000, 5000, 6000 ou 7000 L de lait/vache/an,
- une date de vêlage : janvier, février, novembre ou étalé sur l'année,
- un âge au premier vêlage : 24 ou 36 mois.

Système fourrager

Les baguettes fourrage disponible lors du premier atelier ont été construites à partir d'enquêtes auprès de trois éleveurs (dont deux participeront aux ateliers). Ces enquêtes ont permis d'identifier les principaux types de couverts présents sur la zone et les itinéraires techniques pratiqués pour chaque couvert. Les 18 baguettes fourrage du premier atelier représentent 15 types de prairies permanentes conduits selon 1 à 2 itinéraires techniques (Tableau 24). Aucune baguette ne représente d'autre type de couvert que la prairie permanente (prairie temporaire, céréales, maïs, dérobées…).

Tableau 24 : Diversité des baguettes disponibles et des baguettes utilisées dans chaque atelier.

		A1passé		A1futur		A2		A3		Bilan : Sur les 3 ateliers	
		Dispo.	Util.	Dispo.	Util.	Dispo.	Util.	Dispo.	Util.	Dispo.	Util.
Nombre de baguettes		18	6	18	5	30	6	30	6	32	11
Nombre de grands types de couverts		1	1	1	1	2	1	2	1	2	1
Nombre de couverts		15	6	15	5	20	6	20	6	20	9
Nombre d'utilisations par couvert	Min	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Max	2	1	2	1	3	1	3	1	3	2

Les baguettes fourrage disponibles pour les ateliers 2 et 3 ont été enrichies par l'ajout de baguettes représentant des conduites irriguées et par des baguettes représentant des prairies temporaires. En effet, les entretiens ne nous ont pas permis de mettre en évidence la pratique de l'irrigation alors qu'elle est pratiquée par un des trois éleveurs ayant participé à l'atelier 1. En outre, un quatrième éleveur dont les couverts étaient différents (à savoir avec une forte part de prairies temporaires) de ceux des trois éleveurs enquêtés initialement s'est ajouté aux ateliers après que le premier atelier ait eu lieu. Les 30 baguettes fourrage du deuxième et du troisième atelier représentent 20 types de prairies (permanentes ou temporaires) conduit selon 1 à 3 itinéraires techniques (Tableau 24).

Environnement du système

L'environnement du système est uniquement caractérisé par l'année climatique considérée pour la construction ou pour la conduite du système. Aucune indication sur le contexte socio-économique n'est donnée au cours des ateliers, avec l'intention de limiter les discussions et les adaptations imaginées à des adaptations au changement climatique.

Nous avons choisi de présenter l'année climatique aux participants à partir de trois supports différents, expliqués et discutés en début d'atelier et laissés sur le plateau de jeu tout le long de l'atelier. Le premier est un graphique représentant à la fois l'évolution de la température journalière moyenne du 1er janvier au 31 décembre et l'évolution de l'eau disponible dans le sol pour un sol superficiel (40 mm) et pour un sol profond (80 mm) (Figure 19, Figure 21, Figure 24 et Figure 27). Le second est un histogramme qui représente le cumul de précipitations pour chaque période de 4 semaines (ce qui correspond au découpage de l'année selon le Rami Fourrager) ; le cumul annuel de précipitations est également inscrit (Figure 20, Figure 22, Figure 25 et Figure 28). Le troisième est un graphique représentant le profil de croissance d'une prairie type de la zone, pâturée du 1er janvier au 31 décembre (profil obtenu par simulation). Seule la courbe relative à l'année moyenne du passé est utilisée dans le premier temps de l'atelier 1 (situation passée). Dans le deuxième temps de l'atelier 1 (situation future), les courbes de l'année climatique moyenne du futur et du passé sont données (Figure 23). Dans les ateliers 2 et 3, les courbes de l'année étudiée et de l'année moyenne du futur sont données (Figure 26 et Figure 29).

L'année climatique considérée est également prise en compte dans les baguettes fourrages. En effet, chaque baguette donne la quantité d'herbe disponible (en kgMS/ha/jr pour le pâturage et en tMS/ha pour les fauches) selon le type de couvert, l'itinéraire technique et l'année climatique.

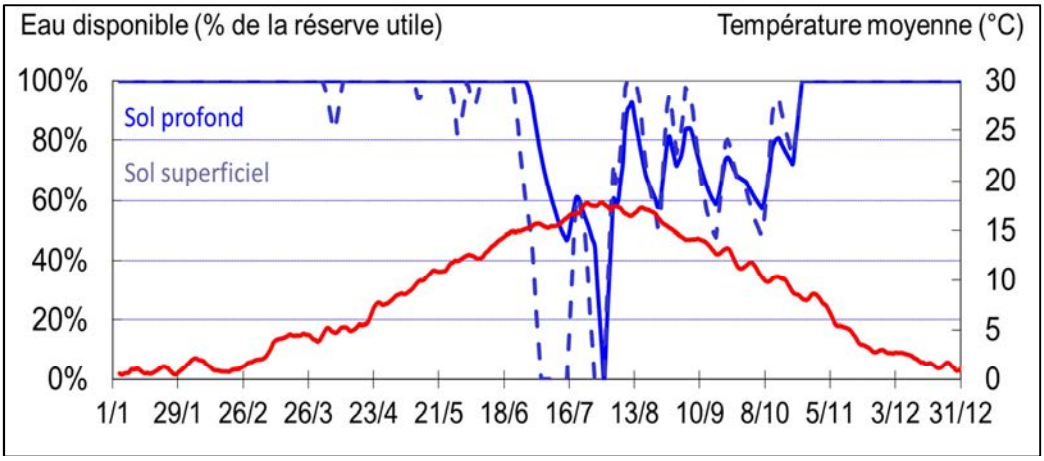


Figure 19 : Frise climat utilisée en atelier 1 (climat passé). Eau disponible dans le sol et des températures moyenne de l'année moyenne du passé à Laguiole.

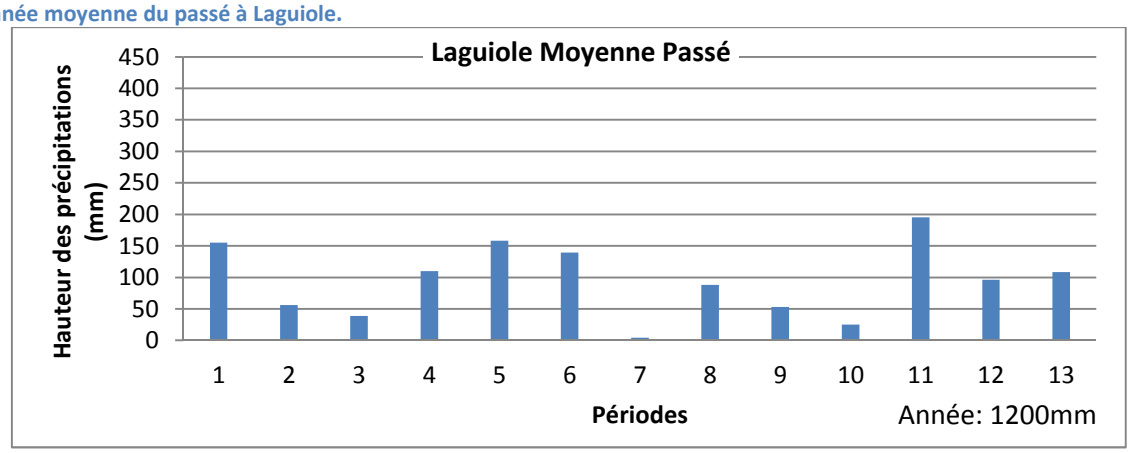


Figure 20 : Histogramme des précipitations de l'année climatique moyenne du passé utilisé en atelier 1.

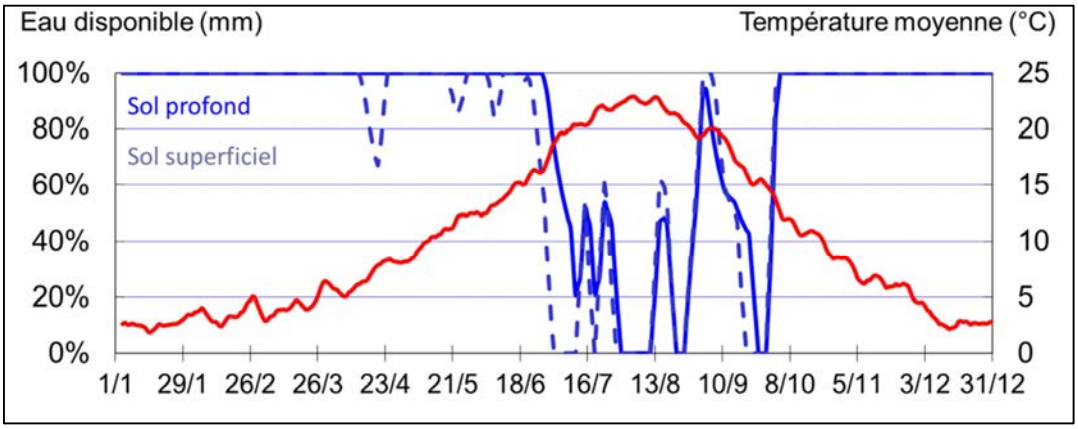


Figure 21 : Frise climat utilisée en atelier 1 (climat futur). Eau disponible dans le sol et des températures moyenne de l'année moyenne du futur à Laguiole.

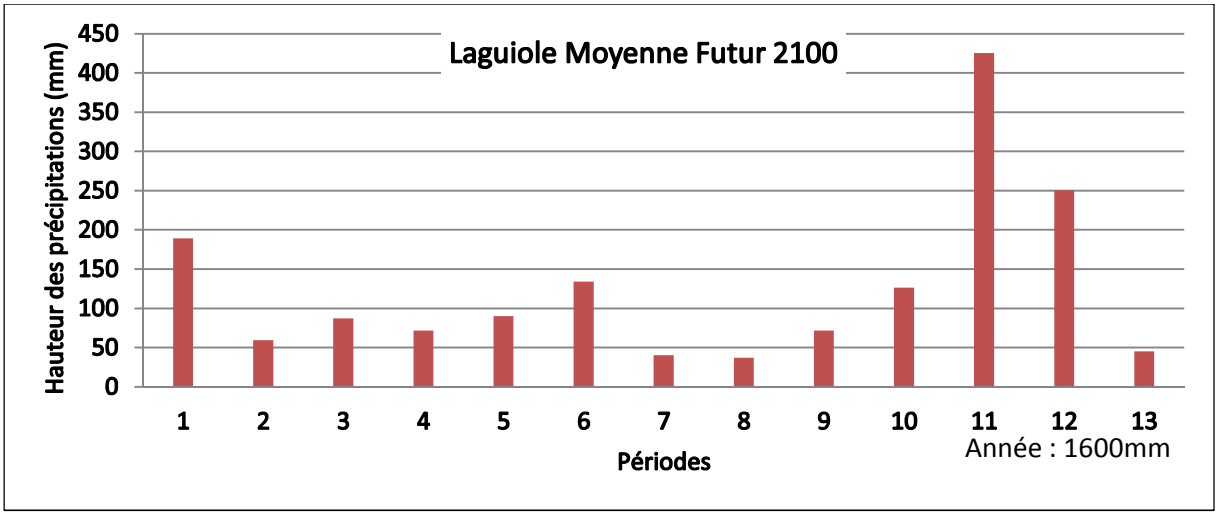


Figure 22 : Histogramme des précipitations de l'année climatique moyenne du futur utilisé en atelier 1.

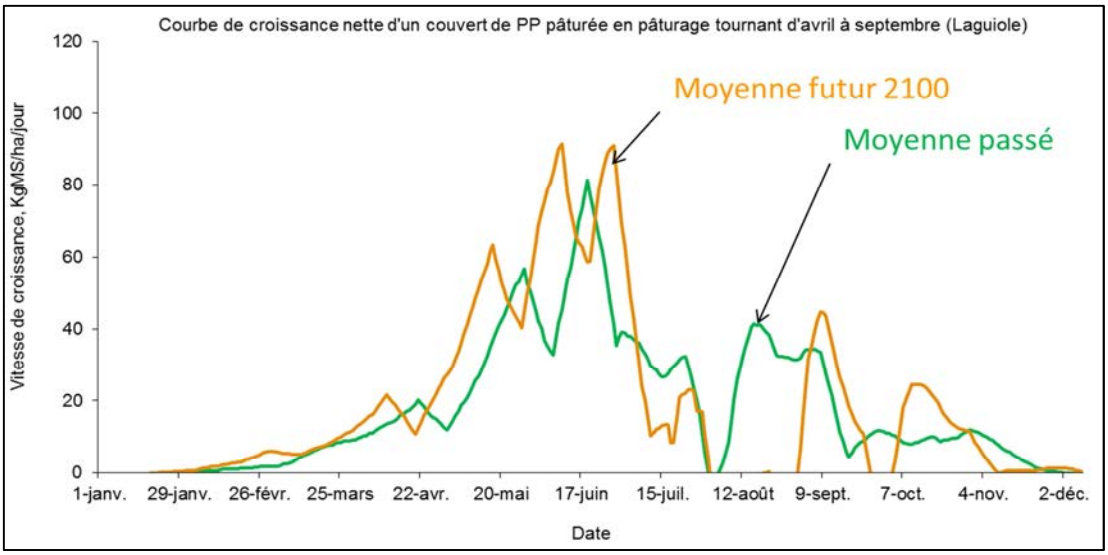


Figure 23 : Courbes de vitesse de croissance utilisées en atelier 1. Année climatique moyenne du passé (vert) et année climatique moyenne du futur (orange).

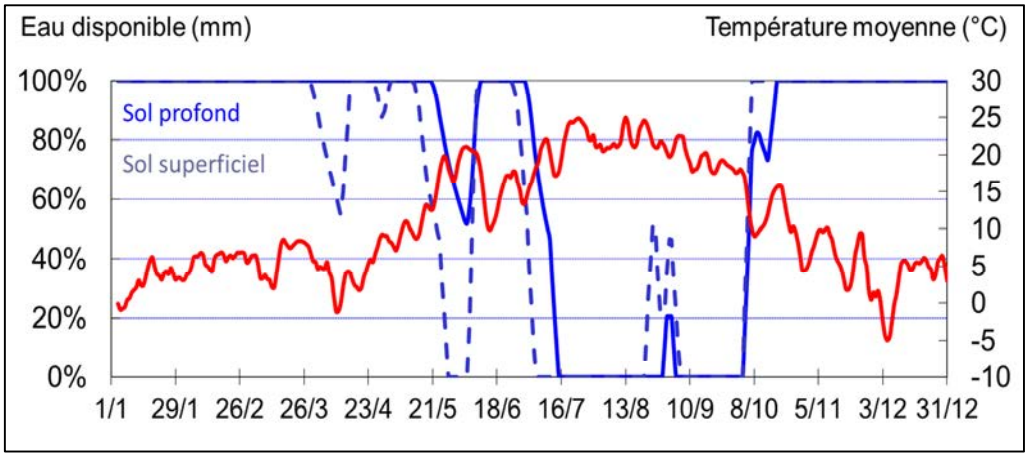


Figure 24 : Frise climat utilisée en atelier 2. Eau disponible dans le sol et des températures moyenne de l'année d'intérêt.

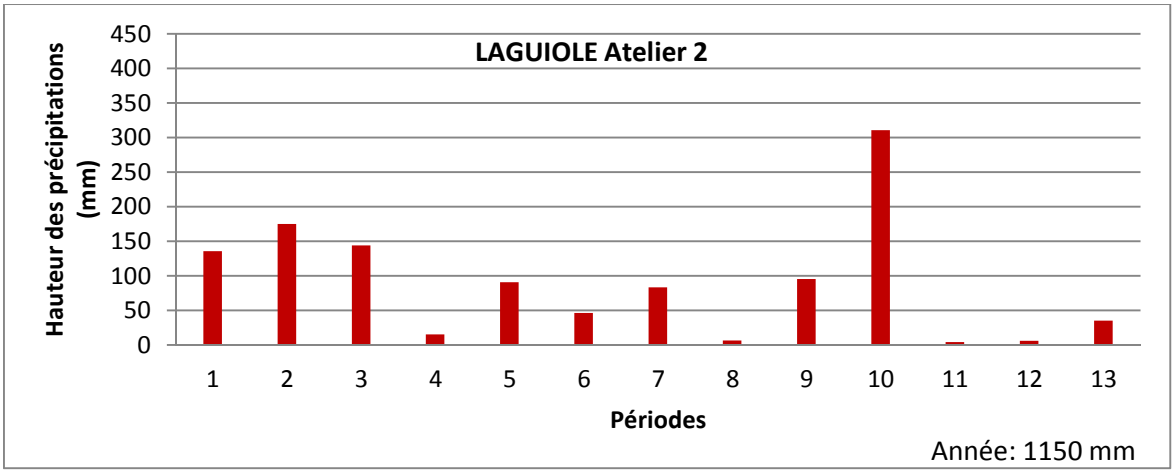


Figure 25 : Histogramme des précipitations de l'année climatique utilisé en atelier 2.

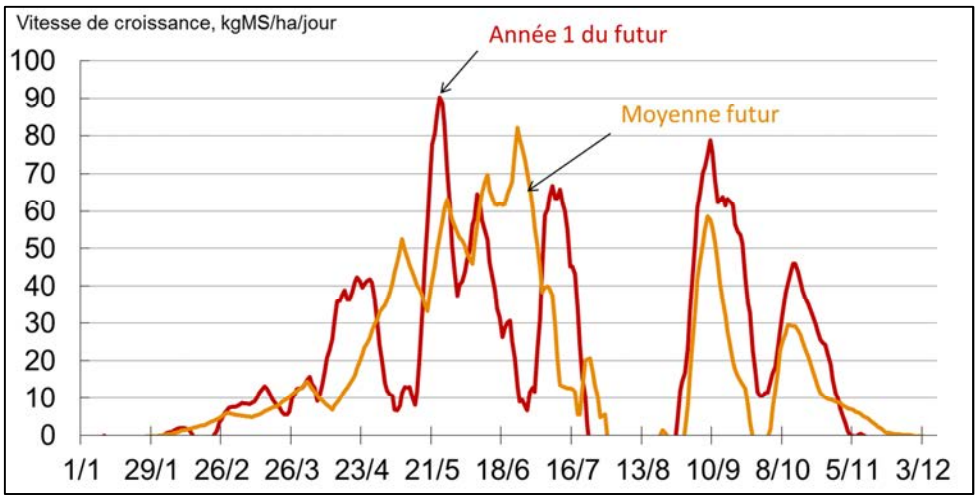


Figure 26 : Courbes de vitesse de croissance utilisées en atelier 2. Année climatique moyenne du futur (orange) et année d'intérêt (rouge).

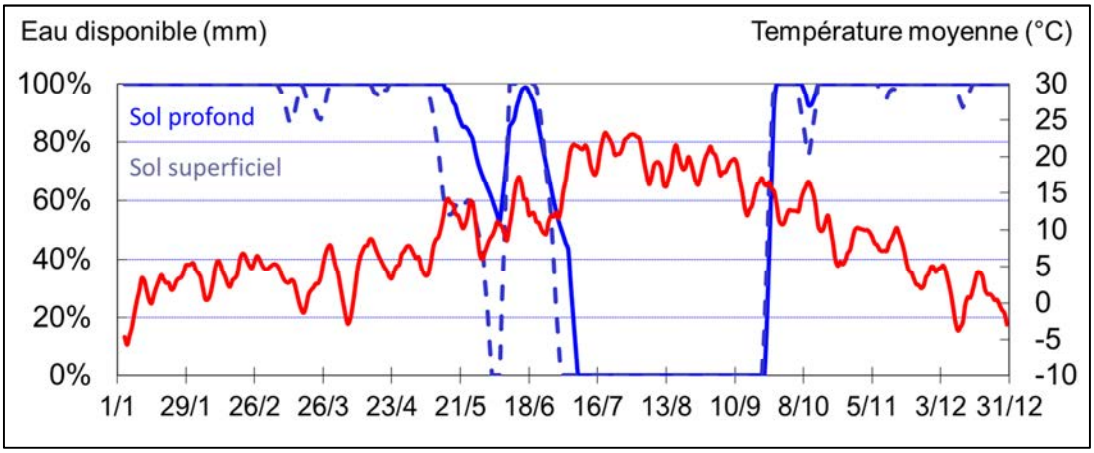


Figure 27 : Frise climat utilisée en atelier 3. Eau disponible dans le sol et des températures moyenne de l'année d'intérêt.

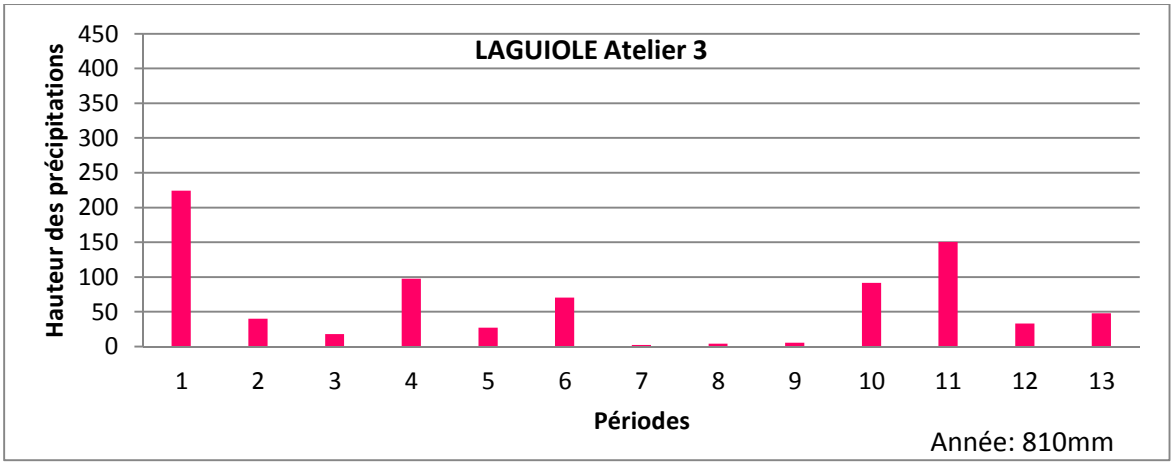


Figure 28 : Histogramme des précipitations de l'année climatique utilisé en atelier 3.

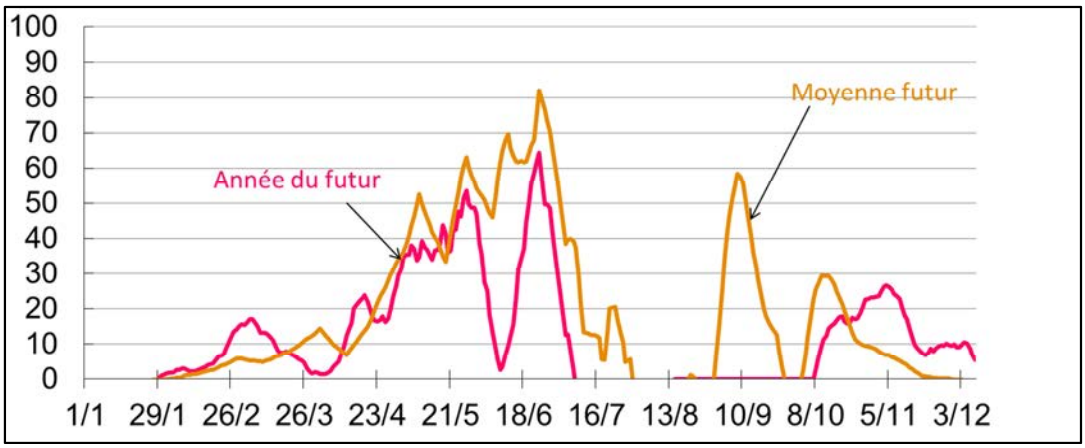


Figure 29 : Courbes de vitesse de croissance utilisées en atelier 3. Année climatique moyenne du futur (orange) et année d'intérêt (rose).

2.2.5. *Organisation et déroulement des ateliers*

Les ateliers ont eu lieu les 4 et 12 mars 2013, avec les ateliers 2 et 3 regroupés sur une journée. Les ateliers étaient programmés pour durer deux heures. La conception pouvait être interrompue pour finir l'atelier à temps et laisser un moment de synthèse collective.

Trois éleveurs ont participé aux ateliers, mais aucun n'a participé à l'ensemble des ateliers. Chaque éleveur a assisté à deux ateliers (ateliers 1 et 2, ou atelier 2 et 3 ou atelier 1 et 3). Les ateliers regroupaient 2 éleveurs et 2 animateurs. Un conseiller agricole a participé à l'atelier 1 (Tableau 25).

Tableau 25 : Constitution de chaque atelier.

Atelier	Date	Participant 1	Participant 2	Participant 3	Conseiller
1	4 mars 2013	✓	✓	-	✓
2	12 mars 2013	✓	-	✓	-
3	12 mars 2013	-	✓	✓	-

Comme nous l'avons présenté dans la méthode générale, chaque atelier a suivi trois phases : présentation du climat d'intérêt et propositions d'adaptations, conception du système, et évaluation du système. La phase qui suit la présentation du climat d'intérêt consiste en une discussion sur les adaptations possibles. Il s'agit d'un brainstorming pour proposer une large gamme d'adaptations et ouvrir le champ des possibles sans que les participants soient contraints par le cadre imposé par le jeu. La conception du système est la construction sur le plateau de jeu d'un système adapté au climat

d'intérêt. Pour construire un système adapté au climat passé (premier temps de l'atelier 1), les participants peuvent s'inspirer des systèmes existants sur la zone. Par exemple, ils peuvent reproduire le système d'un des participants, ou reproduire un système type de la zone. Cette phase de conception est itérative avec la mise en place d'une adaptation sur le plateau et observation de l'impact de cette adaptation sur le système (évaluation de l'adaptation). Les participants arrêtent la conception lorsque le système (ateliers 1 et 2) ou la conduite en place (atelier 3) font consensus. Ils évaluent alors le système. L'évaluation du système se fait à partir du module d'évaluation et également à partir de l'expertise des participants lorsqu'il s'agit d'évaluer des critères qui ne sont pas pris en compte dans le module (charge de travail, acceptabilité sociale, conséquences sur la durabilité des prairies, intégration dans la filière…).

Deux animateurs ont conduit les ateliers. Leur rôle a été crucial dans le déroulement des ateliers, notamment concernant le respect du temps et le dynamisme du groupe. En début d'atelier, les animateurs présentent la démarche générale et le Rami Fourrager puis établissent les objectifs de conception de la séance. Les animateurs répartissent la parole entre les participants tout au long de l'atelier. Au cours de la conception, un animateur renseigne le module d'évaluation à partir du système conçu par les participants sur le plateau de jeu alors que le second animateur encourage les participants à utiliser le plateau de jeux pour représenter leurs suggestions d'adaptations et les questionne sur leurs choix de conception. Le cas échéant, les animateurs expliquent aux participants chaque scénario climatique, les différents supports informatifs (frises climat, courbes de vitesse de croissance de l'herbe) ainsi que les calculs et références encapsulées dans le module d'évaluation.

2.2.6. Analyse des systèmes conçus

Afin d'identifier les apports de notre méthode par rapport à une méthode dans laquelle la conception se fait uniquement à partir d'une année climatique moyenne (e.g. Martin, *et al.* 2011; Rinaudo, *et al.* 2012), notre analyse se centre sur les modifications de stratégie et de tactique mises en œuvre dans chaque atelier. Nous caractérisons la stratégie et la tactique par plusieurs indicateurs qui proviennent du module d'évaluation qui accompagne le Rami Fourrager.

La structure de l'exploitation et la conduite du système d'élevage constituent la stratégie du système. Les indicateurs de structure sont le nombre d'animaux, la SAU, la surface en céréales, en maïs, en prairies permanentes, en prairies temporaires et l'objectif de stock au premier janvier. L'objectif de stock au premier janvier caractérise le besoin moyen en stock jusqu'aux récoltes suivantes et la marge de sécurité que l'éleveur garde pour faire face à un imprévu climatique. Les indicateurs de conduite du troupeau sont le taux de renouvellement (nombre de génisses/nombre de mères) et le niveau de production (L/vache/an).

L'utilisation des surfaces et la gestion du pâturage constituent la tactique du système. Les indicateurs d'utilisation des surfaces sont la part des prairies permanentes et des prairies temporaires qui est pâturée, fauchée, ou déprimée et les surfaces en cultures dérobées. Les indicateurs de gestion du pâturage sont, pour chaque lot, la date de mise à l'herbe, la date de fin de pâturage, la date d'arrêt du plein pâturage et leur répartition sur les parcelles, et, pour chaque métaparcelle, les dates d'entrée et de sortie des animaux.

La performance du système est évaluée par l'intermédiaire de la quantité de stock achetée, de l'évolution du stock sur l'année (sans prendre en compte les achats) et de l'autonomie du système.

Nous définissons l'autonomie du système par le rapport entre la quantité de fourrages produits sur l'exploitation (pâturage et fauche) et la quantité de fourrages consommés.

3. Résultats

3.1. Adaptations stratégiques et tactiques conçues pour faire face au changement et à la variabilité du climat futur

3.1.1. Système conçu en année passée

Pour concevoir un système adapté à l'année climatique moyenne du passé (atelier 1), les participants ont choisi de reprendre les dimensions d'un système moyen de la coopérative Jeune Montagne. La SAU est de 70ha, la production annuelle est de 200 000L de lait avec des vaches à 5000L de lait par an, soit un total de 40 vaches (Figure 30). Les vêlages sont étalés sur l'année et le premier vêlage a lieu à 36 mois (Tableau 26). L'utilisation des sols a été conçue à partir des systèmes des participants : 100 % de prairies permanentes, avec 50 % de prairies pâturées et 50 % de prairies fauchées ou déprimées puis fauchées. Le stock en début d'année est de 120 tMS soit 147 jours d'avance (après évaluation du système avec un stock de 120 jours d'avance, soit 4 mois, qui ne suffisait pas). Le troupeau est de 61 UGB, répartis en deux lots d'animaux : 40 vaches laitières et 30 génisses avec un premier vêlage à 3 ans. Les surfaces fourragères sont réparties selon 6 combinaisons de couverts et d'itinéraires techniques différentes. La ration est constituée de foin et de pâture, avec un début de pâturage fin avril, un plein pâturage entre mi-mai et début novembre et une fin de pâturage fin novembre. Les participants ont évalué le système en vérifiant que les besoins des animaux étaient couverts pour chaque période. En revanche, nous n'avons pas remarqué à cette étape que le système ainsi conçu n'était pas équilibré étant donné qu'il produisait un surplus de 42 % de matière sèche par rapport à ses besoins (412 tMS produites contre 288 tMS consommées, Tableau 27).

Tableau 26 : Caractéristique des systèmes conçus aux trois ateliers, système laitier, zone de Laguiole (Montagne). (PP : prairies permanentes, PT : prairies temporaires, f :fauche, p : pâture, df : déprimage puis fauche)

Atelier (A)	Animaux			Surfaces (critère « utilisations des sols »)									Chargement apparent (calculé à partir de MS consommé)	Différence de stock entre début et fin d'année (achat exclus)
	Nb vaches	Nb génisses/an	Age au 1er vêlage	SAU tot	Céréales	PP f	PP p	PP df	PT f	PT p	PT df	Dont dérobées		En jours d'alimentation
A1 : passé	40	10	36 mois	70	0	29	36	5	0	0	0	0	0,9	+43
A1 : futur	45	12		57			23						1,2	+76
A2	50	13				14	31	12					1,3	-5
A3						29	28	0						-104

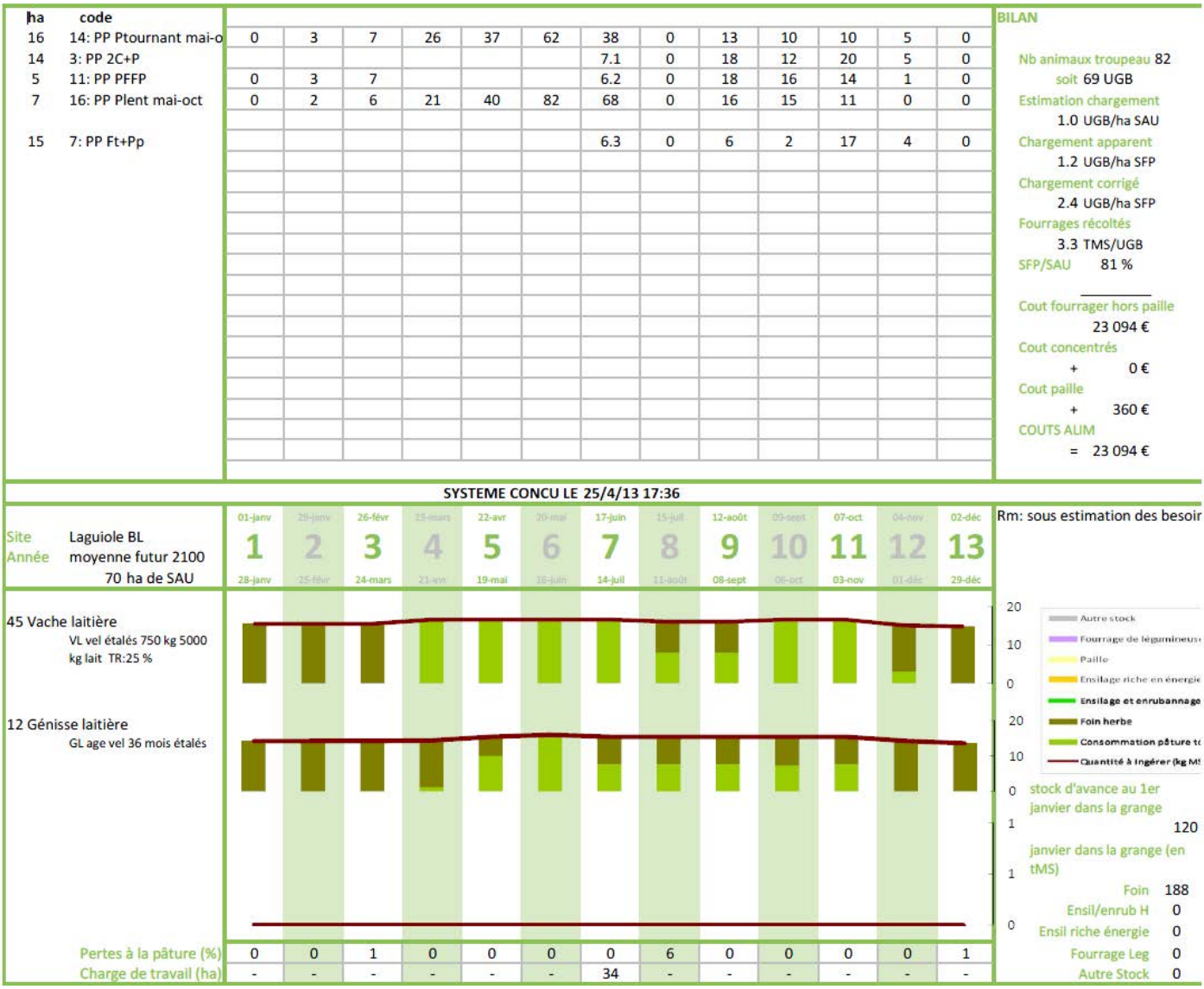


Figure 30 : Système conçu en année moyenne du passé.

Tableau 27 : Autonomie et niveau de production des systèmes conçus.

	tMS de fourrages produits	tMS de fourrages consommés	tMS de fourrages produits/haSFP	Chargement apparent (calculé à partir la quantité de fourrages consommée)	UGB potentiel/haSFP (calculé à partir de la quantité de fourrages produits)	autonomie du système (tMS produites/tMS consommées)
A1 : passé	412	288	5,9	0,87	1,2	143 %
A1 : futur	412	328	7,2	1,2	1,5	126 %
A2	448	364	7,9	1,3	1,7	123 %
A3	277	351	4,9	1,3	1,0	79 %

3.1.2. Modifications de stratégie et de tactique pour faire face au climat moyen futur

Modifier le dimensionnement, l'utilisation des sols de l'exploitation et la constitution de la ration ont été utilisés comme des moyens de s'adapter au climat futur moyen (atelier 1) (Tableau 26). Après que les animateurs ont présenté les supports informatifs sur le climat moyen du futur, les éleveurs

ont effectué des premières modifications sur le système en place. Il s'agit de modifications tactiques : mise à l'herbe plus précoce pour correspondre au départ de végétation plus précoce, distribution de foin et arrêt du pâturage en juillet et août pour faire face à l'arrêt de croissance de l'herbe à cette période. Les éleveurs ont également fait remarquer le risque de ne pas pouvoir valoriser la totalité de l'herbe de printemps, étant donné l'augmentation de la quantité d'herbe disponible sur cette période. Pour répondre à ce problème et valoriser au maximum l'herbe de printemps, les éleveurs ont proposé d'augmenter le nombre d'animaux de l'exploitation et/ou augmenter la part de surfaces fauchées. Néanmoins, les éleveurs n'ont pas appliqué ces adaptations sur le plateau de jeu. L'évaluation du système ainsi conçu a mis en évidence la possibilité de laisser une part de pâturage en juillet-août due aux reports d'herbe sur pied de juin et un surplus de MS produite par rapport à la MS consommée (63 % d'excès avec 470 tMS produites contre 288 tMS consommées). Suite à cette évaluation, les éleveurs ont modifié le système du point de vue tactique (pâturage pendant les mois d'été) et stratégique (suppression des 13ha d'estives et augmentation du nombre d'animaux et augmentation du cheptel de 61 UGB à 69 UGB). Cependant, malgré cette augmentation du chargement, le système obtenu en fin d'atelier n'était pas équilibré: la quantité de MS produite dépassait de 26 % la quantité d'herbe consommée (Tableau 27). Nous avons donc recueilli les propositions des éleveurs pour modifier le système « en laboratoire ». Le système ainsi conçu (augmentation du nombre d'animaux : 79 UGB, et suppression des secondes fauches) a été validée par les éleveurs en début d'atelier suivant.

En résumé, pour s'adapter au climat moyen futur, le système conçu en année moyenne du passé a été modifié tant sur le plan stratégique que tactique. Les modifications effectuées ont été motivées par une plus grande production d'herbe sur l'année, un printemps plus précoce et plus productif et un été beaucoup moins productif en comparaison avec la situation passé. Ainsi, le chargement a été augmenté par l'élévation du nombre d'animaux et par la diminution de la SAU. Le stock initial a été diminué. La ration a été modifiée, avec l'intégration de foin pendant les mois d'été alors que dans le système passé les animaux étaient au plein pâturage entre mai et novembre.

3.1.3. Modifications de stratégie et de tactique pour faire face à la variabilité du climat futur

La tactique du système conçu en atelier 1 pouvait être modifiée au cours des ateliers 2 et 3. La stratégie du système conçu en atelier 1 pouvait être modifiée au cours de l'atelier 2 mais pas au cours de l'atelier 3. En effet, l'atelier 3 avait pour objectif de tester le système conçu par la mise en situation de gestion des éleveurs, c'est à dire sans connaître le climat à l'avance.

Comme nous l'avons présenté dans la partie « Matériels et Méthodes », l'année utilisée pour l'atelier 2 avait une disponibilité d'herbe annuelle plus importante que pour l'année moyenne, une production d'herbe au printemps plus précoce qu'en année moyenne mais très variable (erratique) et une repousse d'automne plus importante qu'en année moyenne. L'année utilisée pour l'atelier 3 avait une disponibilité d'herbe annuelle plus faible que l'année moyenne, une production de printemps plus précoce et plus faible, avec un creux de production d'herbe en début juin. De plus, l'année utilisée pour l'atelier 3 avait un été plus précoce et plus long (3 mois) que l'été moyen (1,5 mois) ; et une repousse d'automne moins intense, retardée et plus courte.

i) Modifications de stratégie

Au vu des supports informatifs sur le climat (courbe des températures moyennes, courbe de la réserve en eau du sol, histogramme des précipitations, courbes de vitesse de croissance de l'herbe et baguettes fourrage), les participants ont choisi de ne pas modifier la stratégie du système. Ainsi le dimensionnement de l'exploitation, la stratégie d'utilisation des sols et de constitution de la ration ont été conservés. L'évaluation du système par le module informatique a permis aux éleveurs de confirmer la pertinence des modifications de stratégie déjà mises en place, notamment concernant le dimensionnement de l'exploitation (Tableau 26).

En outre, à l'issue des trois ateliers, les éleveurs n'ont pas modifié les aspects stratégiques suivants pour s'adapter au changement climatique à l'horizon 2070-2100 : niveau de production des animaux, stratégie alimentaire, âge au premier vêlage et la date de vêlage.

ii) Modifications de tactique

Les ateliers 2 et 3 ont permis d'identifier des modifications tactiques du système pour faire face à la variabilité climatique du futur. En effet, la conduite pour une année fréquente du futur (atelier 2) et la conduite en situation d'incertitude pour une année exceptionnelle (atelier 3) ont impliquées divers ajustements tactiques quant à l'utilisation des sols, la gestion du pâturage et la constitution de la ration.

Atelier 2

Pour profiter de la croissance plus précoce de l'herbe (par rapport à l'année moyenne), les éleveurs ont débuté la mise à l'herbe plus tôt (une semaine soit fin mars), en sortant en priorité le lot de mères. Les éleveurs n'ont pas mis les animaux à pâturer plus tôt malgré la disponibilité suffisante dès début mars. Ils ont justifié cette décision par les fortes précipitations de janvier à mars (160 mm/mois, voir Figure 25) qui rendent les parcelles inaccessibles à cause d'une trop faible portance du sol. Pour faire face au creux de croissance de l'herbe de fin avril, les surfaces pâturées ont été augmentées par le déprimage de certaines surfaces réservées pour la fauche. Le manque d'herbe au pâturage des mois de mai et de juillet par rapport à l'année moyenne a été comblé par l'augmentation de la part de foin dans la ration.

Atelier 3

Les éleveurs ont mis les animaux à pâturer plus tôt qu'en année moyenne (1 mois) pour profiter de la disponibilité de l'herbe plus précoce, comme lors de l'atelier 2. Pour faire face à une plus faible disponibilité d'herbe au pâturage de mi-mars à mi-mai par rapport à l'année moyenne, les surfaces fauchées ont été diminuées pour augmenter les surfaces pâturées. Le manque d'herbe de début juin a entrainé l'intégration du foin dans la ration des mères. Le manque d'herbe d'été a nécessité de nourrir uniquement au foin l'ensemble du troupeau pendant les mois de juillet, août et septembre. De plus, les prairies de fauches n'ont pas pu être pâturées après leur fauche, contrairement à la pratique lors de l'année moyenne. Cependant, ces adaptations tactiques internes au système n'ont pas permis de faire face à la variabilité climatique de façon autonome et les éleveurs ont eu besoin d'acheter l'équivalent de 22 jours d'aliments. L'achat a été décidé au dernier moment (lorsque les stocks étaient épuisés, soit le 1er décembre).

3.1.4. Performances du système conçu

Les performances du système ont évolué au cours des ateliers. Sans compter les achats, la différence de stock entre le début et la fin de l'année est de +76 jours d'alimentation en atelier 1, de -5 jours d'alimentation en atelier 2 et de -104 jours d'alimentation en atelier 3 (Tableau 26). Pour l'atelier 3, les participants ont dû acheter l'équivalent de 22 jours de stock en cours d'année (non montré). L'autonomie (tMSproduite/tMSconsommée) a été diminuée entre le passé et le futur (Tableau 27).

3.2. Rôle des supports informatifs

Les supports informatifs sur le climat et sur le système en conception ont été utilisés lors des trois ateliers aux trois phases des ateliers (présentation du climat d'intérêt, conception du système, évaluation du système). Ils ont été utilisés soit à partir des valeurs des indicateurs dans l'absolu et soit en les comparant avec d'autres situations climatiques. Les supports informatifs ont été mobilisés selon deux statuts : support à la conception ou support à l'évaluation. Le Tableau 28 détaille quels supports informatifs ont été utilisés pour chaque phase des ateliers, selon quel statut et selon quelle utilisation (avec ou sans comparaison à la situation de référence).

3.2.1. Présentation du climat d'intérêt et proposition d'adaptations

Après la présentation du climat d'intérêt et ses conséquences sur le fonctionnement des prairies à partir de la frise climat, de l'histogramme des précipitations et des courbes de croissance de l'herbe, les différents supports informatifs sont utilisés au cours d'un brainstorming pour proposer des adaptations possibles pour soit s'adapter au changement climatique moyen (adaptations stratégiques et tactiques, atelier 1) ou soit conduire le système pour une situation climatique particulière (adaptations tactiques, ateliers 2 et 3).

Les propositions d'adaptations ont été formulées à partir des courbes de croissance de l'herbe (comparaison avec la situation moyenne de référence –atelier 1 : passé ; atelier 2 et 3 : futur-), des frises climat, et, dans les ateliers 2 et 3, des baguettes fourrages (Tableau 28). L'allure générale des courbes de croissance de l'herbe (passé et futur) a permis aux éleveurs d'identifier à l'échelle de la saison si la situation d'intérêt était plus ou moins favorable que la situation de référence (i.e. la production est-elle plus importante ?). Cependant, les courbes de croissances de l'herbe n'ont pas permis de savoir si la quantité d'herbe annuelle disponible était plus importante ou plus faible que pour l'année de référence. Par exemple, les éleveurs ont proposé d'augmenter le chargement pour profiter de la situation plus favorable au printemps dans le futur. De même, l'été plus long dans le futur a généré plusieurs propositions d'adaptations : mettre en place l'irrigation dans l'objectif de maintenir les espèces même les plus sensibles à la sécheresses et favoriser la reprise de la pousse lors d'une pluie, décaler les vêlages en septembre pour avoir des animaux taris en juillet et donner du foin en été. La situation plus favorable de printemps associée à l'été plus long dans le futur a également généré la proposition de diminuer la part de pâturage pour augmenter les surfaces fauchées permettant ainsi de faire plus de stock pour combler le déficit d'été. En outre, les courbes de croissance de l'herbe ont toujours servi de support pour proposer des décalages de mise à l'herbe par rapport à la situation de référence et pour évaluer grossièrement la durée de la période de distribution de foin en été. Par ailleurs, la frise climat a été utilisée conjointement à la courbe de croissance de l'herbe lors de l'atelier 1 pour déterminer si la repousse d'automne pouvait être valorisée en fauche : les éleveurs ont écarté cette proposition du fait des températures trop basses en novembre pour sécher le foin. De même, lors des ateliers 2 et 3, les courbes de croissance ont été

analysées simultanément avec les courbes de température moyenne et de précipitations pour décider de la date de fin de pâturage en fonction des risques de gel ou de neige. Les baguettes fourrages ont été utilisées pendant cette phase de brainstorming uniquement lors des ateliers 2 et 3 et ont permis de décider quels couverts devaient être fauchés plutôt que pâturés (atelier 2) ou, à l'inverse, quels couverts devaient être pâturés plutôt que fauchés (atelier 3).

3.2.2. Conception du système

A la suite du brainstorming sur les adaptations possibles, différents support informatifs ont été utilisés pour décider des adaptations à mettre en place sur le plateau de jeu. L'objectif était d'adapter le système au changement climatique moyen (adaptations stratégiques et tactiques, atelier 1) ou de conduire le système pour une situation climatique particulière (adaptations tactiques, ateliers 2 et 3).

Les courbes de vitesses de croissance, la frise climat, le diagramme de précipitation, les baguettes fourrages et le module d'évaluation ont été utilisés à chaque atelier comme support à la conception (Tableau 28). La date de début de pâturage a été pressentie à partir des courbes de vitesse de croissance puis décidée précisément (au grain de la semaine) à l'aide des baguettes fourrages. La date de fin de pâturage a été décidée de la même manière mais tient aussi compte de l'accessibilité de la parcelle (neige, gel ou portance, déterminées à l'aide de la frise climat et le diagramme de précipitations). Le début et la fin de la distribution de foin estivale ont été pressentis par les courbes de croissance de l'herbe. Cependant, ils ont été décidés précisément à partir des baguettes fourrages et des résultats du module d'évaluation concernant l'herbe non consommée à l'échelle de la semaine soit pour un lot soit pour l'ensemble du troupeau. Ainsi, les éleveurs ont déterminé la part du pâturage dans la ration à partir des résultats du module (les essais/erreurs jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'herbe non consommée lorsque du foin est distribué). Pour les décisions stratégiques de l'atelier 1 (modification de la SAU ou du nombre d'animaux) les éleveurs se sont appuyés sur le module d'évaluation concernant la quantité de stock en excès en fin d'année et la quantité globale de pâture non consommée sur l'année. En atelier 2 et atelier 3, le module d'évaluation a permis de choisir de modifier l'utilisation des surfaces (ratio surfaces pâturées/surfaces fauchées) à partir des critères « herbe non consommée à une période » ou à partir de la part des besoins des animaux qui étaient satisfaits uniquement par le pâturage. En revanche, les baguettes fourrages ont permis de décider sur quels couverts augmenter la part de pâture ou de fauche en fonction du niveau de productivité du couvert, de sa précocité et de la période à laquelle la pâture est en déficit ou en excès. Les cartes stocks ont permis de décider des achats (quantité et moment d'achat). En résumé, tous les supports informatifs ont été utilisés pour la conception au long des trois ateliers de conception (frise climat, diagramme de précipitations, courbe de croissance de l'herbe, baguettes fourrages, module d'évaluation et cartes stocks)

3.2.3. Evaluation du système

A la fin d'un atelier de conception, le système conçu et sa conduite ont été évalués par les participants à l'aide du module d'évaluation dans tous les ateliers et des cartes stocks dans les ateliers 2 et 3 (Tableau 28). Dans le module d'évaluation, ce sont les critères « évolution du niveau de stock entre le début et la fin de l'année » et « quantité d'herbe pâturable non consommée sur l'exploitation » qui ont permis d'évaluer la viabilité du système tant sur le dimensionnement de l'exploitation (évolutions des stocks) que sur la gestion du pâturage (quantité annuelle d'herbe non

valorisée au pâturage). L'évolution du niveau de stock entre le début et la fin de l'année a été également évaluée à l'aide des cartes stocks restantes dans la grange à la fin de l'année. Même si les cartes stocks sont redondantes avec le graphique du module d'évaluation, les éleveurs les utilisent pour évaluer le système. Ils comptent les cartes stocks disponibles en fin d'année et n'ont ainsi pas besoin de demander à l'animateur de montrer le graphique des stocks. A partir des valeurs prises par ces différent critères, les éleveurs ont validé ou non le système conçu. Même si la situation n'est pas survenue, les éleveurs auraient pu souligner le cas échéant que le système conçu n'était pas viable (tous les ateliers) et proposer des modifications sur le système (ateliers 1 et 2).

Tableau 28 : Statut et utilisation des supports informatifs en fonction de l'étape de l'atelier.

Etape	Support	Indicateur	Utilisée par	Atelier	support à	Exemple
Introduction du climat et proposition d'adaptations	Frise climat	Température Bilan hydrique climatique	Comparaison avec situation de référence	1, 2 et 3	conception	Identifier risques de gel, neige et des problèmes de portance : choix fin pâturage
	Courbes de croissance de l'herbe	Allure générale Intensité croissance Dates début et fin croissance herbe	Comparaison avec situation de référence	1, 2 et 3	conception	Identifier des possibilités de décaler le début et la fin de pâturage. Estimer grossièrement le besoin en foin d'été. Identifier la possibilité de mettre plus de surfaces fauchées. Identifier le besoin de mettre plus de surfaces pâturées.
	Diagramme de précipitations	Cumul de précipitations mensuel	Dans l'absolu	1, 2 et 3	conception	Identifier risques de neige et des problèmes de portance: choix fin pâturage Identifier risques de pluies : choix de fauche ou pâture
	Baguettes fourrages	Précocité et productivité des couverts (au pâturage et à la fauche)	Dans l'absolu	2 et 3	conception	Identifier les couverts pâturés à faucher si besoin. Identifier les couverts fauchés à pâturer si besoin.
Conception du système	Frise climat	Température moyenne Bilan hydrique climatique	Dans l'absolu	1, 2 et 3	conception	Identifier risques de gel, neige et des problèmes de portance : choix fin pâturage
	Courbes de croissance de l'herbe	Dates début et fin croissance herbe	Comparaison avec situation de référence Et dans l'absolu	1, 2 et 3	conception	Estimer la période de distribution estivale de foin.
	Diagramme de précipitations	Cumul de précipitations mensuel	Dans l'absolu	1, 2 et 3	conception	Identifier risques de neige et des problèmes de portance: choix fin pâturage Identifier risques de pluies : choix de fauche ou pâture
	Baguettes fourrages	kgMS/ha/jr sur une période	Dans l'absolu	1, 2 et 3	conception	Choisir la date de début de pâturage. Identifier une date de fin de pâturage. Définir la période de distribution estivale de foin. Choisir les couverts pâturés à faucher si besoin. Choisir les couverts fauchés à pâturer si besoin.
	Cartes Stocks	tMS restantes	Dans l'absolu	2 et 3	conception	Acheter du foin. Choix du moment, de la quantité et du type de fourrage.
	Module d'évaluation	Excès ou déficit de stock en fin d'année par rapport au début de l'année	Dans l'absolu	1	Evaluation/ conception	Modifier le chargement : modification du nombre d'animaux et/ou du nombre d'ha.
		Herbe pâturable non consommée sur l'année pour le troupeau	Dans l'absolu	1 et 2	Evaluation/ conception	Modifier le chargement : modification du nombre d'animaux et/ou du nombre d'ha.
		Remplissage de la grange à chaque période (toujours avoir des stocks en grange) Herbe pâturable non consommée sur une période pour le troupeau Herbe pâturable non consommée sur une période pour un lot Satisfaction des besoins d'un lot par la ration choisie	Dans l'absolu	1, 2 et 3	Evaluation/ conception	Choisir de modifier l'utilisation des surfaces (rapport entre surfaces pâturées et fauchées) Définir la période de distribution estivale de foin.
Evaluation du système	Cartes Stocks	tMS restantes	Comparaison avec situation de référence et dans l'absolu	2 et 3	Evaluation	Evaluer le dimensionnement de l'exploitation. Evaluer l'adéquation entre surfaces fauchées et besoin de stock
	Module d'évaluation	Excès ou déficit de stock en fin d'année par rapport au début de l'année	Dans l'absolu	2 et 3	Evaluation	Evaluer le dimensionnement de l'exploitation. Evaluer l'adéquation entre surfaces fauchées et besoin de stock
		Herbe pâturable non consommée pour l'ensemble du troupeau et sur l'année	Dans l'absolu	1, 2 et 3	Evaluation	Evaluer la gestion du pâturage. Evaluer le rapport entre surfaces pâturées et besoin au pâturage

4. Discussion

4.1. Analyse critique des stratégies, tactiques et systèmes conçus

Il est admis que la **diversité** des ressources, des productions, et des modes de gestion est un moyen stratégique de faire face à l'aléa (Darnhofer, *et al.* 2010; ten Napel, *et al.* 2011), notamment climatique (Anwar, *et al.* 2012; Dumont, *et al.* 2013). Au cours des ateliers que nous avons menés, l'augmentation de la diversité n'a pas été utilisée comme un moyen de s'adapter au climat futur. L'outil utilisé pour la conception permet de modifier la diversité des ressources fourragères (choix des baguettes fourrages) mais permet difficilement de diversifier les productions animales (un troisième lot dont le débouché est différent peut être ajouté, à condition que l'ajout ait été prévu et que les besoins aient été calculés avant l'atelier). De plus, la diversité des ressources fourragères du système est bloquée par les choix de conception du système pour le climat passé. En effet en zone montagne la majorité des surfaces ne peut pas changer d'orientation (prairies permanentes), le climat ne permet pas la culture de céréales et, dans le cas des élevages laitiers, le cahier des charges AOC Laguiole interdit l'utilisation d'ensilage.

Avoir un **système sous-optimal** peut être un moyen stratégique de faire face à l'aléa climatique. Pour un système équilibré sur une longue période, plus les fourrages produits seront en excès par rapport aux besoins des animaux, plus il sera possible de faire du stock pour les années suivantes et ainsi diminuer la sensibilité de l'exploitation à l'aléa climatique. Deux leviers permettent de rendre le système plus robuste :

- **le levier animal en diminuant les besoins des animaux**, soit à l'échelle du troupeau (diminution du nombre d'animaux), soit à l'échelle de l'individu (diminution du niveau de production) (Nozières, *et al.* 2011) ;
- **le levier assolement en augmentant les surfaces fourragères qui ne sont pas pâturées en année moyenne** (elles sont alors fauchées pour faire du stock en année moyenne ou favorable et pâturées en année défavorable). Cette adaptation n'a pas été appliquée dans notre cas d'étude : les adaptations stratégiques mises en place ont consisté en une augmentation du niveau de production des systèmes (diminution de la SFP et augmentation du nombre d'animaux) et ont provoqué une diminution de l'autonomie fourragère. Ceci s'explique notamment par le fait que le système de référence (système du passé) était très largement autonome (143% de sécurité). Ce fort déséquilibre entre production et consommation de fourrages dans le système passé n'a pas pu être discuté, validé ou remis en question étant donné qu'il n'a pas été identifié en atelier. Néanmoins, en synthèse des trois ateliers, les participants ont évalué le système futur comme pertinent pour le climat futur, en considérant qu'il leur était envisageable d'acheter du foin si cela se produisait 1 année sur 15. De même, les participants ont évalué que s'il était nécessaire d'acheter du foin plus fréquemment (par exemple 1 année sur 6) alors le système conçu n'aurait pas été pertinent et il aurait alors fallu diminuer le nombre d'animaux pour diminuer le chargement.

Des **modifications tactiques** doivent accompagner les modifications de stratégies mises en place pour faire face à la variabilité du climat futur. En effet, modifier l'autonomie du système ne suffit pas à faire face à la variabilité climatique mais doit être accompagnée d'adaptations tactiques, notamment concernant la gestion du pâturage (Lurette, *et al.* 2013). Au cours des ateliers 2 et 3,

plusieurs modifications de tactiques ont été mobilisées, que nous pouvons classer dans deux catégories : flexibilité interne (ici substitution et flexibilité des modes de gestion), et flexibilité externe (ressources extérieures : achats) (Tarondeau 1999). La flexibilité interne à l'exploitation est possible grâce à la diversité. Au cours des ateliers, la diversité des ressources fourragères a permis de remplacer la pâture par le foin lorsque la pâture faisait défaut. De la même manière, certaines prairies ont été soit fauchées soit pâturées : la flexibilité vient de la diversité des modes de gestion de la prairie. La diversité des couverts prairiaux a permis un étalement de la production d'herbe qui est valorisé par la gestion des lots au pâturage (déplacement des lots entre groupes de parcelles). La flexibilité de la gestion du pâturage (date de mise à l'herbe…) a également été mobilisée pour faire à la fois face au changement et à la variabilité du climat. La flexibilité externe, caractérisée dans notre étude par l'achat de fourrages extérieurs, a été mobilisée comme un moyen d'urgence et non comme un moyen structurel d'adaptation au changement climatique.

4.2. Intérêts de notre démarche

Notre méthode de conception permet dans un court laps de temps la conception et la mise à l'épreuve d'une stratégie pour une gamme d'années représentatives d'un climat. En cela, elle se situe à mi-chemin entre des méthodes de conception participatives qui se focalisent sur une année climatique (moyenne ou extrême) (e.g. Lamarque, 2012; Martin et al., 2011b; Rinaudo et al., 2012) et les méthodes d'évaluation assistées par ordinateur qui ne prennent pas en compte les processus de décision des gestionnaires (e.g. Graux et al., 2013; Lurette et al., 2013). D'une part, notre méthode permet de tester si la stratégie élaborée initialement offre une flexibilité suffisante pour mettre en œuvre des tactiques afin de faire face à la variabilité du climat considéré. Cet aspect est rarement abordé dans les approches de conception participatives, faute de temps ou d'outil adapté. Les outils de conception et d'évaluation mobilisés lorsqu'il s'agit de tester la flexibilité du système doivent être plus précis que lorsqu'il s'agit de définir sa stratégie (i.e. sa configuration). Par exemple, l'évaluation de la stratégie peut se faire à l'échelle de l'année alors que l'évaluation de la tactique nécessite des échelles d'espace et de temps plus fines pour prendre en compte des compétitions entre utilisations des ressources. D'autre part, notre méthode permet de concevoir un système adapté à une gamme de situations en prenant en compte des considérations de gestion tactique, ce qui est difficilement faisable par simulation informatique. D'abord, la complexité des décisions rend difficile la formalisation des processus de décision (multicritère, sous incertitude et dont les critères sont implicites et variables). Ensuite, les connaissances scientifiques sur les règles de décisions ne sont pas suffisantes pour modéliser la prise de décision et sont difficiles à construire: certaines connaissances des gestionnaires sont liées à l'action et sont par conséquent difficilement exprimables.

Notre méthode de conception permet en partie d'évaluer si les modifications mises en place pour faire face ou tirer parti du changement climatique moyen augmentent la vulnérabilité du système. On parle alors de maladaptation. Par exemple, l'augmentation du niveau de production de l'exploitation (par l'augmentation du chargement) pour tirer parti de l'augmentation de la vitesse de croissance de l'herbe au printemps par le pâturage a été jugée non durable par les participants si l'année climatique support à l'atelier 3 avait été en réalité fréquente (recours à l'achat de stock). D'autres composantes de la maladaptation ne sont pas abordées par notre étude (Barnett and O'Neill 2010) comme les implications des modifications effectuées sur une augmentation des émissions de gaz à effet de serre (augmentation de l'exposition au changement climatique) (voir Calvin, et al. 2012; Fisher-Vanden, et al. 2012 pour des exemples).

Notre démarche de conception entre éleveurs et chercheurs participe à la communication sur le changement climatique, ses conséquences possibles et les adaptations possibles ou inappropriées. En communiquant des informations sur le changement climatique et en sensibilisant sur les impacts possibles, notre méthode permet de construire les capacités adaptatives des systèmes face au changement et à la variabilité du climat (Adger, *et al.* 2005). De plus, notre démarche, qui permet aux participants d'imaginer des adaptations possibles et de les tester, constitue un dispositif d'apprentissage sur les adaptations possibles (Tschakert and Dietrich 2010), renforçant ainsi les capacités d'adaptation des participants.

En demandant aux participants de se mettre en situation de conduire le système, notre méthode permet d'avoir une évaluation plus réaliste des systèmes conçus que des méthodes de conception focalisées sur la stratégie. Les considérations à l'échelle de l'année ou de l'ensemble du système permettent de concevoir la stratégie du système mais ne sont pas applicables lorsqu'il s'agit d'imaginer et évaluer la gestion au jour le jour de l'exploitation. Par exemple, la conduite du pâturage dans les ateliers a mis en valeur les contraintes d'utilisations des surfaces (éloignement par rapport à siège de l'exploitation, pente, pâturabilité de certaines espèces) et de gestion des lots (les lots ne peuvent pas être déplacés sur de longues distances fréquemment).

4.3. Limites de notre démarche

Les différences de potentiel de production fourragère des années climatiques étudiées peuvent fragiliser les capacités adaptatives des participants face au changement climatique. En effet, avec le scénario que nous avons choisi (horizon 2085, scénario A1B du GIEC), le potentiel de production fourragère est plus grand pour l'année moyenne future que pour l'année moyenne passée alors qu'il est plus faible pour l'année utilisée en atelier 3. Ainsi, les adaptations mises en place pour l'année moyenne du futur peuvent se révéler être des sources de sensibilité face à une année particulière (par exemple augmentation du chargement en atelier). Il y a alors un paradoxe entre la situation moyenne qui devient plus favorable dans le futur et des situations particulières plus défavorables que dans le passé. Les connaissances des participants sont alors embrouillées et ne sont plus mobilisables pour l'action. Néanmoins, notre méthode en trois ateliers permet de prendre explicitement en compte la variabilité climatique.

Malgré un dispositif dans lequel les modifications de stratégies sont les premières à être discutées (avec l'idée d'une reconception), la conception s'est faite selon le schéma « Efficiency, Substitution, Redesign » proposé par Hill (1998). Pour faire face au changement climatique, les adaptations ont consisté en l'augmentation de l'efficacité du système (« Efficiency ») par l'augmentation du chargement et en la mise en place de substitutions (« Substitution ») en distribuant du foin lorsque la pâture manque. Même si les participants imaginaient en entretien préalable faire face au changement climatique par des adaptations stratégiques, aucune adaptation mise en place n'a consisté en une réévaluation des dimensions et des objectifs du système. De fait, il n'y a pas eu de reconception du système (« Redesign », principalement par la diversification des ressources agroécologiques du système pour garantir la fertilité, la productivité et la résilience du système). L'attitude des éleveurs a été d'évaluer les conséquences du changement climatique sur le système construit en année passée, dans l'objectif de mesurer les impacts du changement climatique sur les systèmes actuels (et donc sur leur système). L'objectif pour le climat futur n'a pas été de concevoir le

système le mieux adapté au climat futur mais plutôt d'ajuster le système passé pour qu'il soit adapté au climat futur. Cette démarche de conception pas à pas (essai/erreur) a limité les adaptations stratégiques mises en place par rapport aux idées d'adaptations évoquées en entretien individuels avant les ateliers (mise en place de l'irrigation, implantation de prairies temporaires et de céréales). Le groupe n'a pas souhaité partir de zéro pour concevoir un système adapté au climat futur. Aucune adaptation de transformation n'a donc été abordée.

Cependant, même si l'adaptation qui consiste à remplacer la pâture en été par le foin est une substitution, elle s'inscrit dans une transformation du système. En effet, distribuer du foin en été implique une forte charge de travail en été et entre en concurrence avec d'autres travaux tels que la fenaison et la maintenance des clôtures. De même, la distribution de foin en été questionne profondément la faisabilité en termes de charge de travail de la transhumance vers des estives. La distribution de foin en estives demande de longs trajets fréquents entre le siège d'exploitation et l'estive ou alors un bâtiment de stockage du foin près des estives et un berger chargé de distribuer le foin. En outre, il s'agit de constituer un plus grand stock de foin au printemps (voire en automne) ce qui augmente par conséquent la charge de travail au printemps et le volume nécessaire pour le bâtiment de stockage.

Notre démarche n'a pas pu aboutir à des scénarios de systèmes d'élevage innovants, notamment dû à l'utilisation d'un outil d'évaluation lors des ateliers. Dans notre cas, la phase de conception du système sans mobiliser l'outil d'évaluation (phase de brainstorming) était courte (10 minutes) et ne demandait pas d'évaluer les propositions faites. Contrairement à un atelier qui n'utiliserait pas de support à l'évaluation des systèmes construits (Willaume, *et al.* 2013), les participants n'ont pas eu le temps de détailler leurs premières propositions et de les évaluer par leur propre expertise. La conception assisté par l'outil d'évaluation a quant à elle constituée la phase la plus longue de l'atelier. Nous pensons que l'outil d'évaluation met l'éleveur en position de tester les capacités de son propre système à faire face aux contraintes qui lui sont soumises. Ainsi, la majorité de l'atelier a consisté à évaluer la pertinence des systèmes en place sur la zone plutôt que d'imaginer et évaluer des systèmes différents. En revanche, c'est bien l'outil d'évaluation qui permet de distinguer les trois années climatiques choisies en fonction de leurs conséquences sur la ressource fourragère et par conséquent sur le système. De plus, l'outil d'évaluation permet d'identifier des incohérences dans le système imaginé. En somme, l'outil d'évaluation aide à la conception en identifiant les points du système à améliorer tout en freinant l'imagination car il est normatif et que l'éleveur cherche à évaluer son propre système. Par ailleurs, l'outil que nous avons utilisé empêche de se détacher de la situation actuelle. En effet, le Rami Fourrager est un outil de conception par exploitation des connaissances, c'est-à-dire par mobilisation des connaissances existantes (de l'ensemble des participants : conseillers, éleveurs, scientifiques). Le Rami Fourrager permet d'évaluer la cohérence du système conçu, principalement à partir de la balance besoins/production. Il nécessite à la fois des valeurs chiffrées des besoins des animaux et des valeurs chiffrées des productions fourragères à l'échelle du mois ou de la semaine. Ces valeurs ne sont ni disponibles (sous la forme de données), ni connues (par dire d'expert), ni imaginables (construction de scénario prospectifs) lorsqu'il s'agit de couverts végétaux (espèces à dormance estivale, espèces en C4) ou races animales inexistantes ou marginales. Cependant, l'intégration des connaissances scientifiques existantes sur ces espèces dans des modèles de simulation permettrait d'obtenir ces valeurs. L'évaluation de systèmes dont les

ressources (couverts, cultures) ou les animaux sont peu connus ou ne sont pas présents dans la zone est donc impossible avec le Rami Fourrager.

5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une méthode de conception de systèmes d'élevage adaptés à la variabilité et au changement du climat. Sa particularité est d'hybrider des approches participatives et de modélisation informatique. A partir d'informations encapsulées dans des objets intermédiaires concernant le climat futur et son impact sur les ressources fourragères, les éleveurs mobilisent leurs connaissances et savoir-faire pour concevoir un scénario de système d'élevage. La conception se déroule en trois ateliers de façon à aborder séquentiellement trois caractéristiques du climat : sa moyenne, sa variabilité et son caractère imprévisible. L'application de la méthode auprès d'éleveurs laitiers en zone Aubrac a montré que la méthode permettait de tester si une stratégie laissait assez de flexibilité tactique pour faire face à la variabilité climatique et à l'imprévisibilité du climat.

Notre méthode, qui consiste en la mise en forme des connaissances scientifiques (sur le changement climatique et ses impacts sur les ressources fourragères) pour qu'elles soient actionnables par des praticiens, pourrait également servir de support à l'apprentissage des éleveurs sur le changement climatique et ses conséquences à l'échelle locale. Ainsi, en permettant aux éleveurs d'anticiper le changement climatique, notre méthode participerait à l'adaptation des élevages au changement climatique.

6. Références

Adger W.N., Arnell N.W. and Tompkins E.L. 2005. Successful adaptation to climate change across scales. *Global Environmental Change*, **15**, 77–86, doi:10.1016/j.gloenvcha.2004.12.005.

Anwar M.R., Liu D.L., Macadam I. and Kelly G. 2012. Adapting agriculture to climate change: a review. *Theoretical and Applied Climatology*, **113**(1-2), 225–245, doi:10.1007/s00704-012-0780-1.

Barnett J. and O'Neill S. 2010. Maladaptation. *Global Environmental Change*, **20**(2), 211–213, doi:10.1016/j.gloenvcha.2009.11.004.

Calvin K., Wise M., Clarke L., Edmonds J., Kyle P., Luckow P. and Thomson A. 2012. Implications of simultaneously mitigating and adapting to climate change: initial experiments using GCAM. *Climatic Change*, **117**(3), 545–560, doi:10.1007/s10584-012-0650-y.

Darnhofer I., Bellon S., Dedieu B. and Milestad R. 2010. Adaptiveness to enhance the sustainability of farming systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, **30**(3), 545–555, doi:10.1051/agro/2009053.

Déqué M., Dreventon C., Braun A. and Cariolle D. 1994. The ARPEGE/IFS atmosphere model : a contribution to the French community climate modelling. *Climate Dynamics*, **10**, 249–266, doi:10.1007/BF00208992.

Dumont B., Fortun-Lamothe L., Jouven M., Thomas M. and Tichit M. 2013. Prospects from agroecology and industrial ecology for animal production in the 21st century. *Animal*, **7**(6), 1028–1043, doi:10.1017/S1751731112002418.

Duru M. and Martin-Clouaire R. 2011. Cognitive tools to support learning about farming system management: a case study in grazing systems. *Crop and Pasture Science*, **62**, 790–802, doi:10.1071/CP11121.

Estrada F., Gay C. and Conde C. 2011. A methodology for the risk assessment of climate variability and change under uncertainty. A case study: coffee production in Veracruz, Mexico. *Climatic Change*, **113**(2), 455–479, doi:10.1007/s10584-011-0353-9.

Fisher-Vanden K., Sue Wing I., Lanzi E. and Popp D. 2012. Modeling climate change feedbacks and adaptation responses: recent approaches and shortcomings. *Climatic Change*, **117**, 481–495, doi:10.1007/s10584-012-0644-9.

Graux A.-I., Bellocchi G., Lardy R. and Soussana J.-F. 2013. Ensemble modelling of climate change risks and opportunities for managed grasslands in France. *Agricultural and Forest Meteorology*, **170**, 114–131, doi:10.1016/j.agrformet.2012.06.010.

Hill S.B. 1998. Redesigning agroecosystems for environmental sustainability: a deep systems approach. *Systems Research and Behavioral Science*, **15**(5), 391–402, doi:10.1002/(SICI)1099-1743(1998090)15:5<391::AID-SRES266>3.0.CO;2-0.

Kates R.W., Travis W.R. and Wilbanks T.J. 2012. Transformational adaptation when incremental adaptations to climate change are insufficient. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **109**(19), 7156–7161, doi:10.1073/pnas.1115521109.

Lamarque P. 2012. *Une approche socio-écologique des services écosystémiques. Cas d'étude des prairies subalpines du Lautaret.* PhD Thesis, Université de Grenoble, France.

Lurette A., Aubron C. and Moulin C.-H. 2013. A simple model to assess the sensitivity of grassland dairy systems to scenarios of seasonal biomass production variability. *Computers and Electronics in Agriculture*, **93**, 27–36, doi:10.1016/j.compag.2013.01.008.

Martin G., Felten B. and Duru M. 2011. Forage rummy: A game to support the participatory design of adapted livestock systems. *Environmental Modelling & Software*, **26**(12), 1442–1453, doi:10.1016/j.envsoft.2011.08.013.

McCrum G., Blackstock K., Matthews K., Rivington M., Miller D. and Buchan K. 2009. Adapting to climate change in land management: the role of deliberative workshops in enhancing social learning. *Environmental Policy and Governance*, **19**(6), 413–426, doi:10.1002/eet.525.

Mosnier C. 2009. *Adaptation des élevages de bovins allaitants aux aléas de prix et de climat : Approches par modélisation*. PhD Thesis, Ecole Doctorale ABIES, France.

Nozières M.O., Moulin C.-H. and Dedieu B. 2011. The herd, a source of flexibility for livestock farming systems faced with uncertainties? *Animal*, **5**(9), 1442–1457, doi:10.1017/S1751731111000486.

Pagé C., Terray L. and Boé J. 2008. *Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle: les scénarii SCRATCH08*. Toulouse. p. 21.

Piquet M., Frappat B., Gin P., Morel K., Sautier M., Duru M., Moreau J.-C. and Martin G. 2013. S'adapter ensemble (éleveurs, conseillers, chercheurs) au changement climatique : enjeux et exemple du Rami fourrager®. *Fourrages*, **215**, 247–256.

Rinaudo J.-D., Montginoul M., Varanda M. and Bento S. 2012. Envisioning Innovative Groundwater Regulation Policies Through Scenario Workshops in France and Portugal. *Irrigation and Drainage*, **61**, 65–74, doi:10.1002/ird.1661.

Sautier M., Martin-Clouaire R., Faivre R. and Duru M. 2013. Assessing climatic exposure of grassland-based livestock systems with seasonal-scale indicators. *Climatic Change*, **120**(1-2), 341–355, doi:10.1007/s10584-013-0808-2.

Schaap B.F., Reidsma P., Verhagen J., Wolf J. and van Ittersum M.K. 2013. Participatory design of farm level adaptation to climate risks in an arable region in The Netherlands. *European Journal of Agronomy*, **48**, 30–42, doi:10.1016/j.eja.2013.02.004.

Sebillotte M. and Soler L.G. 1990. Les processus de décision des agriculteurs. I. Acquis et questions vives. *In* Brossier, J., Vissac, B. & Lemoigne, J.L., *eds. Modélisation systémique et systèmes agraires.* Inra éditons: Paris.

Smit B., Burton I., Klein R. and Street R. 1999. The science of adaptation: a framework for assessment. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **4**, 199–213.

Tarondeau J.C. 1999. *La flexibilité dans les entreprises*. PUF, Collection Que sais-je?: Paris, France. p. 127.

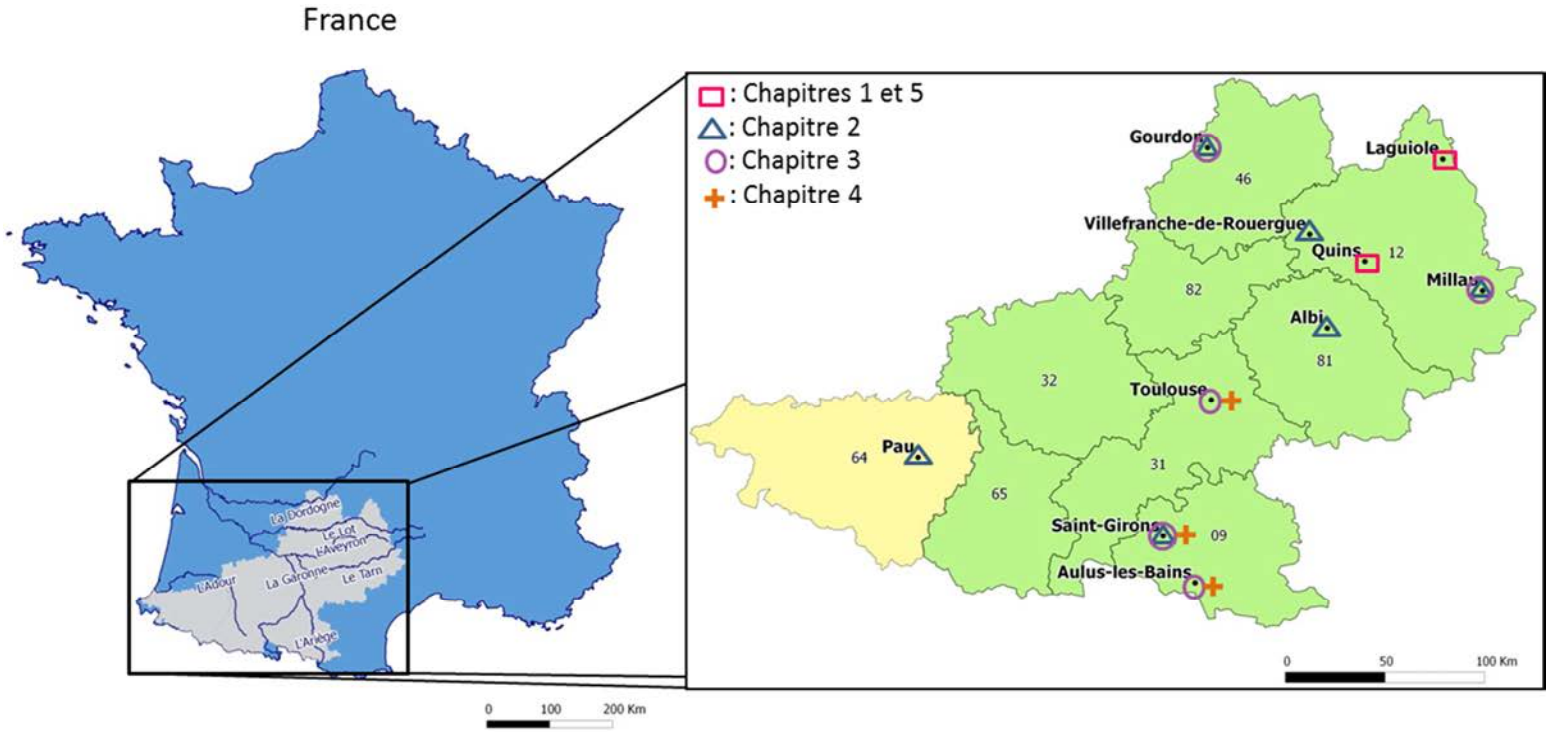
Ten Napel J., van der Veen A. a., Oosting S.J. and Groot Koerkamp P.W.G. 2011. A conceptual approach to design livestock production systems for robustness to enhance sustainability. *Livestock Science*, **139**(1-2), 150–160, doi:10.1016/j.livsci.2011.03.007.

Tschakert P. and Dietrich K. 2010. Anticipatory learning for climate change adaptation and resilience. *Ecology and Society*, **15**(2), p.18.

Willaume M., Rollin A. and Casagrande M. 2013. Farmers in southwestern France think that their arable cropping systems are already adapted to face climate change. *Regional Environmental Change*, , p.13, doi:10.1007/s10113-013-0496-5.

Discussion Générale

Nous discutons ici des apports de la thèse pour répondre à la question « Comment accompagner l'adaptation des élevages herbagers au changement climatique ? ». Dans un premier temps (encadré) nous revenons sur les évolutions du climat passées et futures que nous avons considérées au cours de la thèse. Nous les synthétisons pour en faire ressortir les contrastes selon les horizons temporels considérés, et la diversité des manifestations selon la zone pédoclimatique. Dans un deuxième temps, nous montrons en quoi notre thèse a permis d'identifier de nouveaux atouts, faiblesses, opportunités et menaces des élevages herbagers face au changement climatique ou d'en préciser certains. Dans un troisième temps, nous discutons les apports méthodologiques de la thèse pour accompagner l'adaptation des élevages herbagers au changement climatique. Enfin, nous revenons sur la posture adoptée dans cette thèse.



Rappel de la Figure 3 : Terrains d'étude de la thèse, et chapitre de thèse associé. En vert : Région Midi-Pyrénées. En jaune (clair) : département des Pyrénées Atlantiques située en région Aquitaine. Conception C. Murgue.

1. Implications des évolutions d'exposition à l'échelle du système d'élevage

Les modifications d'exposition dues au changement climatique (Encadré 1) auront deux implications principales à l'échelle du système d'élevage. D'abord, les fourrages stockés prendront une part plus importante dans la ration des systèmes à base d'herbe étant donné que la durée de pâturage de printemps sera raccourcie et que l'été-automne demandera de distribuer plus de stocks (augmentation de la variabilité interannuelle de la production herbagère). Ensuite, le stock fourrager de sécurité devra être plus élevé qu'actuellement étant donné l'augmentation de la variabilité interannuelle de la quantité d'herbe disponible à l'échelle de la saison (et probablement des rendements des cultures fourragères annuelles) (Chapitre 4).

Tableau 29 : Tendances passées et évolutions des températures moyennes annuelles et du bilan hydrique climatique selon le scénario A1B sur l'ensemble des stations météorologiques de référence utilisées dans la thèse.

		Chapitre					T						P-ETP						
							Passé			Future2050 - Passé		Future2085 - Passé		Passé			Future2050 - Passé		Future2085 - Passé	
		1	2	3	4	5	moy	Tend	Sign.	Tend	Sign.	Tend	Sign.	moy	Tend	Sign.	Tend	Sign.	Tend	Sign.
†	Aulus			X	X		9,5	↘	*	+1,54	***			2,336	↗	ns	-1,51	***		
†	Gourdon		X	X			12,7	↗	**	+2,37	***			-0,169	↘	.	-0,30	*		
†	Millau		X	X			10,9	↗	**	+2,44	***			-0,761	↘	*	+0,18	ns		
†	St-Girons		X	X	X		12,3	↗	.	+2,12	***			0,385	↘	ns	-0,73	***		
†	Toulouse			X	X		14	↗	ns	+1,89	***			-0,777	↘	.	-0,53	***		
¤	Villefr. de R.		X				12,5	↗	ns					-0,041	↘	ns				
¤	Albi		X				13,7	↗	ns					-0,715	↘	**				
¤	Pau		X				13,6	↗	ns					0,440	=	ns				
!	Quins	X				X	11,5	↗	*	+1,43	***	+2,59	***	0,161	↗	ns	-0,70	***	-1,04	***
!	Laguiole	X				x	8,2	↗	.	+0,82	***	+2,03	***	1,887	↘	*	-0,73	***	-1,04	***

† sur la période 1980-2011, ¤ sur la période 1989-2011, ! sur la période 1980-2009.
« ns »= non significatif. Marge d'erreur : *** = 0,1%, ** =1%, * =5%, . = 10%

Encadré 1: Synthèse de l'exposition au changement climatique sur les zones étudiées

Tout au long de cette thèse, nos travaux ont fait référence au climat de différentes zones pédoclimatiques de Midi-Pyrénées (France) (Figure 3 et Tableau 29). Les enquêtes auprès des éleveurs et les ateliers de conception, abordés respectivement dans le Chapitre 1 et le Chapitre 5 (et leurs annexes), se réfèrent aux zones de Laguiole et de Quins (Aveyron). L'identification des profils de sensibilité et des adaptations des exploitations laitières face à l'aléa climatique, abordée dans le Chapitre 2, a été réalisée pour les zones de Gourdon (Lot), Millau (Aveyron), Saint-Girons (Ariège), Villefranche de Rouergue (Aveyron), Albi (Tarn) et Pau (Pyrénées-Atlantiques). Nos indicateurs d'exposition ont été utilisés dans le Chapitre 3 pour caractériser le changement climatique sur les zones d'Aulus (Ariège), Gourdon, Millau, Saint-Girons et Toulouse (Haute-Garonne). Enfin, nous avons caractérisé le changement climatique à partir d'évolutions dans les fréquences de types d'années et dans l'amplitude de la disponibilité saisonnière de l'herbe pour les zones d'Aulus, Saint-Girons et Toulouse dans le Chapitre 4.

Du Tableau 29 au Tableau 32, les tableaux regroupent les températures moyennes annuelles, le bilan hydrique climatique et les valeurs des indicateurs d'exposition des différentes zones étudiées (pour le passé, et, pour le futur le cas échéant), déjà présentés dans chaque chapitre. En outre, ces analyses ont été complétées pour avoir une vision plus globale de la variabilité spatiale et temporelle de l'exposition des élevages herbagers au changement climatique.

Exposition passée L'ensemble de ces stations représentent une gamme très contrastée de climats tempérés et ces différences de climat s'expriment par des potentiels fourragers contrastés (Tableau 29 et Tableau 30) : on observe des différences de rendements en maïs et de profil de croissance de l'herbe entre zones (disponibilité annuelle de l'herbe, date de début de saison herbagère et quantité d'herbe disponible à chaque saison). En effet, pour ces localités, la température annuelle moyenne du passé est comprise entre 8,2 °C (Laguiole) et 14 °C (Toulouse) et le bilan hydrique climatique moyen journalier varie entre -0,78 mm (Toulouse) et 2,34 mm (Aulus). Les rendements moyens en maïs[*] varient entre 7,3 tMS/ha (Albi) et 11,2 tMS/ha (Aulus) alors que les rendements en ensilage d'herbe[†] varient entre 5,1 tMS/ha à Millau et 12 tMS/ha à Aulus. Concernant les dates de début de saison, le printemps est le plus précoce à Toulouse (6 février) et le plus tardif à Laguiole (5 avril), l'été est le plus précoce à Albi (15 juin) et le plus tardif à Aulus (25 août) et l'hiver est le plus précoce à Laguiole (18 octobre) et le plus tardif à Millau (15 novembre) (valeurs indiquées en jours julien dans le Tableau 30). Lorsque l'on rapporte la quantité d'herbe produite à l'échelle de la saison à l'herbe disponible dans l'année pour exprimer la quantité d'herbe disponible en jours d'avance (ja), le printemps permet de constituer le plus de stock d'avance à Quins (225 jours) et le moins de stock d'avance à Aulus (133 jours) (Tableau 30). De même, l'été-automne permet d'augmenter de 5 jours d'avance les stocks à Aulus alors qu'il est nécessaire d'en distribuer l'équivalent de 91 jours d'avance à Toulouse. En hiver, le stock distribué correspond à 202 jours à Laguiole alors qu'il correspond à 98 jours à Toulouse.

Sur la période 1980-2011 ou 1980-2009 (8 cas), les températures moyennes annuelles ont augmentées significativement pour 5 cas sur 8 et ont diminuées significativement dans 1 cas (Aulus) (Tableau 29). Sur la période 1989-2011 (2 cas) l'augmentation de température n'est pas significative, probablement à cause de la trop faible durée considérée en comparaison avec la variabilité interannuelle des températures. Par ailleurs, le bilan hydrique climatique diminue significativement dans 5 cas sur 9 ; il a tendance à être plus élevé dans 2 cas non significatifs. Les indicateurs d'exposition montrent un début de printemps significativement plus précoce dans un cas (Laguiole) et plus tardif dans deux cas (Aulus, Villefranche de Rouergue) (Tableau 30). Les évolutions de dates de début d'été ne sont pas significatives mais dans 7 cas la tendance est à un été plus précoce. De même, les évolutions ne sont pas significatives pour le début d'hiver ; il est plus précoce dans trois cas, plus tardif dans trois autres et est stable dans les trois derniers cas. Les évolutions du solde d'herbe au printemps ne sont pas significatives (et montrent autant de baisses que de hausses). L'écart entre les besoins et la disponibilité de la ressource en été-automne s'accentue de façon généralisée, sauf à Laguiole (non significatif). Les évolutions du solde d'hiver ne sont pas homogènes entre régions : une augmentation du solde significative (pour 4 non significatives) et deux diminutions du solde significatives (pour 2 non significatives).

Exposition future **A horizon 2050**[‡], les températures seront significativement plus élevées (tous les cas) et le bilan hydrique climatique plus faible (significatif dans 6 cas, le dernier cas correspondant à un bilan hydrique climatique plus élevé, non significatif) (Tableau 31). Ces modifications du climat pourront engendrer un printemps et un été plus précoces (significatif dans tous les cas pour le printemps, significatif pour 4 cas pour l'été) ainsi qu'un hiver plus tardif (significatif dans 2 cas). Du point de vue de la disponibilité herbagère, le printemps pourra être plus productif (significatif dans 3 cas, non significatif dans 1 cas), l'été-automne plus sévère (4 cas significatifs) et l'hiver nécessitera moins de stock (4 cas significatifs). A l'échelle de l'année, la disponibilité herbagère pourra être stable (1 cas non significatif), diminuer (1 cas significatif, 2 cas non significatif) ou augmenter (1 cas significatif, 2 cas non significatif). Par ailleurs, les rendements de maïs pourront baisser de 13 % en moyenne (9 % à Toulouse pour la baisse la moins marquée et -16 % à Saint Girons pour la plus marquée).

A horizon 2085[§], l'évolution du climat (augmentation d'au moins 2°C des températures moyennes et accentuation du bilan hydrique climatique de 1mm, significatif) engendrera un printemps plus précoce que dans le passé (significatif) et qu'en 2050 (Tableau 31 et Tableau 32). De même, l'été sera plus précoce que dans le passé (significatif) et qu'en 2050. L'hiver sera plus tardif que dans le passé (significatif) et qu'en 2050. Le surplus de printemps sera plus faible qu'en 2050 mais restera plus élevé que dans le passé (significatif à Laguiole). Le solde d'été-automne plus faible qu'en 2050 et ne sera pas significativement différent du solde passé. L'hiver sera plus précoce et plus court que dans le passé et qu'en 2050. Sur l'année, la production annuelle sera plus faible qu'en 2050 mais supérieure à la production passée (significatif à Laguiole).

[*] rendements simulés à l'aide du modèle Moderato (Bergez, *et al.* 2001)

[†] rendements simulés à l'aide du modèle Herb'Sim (Duru, *et al.* 2009)

[‡] Aulus, Saint Girons, Millau, Gourdon, Toulouse, Quins et Laguiole

[§] Quins et Laguiole

Tableau 30 : Tendances passées des indicateurs d'exposition sur l'ensemble des stations météorologiques de référence utilisées dans la thèse.

Passé			Printemps			Eté-Automne			Hiver			Production annuelle		
			moy	Tendance /décennie	sign	moy	Tendance /décennie	sign	moy	Tendance /décennie	sign	moy	Tendance/ décennie	sign
Date de début (jour julien)		Aulus	71	4,4	.	237	9,5	ns	298	0,1	ns			
		St-Girons	56	0,4	ns	203	-0,6	ns	305	-1,1	ns			
	†	Millau	54	-3,9	ns	172	-4,6	ns	319	-5,0	ns			
		Gourdon	52	0,1	ns	181	-7,7	ns	305	-0,6	ns			
		Toulouse	37	-1,8	ns	168	-7,3	ns	306	0,9	ns			
		Villefr. de R.	59	5,7	*	182	-10,7	ns	313	0	ns			
	¤	Albi	49	1,3	ns	166	-12,5	ns	317	+9,4	ns			
		Pau	59			177				304				
	!	Quins	58	-1,5	ns	192	-3,5	ns	302	3,7	ns			
		Laguiole	95	-4,9	.	215	-11	ns	291	-2	ns			
Solde herbager ($g.m^{-2}$)		Aulus	477	-31	ns	18	-35	.	-483	-39	**	1 201	-80	**
		St-Girons	397	1	ns	-53	-19	ns	-341	-11	ns	958	-33	ns
	†	Millau	277	-7	ns	-74	-41	.	-189	11	ns	513	-40	ns
		Gourdon	327	14	ns	-32	-24	ns	-292	5	ns	723	-13	ns
		Toulouse	351	5	ns	-147	-29	ns	-200	9	ns	542	-12	ns
		Villefr. de R.	387	16	ns	-128	-45	ns	-258	-26	.	708	-114	ns
	¤	Albi	352	-53	ns	-140	-142	.	-213	-2	ns	621	-110	.
		Pau	322			-166			-296			817		
	!	Quins	375	26	ns	-108	-29	ns	-261	16	.	568	2	ns
		Laguiole	388	-42	ns	6	14	ns	-384	15	ns	641	-25	ns
Solde herbager (ja)		Aulus	133			5			-135					
		St-Girons	180			-24			-154					
	†	Millau	180			-48			-123					
		Gourdon	110			-11			-98					
		Toulouse	217			-91			-123					
		Villefr. de R.	180			-60			-120					
	¤	Albi	186			-74			-113					
		Pau	123			-6			-113					
	!	Quins	225			-65			-156					
		Laguiole	204			3			-202					

† sur la période 1980-2011, ¤ sur la période 1989-2011, ! sur la période 1980-2009.
« ns »= non significatif. Marge d'erreur : *** = 0,1%, ** =1%, * =5%, . = 10%. ja : jour d'avance

2. Apports de la thèse concernant les menaces, opportunités, atouts et faiblesses des élevages herbagers face au changement climatique

Chacunes des menaces, opportunités, atouts et faiblesses des élevages herbagers face au changement climatique sont détaillées ci-après et résumées dans le Tableau 33.

2.1. Menaces

La première menace concerne la baisse de rendement des cultures fourragères annuelles (voir Encadré 1) et l'augmentation du volume d'eau nécessaire à leur irrigation. En effet, sans changement variétal, le positionnement estival du cycle de culture du maïs provoquera un raccourcissement de la période de remplissage des grains pouvant engendrer des baisses de rendements de 1 t/ha d'ici 2035 et de 1,5 t/ha d'ici 2085 (Brisson and Levrault 2010) (i.e. une baisse de 11 % d'ici 2035 et de 17 % d'ici 2085 ; du même ordre de grandeur que les simulations que nous avons effectuées pour huit de nos sites).

En outre, l'augmentation de la variabilité de la disponibilité de l'herbe à l'échelle de la saison (Chapitre 4) risque de modifier les contraintes organisationnelles des systèmes herbagers. L'été plus

long et plus sévère nécessitera de constituer plus de stock fourrager au cours de l'année. Ceci sera notamment permis par une plus forte productivité des prairies au printemps (en tMS/ha). En conséquence, il pourra être nécessaire d'augmenter la part des surfaces de prairies fauchées. La plus forte productivité au printemps s'accompagnera d'un raccourcissement de la durée du printemps et demandera aux éleveurs plus de réactivité dans la gestion quotidienne de leur système fourrager, notamment concernant les fauches, les mises à l'herbe et les déplacements des animaux d'une parcelle à l'autre. Par ailleurs, des problèmes d'accessibilité à la ressource herbagère sont à craindre : l'avancée du printemps et le recul de l'hiver augmentent les risques concernant la portance des sols au début et à la fin de la période de croissance de l'herbe. Enfin, l'augmentation de la variabilité interannuelle des rendements fourragers (Chapitre 4 pour l'herbe ; supposition pour les cultures fourragères annuelles) risquerait d'abaisser le revenu des éleveurs. En effet, l'augmentation du profit engendré par des conditions climatiques très favorables ne compenserait pas totalement la baisse du profit occasionnée par des conditions climatiques très défavorables, et ce, même si l'on faisait abstraction des variations de prix des aliments qu'occasionnent les aléas climatiques (Mosnier 2009).

Tableau 31 : Comparaison des valeurs des indicateurs d'exposition entre le passé et le futur à horizon 2050 selon le scénario A1B.

Passé – Futur 2050			Printemps			Eté-Automne			Hiver			Production annuelle		
			Futur-Passé	% de la valeur passée	sign.	Futur-Passé	% de la valeur passée	sign.	Futur-Passé	% de la valeur passée	sign.			
Date de début (jour)	†	Aulus	-5,7	-8%	*	-37,7	-16%	***	20,9	7%	***			
		St-Girons	-4,7	-8%	*	-31,1	-15%	**	9,2	3%	ns			
		Millau	-10,0	-18%	**	-16,1	-9%	ns	23,3	7%	ns			
		Gourdon	-6,7	-13%	*	-22,6	-13%	**	15,1	5%	ns			
		Toulouse	-4,3	-12%	.	-19,3	-12%	**	3,5	1%	ns			
	!	Quins	-13,7	-24%	***	-8,2	-4%	ns	2,0	1%	ns			
		Laguiole	-17,0	-18%	***	-3,1	-1%	ns	7,2	2%	.			
			Futur-Passé	% de la prod. annuelle	sign.	Futur-Passé	% de la prod. annuelle	sign.	Futur-Passé	% de la prod. annuelle	sign.	Futur-Passé	% de la prod. annuelle	sign.
Solde herbager (ja)	†	Aulus	0	0%	ns	-1	0%	ns	21	9%	***	4	2%	ns
		St-Girons	-14	-6%	ns	-39	-18%	***	12	6%	***	-42	-20%	***
		Millau	37	20%	**	-25	-13%	.	29	15%	ns	24	13%	ns
		Gourdon	7	4%	ns	-25	-13%	*	23	12%	ns	-9	-5%	ns
		Toulouse	-10	-6%	ns	-29	-17%	*	3	2%	ns	-10	-6%	ns
	!	Quins	49,9	15%	.	-17	-5%	ns	28	8%	*	47,6	14%	ns
		Laguiole	108	32%	***	-22,7	-7%	ns	36,9	11%	***	87,8	26%	**

Comparaison avec : † la période 1980-2011,! la période 1980-2009.
« ns »= non significatif. Marge d'erreur : *** = 0,1%, ** =1%, * =5%, . = 10%. ja : jour d'avance

Tableau 32 : Comparaison des valeurs des indicateurs d'exposition entre le passé et le futur à horizon 2085 selon le scénario A1B.

Passé – Futur 2085		Printemps			Eté-Automne			Hiver			Production annuelle		
		Futur-Passé	% de la valeur passée	sign.	Futur-Passé	% de la valeur passée	sign.	Futur-Passé	% de la valeur passée	sign.			
Date de début (jour)	Quins	-18,3	-32%	***	-23,6	-12%	**	23,3	8%	***			
	Laguiole	-26,1	-27%	***	-29,9	-14%	***	13,3	5%	***			
		Futur-Passé	% de la prod. annuelle	sign.	Futur-Passé	% de la prod. annuelle	sign.	Futur-Passé	% de la prod. annuelle	sign.	Futur-Passé	% de la prod. annuelle	sign.
Solde herbager (ja)	Quins	31	9%	ns	-31	-9%	ns	65,5	19%	***	32	9%	ns
	Laguiole	45	13%	.	0	0%	ns	66,0	19%	***	51,8	15%	.

Comparaison avec la période 1980-2009
« ns »= non significatif. Marge d'erreur : *** = 0,1%, ** =1%, * =5%, . = 10%. ja : jour d'avance

2.2. Opportunités

Le changement climatique offre néanmoins plusieurs opportunités aux systèmes d'élevage herbagers. D'abord, la disponibilité annuelle de l'herbe sera plus importante dans plusieurs régions tempérées dans un futur proche (2050) voire même lointain (2085, zones de Laguiole et Quins), et ce malgré la diminution du bilan hydrique climatique (Tableau 31 et Tableau 32, Chapitre 3 et Chapitre 5). En effet, le changement climatique s'accompagne d'une augmentation du CO_2 atmosphérique et d'un allongement de la période de croissance des végétaux (Linderholm 2006; Rivington, *et al.* 2013); deux phénomènes qui ont tendance à augmenter la production de biomasse annuelle (Graux, *et al.* 2013). Plus particulièrement, l'augmentation de la concentration de CO_2 atmosphérique favorise la photosynthèse (Hopkins and Del Prado 2007; Soussana and Luscher 2007). Ceci aura pour conséquence d'augmenter la productivité des systèmes d'élevage herbagers et de diminuer leurs coûts de production s'ils pratiquent le pâturage (Dumont, *et al.* 2013), notamment par le raccourcissement de la durée d'hiver (Chapitre 3).

Ensuite, des leviers existent déjà pour faire face à l'augmentation de la variabilité climatique (Chapitre 4), à l'allongement de l'été-automne (Chapitre 3) et à la baisse du bilan hydrique climatique (Tableau 29). Il s'agit de modifications dans l'assolement : intégration de cultures dérobées, utilisation de cultures à double fin, substitution du maïs par du sorgho et/ou des prairies. Les cultures dérobées semées juste après les récoltes des céréales permettent d'assurer une ressource fourragère (qui peut être pâturée ou gardée pour la fauche) pendant l'été, à condition que leur levée ne soit pas interrompue par un manque d'eau. Les cultures à double fin augmentent la flexibilité du système dans la gestion du pâturage et des stocks fourragers. La substitution du maïs par des couverts moins sensibles à la sécheresse estivale permet de faire face aux diminutions de rendement de maïs attendues. En outre, il semblerait que les éleveurs favoriseraient les prairies temporaires aux prairies permanentes face au changement climatique (Chapitre 5 et ses annexes) principalement pour leur meilleure productivité en période estivale. D'ailleurs, les éleveurs voient dans les prairies temporaires plus d'opportunités que dans les prairies permanentes pour ajuster la gestion du système fourrager en fonction de la variabilité climatique.

2.3. Atouts

Dans la région étudiée (Sud-Ouest), les exploitations d'élevage auraient des capacités d'adaptation qui surpasseraient l'ampleur des adaptations nécessaires pour faire face au changement climatique du siècle prochain. En effet, des modifications de gestion du système fourrager et du système d'alimentation pourraient suffire pour faire face au climat attendu. Ces modifications, que nous appelons « tactiques », renvoient aux « autonomous strategies » décrites par Bindi and Olesen (2010) et Olesen, *et al.* (2011). Il s'agit d'adaptations le plus souvent à court terme et à l'échelle de l'exploitation, qui n'impliquent pas de changement majeur du système d'élevage, et qui peuvent être mises en place indépendamment du contexte socio-économique (ex : filière, réglementation…). Les systèmes conçus lors de nos ateliers avec des éleveurs ont montré que pour deux cas sur quatre, aucune modification de structure, d'objectif à long terme ou d'organisation stratégique de l'exploitation (ou « planned adaptation ») n'a été nécessaire pour faire face au climat à horizon 2085. De la même manière, l'évolution en Ecosse du climat ne contraindrait pas les exploitations agricoles à modifier leurs objectifs et leur organisation sur le long terme (Rivington 2010). En effet, les exploitations Ecossaises semblent être suffisamment résilientes face au changement climatique : *« The combination of altered weather variability and adaptation options are likely to change the appearance of farming practices (i.e. silage conservation for summer feeding, reduced animal grazing*

during dry periods, rotations including novel crops, etc..), but overall the farming system types will likely remain similar to their current appearance.". En d'autres termes, la flexibilité actuelle du système suffirait pour faire face au climat futur. Il ne serait donc pas nécessaire de modifier les dates de vêlage, la durée de l'inter-vêlage, les objectifs de production, le dimensionnement du système, l'utilisation des sols ou le niveau de fertilisation. Des modifications majeures sont néanmoins à prévoir quant à la conduite du système fourrager et quant au système d'alimentation.

Cet atout face au changement climatique (les capacités d'adaptations des systèmes actuels suffiraient) est d'autant plus grand que les éleveurs connaissent les leviers d'adaptations de leurs systèmes et qu'ils imaginent même des adaptations de plus grande ampleur que les adaptations nécessaires. En effet, plusieurs adaptations imaginées lors des entretiens (Chapitre 1) n'ont pas été nécessaires pour adapter les systèmes au climat futur dans les ateliers (Chapitre 5 et ses annexes). Par exemple, augmenter la fertilisation et l'irrigation, décaler ou regrouper les dates de vêlages n'ont pas été nécessaires. De même, pour faire face à une année très défavorable, il n'a pas été nécessaire de vendre d'animaux. Contrairement aux propositions évoquées en entretien, les ressources extérieures (estives, bord des routes, feuilles des arbres) n'ont pas été mobilisées; elles ont même été supprimées dans un cas (suppression des estives pour le système laitier de Montagne). Par ailleurs, certaines adaptations imaginées pour faire face à une diminution de la ressource fourragère (diminution de l'effectif, diminution du niveau de production des animaux –allant jusqu'au changement d'espèce ou de race) n'ont pas été nécessaires.

Un atout supplémentaire réside dans le fait que les évolutions actuelles des exploitations semblent aller dans le sens d'une meilleure adaptation au climat futur. D'après les évolutions observées sur les exploitations laitières du Sud-Ouest les 5 années suivant 2003, les exploitations ont initié une diminution de la part de maïs dans leur SFP. Cette modification permettrait de faire face à la baisse attendue du rendement de maïs. Suite à 2003, ces exploitations ont également diminué leur chargement. La baisse du chargement sur quelques années permettrait aux exploitations d'augmenter leur stock de sécurité et faire ainsi face à l'augmentation de la variabilité de la production herbagère sans diminuer leur niveau de production sur le long terme. En revanche, diminuer le chargement pour les systèmes herbagers ne permettrait pas de tirer profit de l'augmentation de la disponibilité de l'herbe à l'échelle de l'année.

Le dernier atout des élevages face au changement climatique que nous avons fait ressortir est la position privilégiée des éleveurs comme observateurs des évolutions du climat. L'ensemble des éleveurs que nous avons enquêtés constate que le climat change (16 personnes, Chapitre 1), et ce malgré le caractère lent et progressif du changement climatique qui pourrait le rendre invisible et abstrait (Berrang-Ford, *et al.* 2011; Fleming and Vanclay 2010). Chaque éleveur a observé des évolutions du climat au travers des variables climatiques classiques, de la faune et de la flore, des performances agricoles et des nécessaires modifications de pratiques; qu'il s'agisse d'un éleveur *convaincu*, *négateur* ou *indécis*.

2.4. Faiblesses

Cette thèse a permis d'identifier une faiblesse majeure des systèmes d'élevage herbagers face au changement climatique : la perception qu'ont les éleveurs de ce changement pourrait constituer un verrou à l'adaptation des élevages. D'abord, une partie des éleveurs enquêtés (Chapitre 1) et plus largement une partie des agriculteurs nient ou doutent de l'existence du changement climatique

(*négateurs* et *indécis*). Les *négateurs* pensent que l'évolution actuelle du climat est naturelle et inscrite dans un cycle. Ils ont la conviction que le climat redeviendra « normal ». Les *indécis* estiment manquer de recul. *Négateurs* et *indécis* ne portent pas de crédit aux études scientifiques sur le changement climatique. Ceci pourrait avoir des conséquences tant à l'échelle collective qu'individuelle. D'une part le manque de conscience du changement climatique menace l'efficacité des plans d'adaptation et d'atténuation menés à l'échelle d'un territoire par un manque d'engagement des agriculteurs (Arbuckle, *et al.* 2013b; Arbuckle, *et al.* 2013a). D'autre part, le manque de conscience du changement climatique diminue les capacités d'adaptation des agriculteurs (Marshall, *et al.* 2013; Wheeler, *et al.* 2013). Ils sont moins enclins à modifier leur comportement et à préparer des adaptations pour faire face au changement climatique. Ensuite, même lorsque l'éleveur considère le changement climatique comme réel, il ne s'agit pas d'une priorité pour lui (Chapitre 1). Il est alors possible que l'éleveur ne prenne pas en compte le changement climatique lorsqu'il fait évoluer son élevage face au contexte socio-économique et réglementaire. Enfin, la représentation qu'ont les éleveurs des conséquences du changement climatique sur les ressources herbagères est en contradiction avec les évolutions attendues (des résultats similaires ont été obtenus par Barnes and Toma 2011) : les éleveurs imaginent une diminution de la productivité des prairies alors qu'il faut plutôt s'attendre à une augmentation, au moins jusqu'en 2050 (Graux, *et al.* 2013; Ruget, *et al.* 2010; Sautier, *et al.* 2013b). Les éleveurs ne seraient donc pas préparés à une augmentation en moyenne de la disponibilité de l'herbe à l'échelle annuelle.

Une deuxième faiblesse des élevages face au changement climatique réside dans la prépondérance des évolutions réglementaires et socio-économiques dans les moteurs des évolutions des systèmes agricoles, reléguant ainsi la question du climat en second rang. On peut notamment citer les travaux de Veysset, *et al.* (2007) qui attribuent la diminution du chargement en systèmes bovins allaitants du Charolais après la sécheresse de 2003 à une tendance plus générale attribuée à l'Agenda 2000, qui impose une contrainte plus forte sur le chargement pour obtenir une prime à l'extensification. De même, des travaux de modélisation montrent que les choix stratégiques des exploitations de bovins laitiers en Norvège dépendent des orientations des politiques publiques et non de la variabilité des rendements, fortement soumise à variabilité climatique (Lien and Hardaker 2001). En outre, alors que nos ateliers de conception n'ont abouti à aucun système en rupture par rapport à l'existant, prendre en compte une évolution du contexte socio-économique lors de la conception participative de systèmes adaptés au changement climatique engendre des modifications importantes d'assolement et de système d'alimentation (Martin, *et al.* 2011)[*]. Au-delà du secteur agricole, il a été montré que les mesures d'adaptation au changement climatique sont rarement motivées par la question climatique seule ; d'autres facteurs justifient ces mesures d'adaptation (Berrang-Ford, *et al.* 2011).

Enfin, la moitié des exploitations bovines laitières du Sud-Ouest semblent ne pas être assez robustes ou flexibles pour faire face à une variabilité climatique croissante du climat (Seneviratne, *et al.* 2012) et de la disponibilité fourragère (Sautier, *et al.* 2013a). En effet, lors de l'année 2003, seulement la moitié des exploitations laitières du Sud-Ouest ont maintenu leur production laitière grâce à leur sous-chargement associé à une irrigation du maïs. Pour les autres exploitations, i.e.

[*] Ces travaux utilisent le même outil de conception que celui que nous avons mobilisé dans notre thèse, à savoir le Rami Fourrager.

celles qui n'ont pas pu maintenir leur niveau de production laitière, il a pu s'agir d'un manque de réactivité dans l'achat de fourrages supplémentaires (pénurie de fourrages à l'échelle de l'Europe) et/ou d'une mauvaise qualité des fourrages consommés (pâturés, fauchés ou achetés).

Tableau 33 : Apports de la thèse concernant les atouts, faiblesses, opportunités et menaces des élevages herbagers face au changement climatique.

	Atouts	Faiblesses
Apports de la thèse	Dans certains cas, les systèmes actuels seraient assez flexibles pour faire face au changement climatique. Les adaptations imaginées sont de plus grande ampleur que les adaptations nécessaires. Les exploitations évoluent déjà vers une meilleure adaptation au changement climatique. Les éleveurs observent des évolutions du climat.	Manque de conscience du changement climatique chez les éleveurs. La représentation qu'ont les éleveurs du changement climatique est contradictoire avec les évolutions attendues. Le changement climatique n'est pas une priorité pour les éleveurs. Le climat est un moteur secondaire des évolutions des exploitations (en comparaison aux contextes économique et réglementaire).
	Opportunités	**Menaces**
Apports de la thèse	**Conséquences sur les ressources fourragères** Selon les lieux, augmentation de la quantité d'herbe disponible sur l'année Raccourcissement de l'hiver **Modification de l'assolement** -cultures dérobées -cultures à double fin, -substitution du maïs par d'autres céréales ou par des prairies -augmentation de la part de prairies temporaires dans la SFP	**Conséquences sur les ressources fourragères** Diminution des rendements de maïs Augmentation des volumes d'eau nécessaires à l'irrigation du maïs Augmentation de la variabilité de la disponibilité de la ressource herbagère -d'une saison à l'autre Augmentation de l'intensité de la pousse d'herbe au printemps (printemps plus court et plus productif) Augmentation de la durée et de la sévérité de l'été -d'une année à l'autre, avec risque de diminution du profit

3. Apports méthodologiques de la thèse

Nous discutons ici en quoi les méthodes proposées dans notre thèse permettent d'atténuer les faiblesses et accentuer les atouts des élevages herbagers pour être en mesure de saisir les opportunités et faire face aux menaces du changement climatique.

3.1. Une nouvelle façon de représenter l'exposition des systèmes d'élevage herbagers au changement climatique

Nous avons proposé dans cette thèse de nouveaux indicateurs d'exposition des systèmes d'élevage herbagers au changement climatique. Ces indicateurs sont les dates de début de saison fourragère (printemps, été-automne et hiver) et le solde d'herbe au pâturage pour chacune de ces saisons. Contrairement aux indicateurs climatiques ou agroclimatiques existants, ils permettent d'exprimer l'exposition à l'échelle de la saison, échelle qui correspond à la prise de décision des éleveurs (Girard, *et al.* 2001). Ils prennent également en compte le potentiel herbager induit par les conditions climatiques à l'échelle locale, ainsi que les contraintes de gestion du pâturage et d'alimentation. D'ailleurs, ils rendent mieux compte d'un changement de conditions climatiques que des indicateurs classiques tels que la production fourragère annuelle. En cela, ils permettent aux éleveurs d'anticiper les contraintes que pourrait apporter le changement climatique dans la gestion de leurs systèmes

(par exemple : déplacement et accentuation des pics de travail, besoin de plus de réactivité, besoin d'augmenter les capacités des bâtiments de stockage).

3.2. Une nouvelle méthode de conception de systèmes

Nous avons également mis au point une méthode innovante de conception de systèmes d'élevage adaptés au changement climatique. Contrairement aux méthodes existantes, elle prend explicitement en compte la situation climatique moyenne, sa variabilité climatique associée et le caractère imprévisible du climat. Notre méthode de conception repose sur l'hybridation des approches par modélisation et des approches participatives. Il s'agit d'utiliser la modélisation des systèmes biophysiques pour mettre les éleveurs en situation de conception et de gestion d'un système d'élevage. Dans un premier temps les éleveurs ont à imaginer une structure et une conduite d'élevage pour faire face au changement climatique moyen. Dans un second, les éleveurs ont à conduire et, le cas échéant à réviser, le système conçu en le mettant à l'épreuve d'une année climatique fréquente du futur. Enfin, les éleveurs ont à conduire le système conçu pour une année dont le climat et la production fourragère ne sont découverts qu'au fur et à mesure. Ainsi notre méthode permet de tester si le système conçu initialement a une flexibilité suffisante pour faire face à la variabilité climatique et l'incertain.

3.3. Diversité des objets intermédiaires pour accompagner l'adaptation au changement climatique : Quels indicateurs, en fonction de quelle utilisation ?

Notre analyse AFOM* a fait ressortir que l'enjeu principal pour accompagner l'adaptation des élevages réside dans une communication efficace sur les manifestations et les conséquences du changement climatique. Différentes façons de représenter une situation climatique ont été abordées au cours de cette thèse. Le choix d'une d'entre elles dépend du public et de l'objectif visés. Les agriculteurs, conseillers agricoles et les décideurs n'ont ni les mêmes rapports au climat, ni les mêmes objectifs. Il importe alors de fournir à chacun une information en lien avec leurs représentations mentales et leurs préoccupations.

L'accompagnement de l'adaptation au changement climatique passe par deux étapes :

1- la communication et la facilitation des discussions sur le changement climatique sensu stricto entre scientifiques, éleveurs et autres porteurs d'enjeux, et décideurs. L'objectif est d'augmenter la prise de conscience du changement climatique. Les destinataires sont à la fois les agriculteurs, les conseillers et les décideurs.

2- La communication et la facilitation des discussions sur les conséquences du changement climatique à l'échelle de l'exploitation agricole entre scientifiques, éleveurs et décideurs. L'objectif est d'aider les agriculteurs et les conseillers agricoles à anticiper le changement climatique et ainsi s'y adapter. Il s'agit également d'aider les décideurs à prendre en compte le changement climatique dans l'élaboration des politiques agricoles.

Seuls les indicateurs d'exposition peuvent faire office de supports à la communication et à la facilitation des discussions sur le changement climatique. Ils permettent de quantifier les effets du changement climatique sur des repères simples et familiers : les dates de début de saison. En outre, ils permettent de représenter les évolutions du climat au travers de critères structurants du fonctionnement d'une exploitation d'élevage : la quantité d'herbe disponible à chaque saison. Pour l'éleveur ou pour le conseiller agricole, il s'agit d'indicateurs qu'il peut facilement mettre en lien avec

* AFOM : Atouts, Faiblesses, Opportunités, Menaces

ses observations (modification de la date de début de pâturage, décalage des dates de fauches, évolution des rendements herbagers…).

La communication et la facilitation des discussions sur les conséquences du changement climatique à l'échelle de l'exploitation agricole peut être réalisée par les indicateurs d'exposition et par la méthode de conception de systèmes. D'abord, les indicateurs d'exposition permettent aux éleveurs, conseillers et décideurs de déduire les implications du changement climatique en termes de charge de travail, capacité de stockage, chargement de l'exploitation, quantité de fourrages à distribuer sur l'année… Pour les décideurs, ces indicateurs permettent également d'identifier les territoires les plus exposés au changement et à la variabilité climatiques. Ensuite la méthode de conception de systèmes au changement et à la variabilité climatiques permet aux éleveurs de se représenter de façon concrète les conséquences du changement climatique sur le fonctionnement d'un élevage et les adaptations possibles (à partir d'une exploitation virtuelle et en tenant compte du caractère incertain du climat). Par cette mise en situation, l'éleveur prend à la fois conscience des atouts et des faiblesses d'une exploitation semblable à la sienne face aux menaces et opportunités induites par le changement climatique.

Les indicateurs d'exposition ne pourraient pas être utilisés pour la conception de systèmes à proprement parler. Au plus, ils peuvent donner un cadre à la conception. La conception nécessite des indicateurs à une échelle de temps plus fine que l'échelle de la saison. Ils doivent rendre compte de la disponibilité de la ressource fourragère et de son accessibilité (portance des sols, pluies…). Ils doivent également être crédibles. C'est pourquoi les supports à la conception que nous avons utilisés :

1- représentent le climat et le potentiel fourrager à l'échelle journalière (températures moyennes, bilan hydrique climatique, vitesse de croissance de l'herbe) ou d'une période (précipitations, quantité d'herbe pâturable, rendements en fauche, rendements en cultures annuelles),
2- vont des variables climatiques primaires (température, précipitations, bilan hydrique climatique) à des variables plus intégrées qui impliquent d'utiliser un modèle de simulation (rendement des cultures annuelles, quantité d'herbe disponible). Les variables climatiques primaires permettent de représenter les contraintes d'accessibilité et d'expliquer les variations des variables intégrées.

Par ailleurs, les variables climatiques et de performances agronomiques ne doivent pas être représentées à la même échelle temporelle selon que l'on s'interroge sur la stratégie du système pour faire face au changement climatique ou que l'on s'interroge sur sa conduite pour faire face à la variabilité climatique. L'élaboration de la conduite d'un système d'élevage nécessite en effet des informations plus précises que pour l'élaboration de sa stratégie (date de début et d'arrêt de pâturage à la semaine près, répartition des animaux sur les parcelles, quantité de stock fourrager restant au cours de l'année…).

Enfin, la méthode de conception que nous avons développée pourrait participer à l'apprentissage des éleveurs concernant le changement climatique, ses conséquences sur la ressource fourragère et le fonctionnement des systèmes élevages à l'échelle de l'exploitation. Les retours des participants suite à chaque atelier ont fait ressortir l'intérêt de notre méthode pour l'appropriation par les éleveurs des connaissances scientifiques sur l'évolution du climat et ses conséquences sur la

ressource fourragère. En effet, tous les participants ont estimé que chacun des trois ateliers leur avait permis d'apprendre sur le changement climatique et ses conséquences sur les ressources fourragères (principalement suite à l'atelier 1), et sur les adaptations à envisager ou à écarter (tous les ateliers). Concernant le climat, il s'agit là d'influer sur la construction sociale du climat (Hulme, *et al.* 2009), en modifiant la façon dont les éleveurs vont percevoir un nouvel évènement climatique, interpréter les évolutions passées du climat et imaginer le climat futur. Il ressort également que les ateliers ont permis à des éleveurs de mieux comprendre le fonctionnement d'une exploitation d'élevage, notamment concernant les relations entre le système fourrager, le système d'alimentation, et le système animal. Ces enseignements sur le fonctionnement de l'exploitation ont été permis par la représentation de la globalité du système sur le plateau de jeu et dans le module d'évaluation et par les discussions entre participants.

4. Limites de l'étude

Les incertitudes concernant l'ampleur et la dynamique du changement climatique futur n'ont pas été traitées dans cette thèse. Même si le changement climatique est certain, les évolutions des variables climatiques dépendront de l'évolution des activités humaines. Le GIEC a retenu plusieurs scénarios socio-économiques qui correspondent à différentes dynamiques d'émissions de gaz à effet de serre à l'échelle de la planète pour le siècle à venir (Nakicenovic, *et al.* 2000). Parmi ces scénarios, nous avons travaillé sur le scénario A1B qui correspond à une estimation moyenne de l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Pour la période 2035-2065, l'ensemble des scénarios concorde sur l'évolution du climat (Graux, *et al.* 2013). Néanmoins, les différences de climat entre scénarios sont nettes lorsqu'il s'agit du futur lointain (2070-2100) (IPCC-TGICA 2007). Par ailleurs, nous n'avons pas tenu compte des incertitudes liées à la modélisation des échanges d'énergies à l'échelle du système climatique car nous n'avons pas pris en compte l'ensemble des jeux de simulations disponibles mais considéré un seul modèle climatique parmi d'autres (le modèle ARPEGE-Climat, (Déqué, *et al.* 1994)). De la même manière, nous n'avons pas tenu compte des incertitudes liées à la méthode de régionalisation utilisée ; nous nous sommes appuyés sur des simulations provenant d'une unique méthode de régionalisation (méthode des types de temps, (Pagé, *et al.* 2008)). On peut également évoquer les incertitudes liées au modèle de simulation de croissance de l'herbe, le modèle Herb'Sim. Ces incertitudes de multiples origines pourraient être prises en compte dans le calcul des indicateurs d'exposition en faisant état de la variabilité associée à chaque valeur d'indicateur. Elles pourraient également être prises en compte pour les ateliers de conception de systèmes, en les reproduisant pour plusieurs scénarios socio-économiques. Néanmoins, il reste un compromis entre efficacité de la communication sur le changement climatique, complexité de l'information apportée et temps nécessaire pour traiter l'ensemble des possibilités du changement climatique. Traiter de façon claire et intelligible de l'incertitude liée à la fois au scénario socio-économique, au modèle climatique, à la méthode de régionalisation et au modèle d'impact (ici Herb'Sim) reste un enjeu pour la communauté scientifique, d'autant plus que la société est mal outillée pour aborder les contextes complexes, incertains et dynamiques (Füssel 2007). En effet, l'augmentation des connaissances que l'on peut caractériser par l'augmentation du nombre d'informations et de leur complexité ainsi que par des informations qui peuvent paraître contradictoires sont susceptibles de rendre la prise de décision plus difficile ; il s'agit là de la notion de « negative learning » (Oppenheimer, *et al.* 2008) ou « disconcerting learning » (Hannart, *et al.* 2013).

Pour être en mesure de caractériser l'exposition de l'ensemble des systèmes d'élevage au changement climatique, les indicateurs d'exposition développés dans la thèse demandent à être déclinés pour d'autres ressources fourragères que l'herbe, notamment le maïs. Les indicateurs pourraient être, en distinguant les systèmes en sec et en irrigué, la date de semis, la date de maturité, le rendement et, le cas échant, le volume d'eau nécessaire à l'irrigation. En outre, l'avancée des connaissances scientifiques sur les effets conjoints de l'augmentation de la concentration de CO_2, des températures et de la fréquence des sécheresses sur la disponibilité des ressources fourragères permettront de représenter de façon plus exacte la disponibilité de la ressource fourragère dans le futur. Pour la ressource herbagère, il s'agit d'identifier les évolutions probables des espèces prairiales composant les prairies permanentes, notamment suite à une augmentation de la variabilité climatique, et plus particulièrement concernant la fréquence accrue des vagues de chaleurs et des sécheresses. Ces aspects n'ont pas été intégrés dans notre thèse étant donné que nous avons considéré que la composition des prairies permanentes était stable d'une année à l'autre. De premiers résultats ont notamment montré que le CO_2 favoriserait la récupération du fonctionnement de la prairie permanente suite à un extrême climatique estival, et diminuerait ainsi l'effet négatif d'une canicule sur la productivité (Picon-Cochard, *et al.* 2013). Pour les prairies semées, les étés plus chauds et secs pourront conduire à la sélection des populations végétales les plus économes en énergies (tolérantes à la déshydratation et/ou ayant une dormance estivale) (Durand, *et al.* 2013). Néanmoins, ces résultats restent fragmentaires et leur intégration dans un modèle de simulation est prématurée à l'heure actuelle.

Cette thèse présente des outils et des méthodes innovants pour accompagner l'adaptation au changement climatique. Néanmoins, leur efficacité auprès des éleveurs doit être confirmée tant au niveau des apprentissages qu'au niveau des modifications de systèmes qu'ils génèrent. Les discussions que nous avons eues avec les éleveurs enquêtés et ceux qui ont assisté aux ateliers de conception (dix-huit éleveurs) sur la base des indicateurs d'exposition témoignent de l'intérêt de ces indicateurs pour engager la discussion sur le changement climatique passé[*] et pour communiquer sur le changement futur[†]. Concernant les ateliers de conception, le discours des éleveurs au cours des ateliers ainsi que leurs réponses à des questionnaires individuels remplis à la fin de chaque atelier ont permis de pressentir l'intérêt de telles démarches pour l'apprentissage sur le changement climatique et les adaptations possibles[‡].

Par ailleurs, les outils et méthodes que nous proposons dans cette thèse sont clairement destinés au Développement agricole. Le conseil agricole a une position privilégiée en tant que médium entre recherche et terrain qu'il est primordial de valoriser pour préparer l'adaptation des élevages au changement climatique. En effet, son rôle est d'autant plus grand que la communication sur le changement climatique est plus efficace lorsqu'elle s'effectue par le biais de réseaux préexistants (Meinke, *et al.* 2006). On peut alors s'interroger quant aux modalités de diffusion des outils et méthodes proposés dans cette thèse. Pour les indicateurs d'exposition, il pourrait s'agir d'une

[*] « La modification, je la vois plus dans le contraste saisonnier ». Eleveur allaitant, zone Vallées.

[†] « Je ne savais pas que c'était possible de faire des prévisions comme ça ; on ne réalise pas trop quand on entend + 1°C sur 20 ans. ». Eleveur laitier, zone Vallées.

[‡] Par exemple, éleveur allaitant en zone Vallées après le premier atelier : «Pouvez-vous détailler ce que cet atelier vous a le plus apporté ?» «La certitude que le climat change.» ; « Qu'est-ce qui dans cet atelier vous a particulièrement intéressé ou plu ? » « Qu'il existe des solutions pour l'avenir. »

application web qui permette de calculer en ligne les indicateurs d'exposition à partir de données climatiques. Le modèle de simulation de croissance de l'herbe Herb'sim a été diffusé de cette manière[*], devenant ainsi un outil d'aide à la décision et un support à la formation à part entière pour les professionnels. Concernant la méthode de conception, sa diffusion est plus compliquée pour plusieurs raisons. D'abord, une formation est nécessaire pour savoir préparer les supports aux ateliers, et notamment les baguettes fourrages (Morel 2012). Ensuite, ces ateliers demandent du temps de préparation et de réalisation : il s'agit à la fois d'un frein à son utilisation (côté structures de conseil et institutions) et à la participation (côté éleveurs). La préparation d'un nouveau jeu de supports est nécessaire dès que l'on change de zone pédoclimatique et demande deux jours pour une personne confirmée (Morel 2012). Ces supports pouvant être réutilisés d'un groupe à un autre, il s'agit d'un investissement et non d'une charge. En outre, chaque atelier doit être conduit par deux animateurs et demande aux éleveurs de se libérer trois demi-journées. Notre expérience et les retours d'éleveurs et conseillers ne montrent pas de solution évidente pour diminuer la durée du cycle de conception ou augmenter l'attractivité des ateliers pour les éleveurs et conseillers. En effet, l'atelier le plus apprécié est l'atelier 3 mais les ateliers 1 et 2 sont nécessaires pour prendre en main l'outil.

5. Place des éleveurs dans la recherche

Lorsque des individus ou des collectifs « non-scientifiques » sont associés à un projet de recherche, leur participation peut prendre plusieurs formes. Selon Barreteau *et al.,* (2010), elle peut être :

- contractuelle. Le chercheur conduit le projet et les autres participants s'impliquent dans le projet pour fournir un service ou un appui, selon des modalités définies le chercheur.
- consultative. Le chercheur conduit le projet tout en consultant les autres participants, dans l'objectif de prendre en compte leurs contraintes et priorités.
- collaborative. Le chercheur conduit le projet tout en travaillant étroitement avec les autres participants, avec une volonté d'échange de connaissances et de points de vue.
- Collégiale. La conduite et la responsabilité du projet est répartie entre le chercheur et les autres participants, les décisions naissent d'accords ou de consensus.

Si l'on interroge la participation des éleveurs à mon projet de thèse (i.e. à la définition des objectifs et de la question de recherche et à la construction de la méthodologie), elle relève de la forme contractuelle : je n'ai pas cherché à intégrer leurs priorités dans l'orientation de ma recherche (d'autant plus que, d'après les entretiens que j'ai réalisés, le changement climatique n'est pas une préoccupation pour eux).

En reprenant ce même cadre, et en nous focalisant sur le processus de production de résultats et sur l'utilisation de la méthode que j'ai développée, ma thèse se place également dans une participation consultative et collaborative. D'une part, les entretiens m'ont permis de connaître les priorités et préoccupations des éleveurs dans une problématique plus générale que le changement climatique. L'interaction était alors consultative. D'autre part, les ateliers de conception ont été menés dans l'objectif d'un échange mutuel de connaissances : entre éleveurs, entre éleveurs et scientifiques, et parfois avec un conseiller agricole. Les connaissances que j'apportais aux ateliers étaient des connaissances sur le changement climatique et ses conséquences sur la ressource fourragère. Les éleveurs apportaient leurs connaissances sur la gestion d'une exploitation et sur les

[*] http://147.99.111.190/application/herbsim/

contraintes et spécificités de la zone. L'élaboration de systèmes adaptés au changement climatique était alors réalisée de façon collaborative.

Par ailleurs, la façon dont le chercheur va considérer chaque participant peut suivre plusieurs modalités. Un participant peut être considéré comme individu à part entière, et le chercheur s'intéressera à la vision propre de ce participant. Il peut être considéré comme faisant partie d'un groupe homogène, dont le chercheur ne tentera pas de prendre en compte la diversité des points de vu à l'intérieur de ce groupe. Enfin, il peut être considéré comme faisant partie d'un groupe avec une diversité de point de vue, et le chercheur essayera de traiter cette diversité en constituant des sous-groupes (Barreteau, *et al.* 2010). Dans mon étude sur la perception du changement climatique par les éleveurs, j'ai cherché à recueillir le point de vue de chacun de façon individuelle. En revanche, lors des ateliers de conception, les éleveurs ont été impliqués à la recherche en tant que groupe hétérogène : je cherchais à faire émerger des discussions, voire des adaptations alternatives, grâce aux divergences de points de vue.

Dans ma thèse, les éleveurs ont occupé plusieurs rôles. Ils ont été successivement, de façon simultanée ou non, source d'information, objet de recherche, destinataire de la recherche, et mis à contribution pour valider les résultats ou les méthodes résultants de mon travail.

Les éleveurs ont été des sources d'informations uniquement lorsque j'ai eu à étudier la perception par les éleveurs du changement climatique (Chapitre 1).

Les éleveurs ont été l'objet de ma recherche dans deux de mes travaux. Ils l'ont été lorsque je me suis intéressée à leur perception du changement climatique (Chapitre 1). Ils ont également été objet de ma recherche, de façon indirecte, lorsque j'ai analysé la sensibilité des exploitations face à 2003 à partir de la base de données du Contrôle Laitier. En effet, en étudiant les modifications de conduite de l'exploitation au cours de l'année 2003 et des cinq années suivantes, j'ai pris en compte de façon implicite les décisions des éleveurs face à l'aléa. De même, lorsque j'ai identifié des différences de structures et de performances sur le long terme entre les exploitations, il s'agissait de différences de décisions stratégiques entre les éleveurs.

Les éleveurs ont été des destinataires potentiels parmi d'autres (décideurs, conseillers agricoles, chercheurs) dans mon travail sur les indicateurs d'exposition (Chapitre 3 et Chapitre 4). Les éleveurs n'ont ni participé à la construction de ces indicateurs, ni été interrogés de façon formelle pour valider la pertinence et la facilité d'utilisation de ces indicateurs pour représenter les évolutions de climat et la variabilité climatique sur une zone donnée. Plusieurs éleveurs m'ont néanmoins permis de tester l'intérêt de ces indicateurs pour traiter des questions de changement et de variabilité climatiques en lien avec la gestion d'un système d'élevage. A chacun des seize éleveurs que j'ai enquêté (Chapitre 1), j'ai en effet utilisé ces indicateurs[*] à la fin de l'entretien pour présenter mes recherches sur la vulnérabilité des élevages au changement climatique. Il s'en est suivi des discussions notamment sur

[*]sur la base des indicateurs calculés pour le climat de leur zone, passé et futur, en expliquant succinctement comment ils avaient été calculées. C'est-à-dire : à partir d'un modèle de croissance de l'herbe, et en considérant que le printemps correspond à la date à laquelle il y a assez d'herbe pour mettre les animaux à pâturer –mise à l'herbe-, l'été correspond à la date à laquelle il n'y a plus assez d'herbe pour le plein pâturage –distribution de foin- et l'hiver, la date à laquelle les animaux ne pourront plus pâturer jusqu'au printemps suivant-retour à l'étable-.

la controverse de l'existence du changement climatique, des observations d'évolution du climat, et sur les adaptations possibles des élevages pour le climat futur. Cette mise à l'épreuve au regard des éleveurs atteste l'intérêt de ces indicateurs comme support de communication et de réflexion sur le changement climatique, entre éleveurs ou avec des éleveurs.

Les éleveurs ont cependant été les destinataires principaux de ma méthode de conception de systèmes adaptés au changement et à la variabilité climatiques[*]. J'ai donc mobilisé des éleveurs pour tester la faisabilité et identifier les atouts et les limites de ma méthode : elle a été mise à l'épreuve auprès de quatre groupes d'éleveurs répartis sur deux zones pédoclimatiques différentes (Montagnes et Vallées) et correspondant à deux systèmes de production (laitier et allaitant). La réalisation de ces ateliers m'a permis de recadrer la méthode en fonction des limites identifiées. Par exemple, lors des premiers ateliers, les éleveurs ne proposaient pas de modification de système lorsqu'ils découvraient le climat futur et attendaient les résultats du module d'évaluation; ils cherchaient à évaluer la robustesse du système passé (et donc de leur système). J'ai alors modifié la méthode de telle sorte que les éleveurs, successivement, découvrent le climat, proposent des adaptations, modifient le système sur le plateau de jeu et enfin évaluent le système ainsi modifié à l'aide du module d'évaluation. Cette modification dans la méthode a été permise uniquement par une modification dans l'animation de l'atelier étant donné qu'aucun support matériel du jeu n'a été modifié.

Par ailleurs, nous pensions que les ateliers de conception allaient nous permettre d'étudier la prise de décision des éleveurs. Ce travail se serait inscrit dans le courant de recherche sur la conception qui cherche à modéliser le fonctionnement des systèmes pour explorer une gamme de solutions possibles à un problème donné. Notre hypothèse était que la mise en situation de gestion des éleveurs dans un objectif de conception collective allait favoriser la verbalisation des règles de décision des éleveurs, ou, au moins, générer des données dont l'analyse permettrait de faire ressortir des processus décisionnels (à savoir les modifications de systèmes réalisées par les éleveurs en fonction du climat présenté et des ressources disponibles). Les ateliers nous ont néanmoins permis d'avoir accès à des modes de raisonnement qui ne peuvent pas être appréhendés par des enquêtes. Par exemple, nous avons identifié à partir de quelles informations les éleveurs décident de la mise à l'herbe du troupeau ou de l'utilisation d'une parcelle en fauche ou en pâture (Chapitre 5).

Plusieurs raisons expliquent pourquoi il n'a pas été possible d'étudier la prise de décision des éleveurs :

- La situation climatique présentée aux éleveurs n'était pas problématique et n'avait pas un contraste fort avec la situation actuelle. De fait, les éleveurs n'ont pas eu besoin de construire de nouveaux raisonnements et ont pu s'en tenir à leurs règles de décisions habituelles, qui reposent sur des connaissances tacites et implicites et, de fait, difficilement exprimables (Raymond, *et al.* 2010).
- Il n'existe pas de méthode et d'outil adaptés pour retracer l'ensemble des modifications réalisées sur le système au cours d'un atelier. Il pourrait s'agir d'une sauvegarde automatique à partir du module d'évaluation des caractéristiques du système conçu à chaque modification. Il pourrait également s'agir d'une prise de note ciblée sur les modifications faites sur le système : justification de la modification, heure de la modification, personne(s)

[*] On pourrait éventuellement utiliser la méthode pour former des conseillers agricoles et des étudiants agronomes ou de lycées professionnels sur la question du changement climatique.

initiant la modification… a-t-elle fait l'objet d'une discussion, d'un consensus, d'un désaccord ? Est-elle conservée par la suite ?... Cependant, je n'ai pas pu réaliser cette prise de note étant donné que j'animais les ateliers. Mon rôle était de distribuer la parole, de gérer le temps, d'initier ou de relancer les discussions pour que les éleveurs testent des options ou les évaluent, de les appuyer dans la compréhension des supports informatifs et du module d'évaluation, et de vérifier que les modifications faites sur le plateau de jeu étaient prisent en compte dans le module d'évaluation (rempli par un autre animateur).

- La complexité du système en question rend très difficile voire impossible l'identification de règles de décision à partir de l'analyse à dire d'experts des modifications effectuées en fonction d'une modification de climat. Peut-être qu'une multiplication des expériences permettrait d'avoir un grand nombre de données qui seraient analysables statistiquement.

Conclusion

1. Synthèse du travail effectué

Dans la Partie I, nous avons dressé un état des lieux de la situation des élevages herbagers face au changement et à la variabilité du climat. Notre analyse a concerné le territoire Sud-Ouest de la France. Dans le Chapitre 1, nous avons caractérisé la façon dont était perçu le changement climatique par les éleveurs (travail réalisé à partir d'enquêtes semi-directives auprès de seize éleveurs en Aveyron). Nous avons ainsi identifié qu'il existait un obstacle cognitif à l'adaptation des élevages au changement climatique. En effet, même si tous les éleveurs considèrent le climat comme une contrainte et qu'ils observent des évolutions du climat, ils sont près de la moitié à douter de l'existence du changement climatique. En outre, même lorsque l'éleveur ne doute pas du changement climatique, il ne s'agit pas d'une préoccupation pour lui. Dans le Chapitre 2, nous avons montré que le sous-chargement associé à une sécurisation des ressources fourragères par l'irrigation a été le moyen pour les exploitations laitières de faire face à l'aléa climatique de 2003.

Dans la Partie II, nous avons développé des indicateurs d'exposition des systèmes herbagers au changement climatique (Chapitre 3) et nous les avons utilisés pour représenter les modifications de disponibilité de la ressource herbagère face au changement climatique (Chapitre 3 et Chapitre 4). Nos indicateurs d'exposition permettent de quantifier les effets du changement climatique sur des repères simples et familiers aux éleveurs. Ils correspondent à l'échelle de prise de décision de l'éleveur. Enfin, ils rendent mieux compte d'un changement de conditions climatiques que des indicateurs classiques tels que la production fourragère annuelle. Nous avons montré que même si la disponibilité annuelle de la ressource herbagère ne devrait pas évoluer d'ici 2050 (± 15ans, selon le scénario A1B, cinq sites de Midi-Pyrénées), le changement climatique pourrait impliquer des modifications de dates de début de saison fourragère, de quantités d'herbe produites à l'échelle de la saison et de différences de production entre deux saisons (printemps plus précoce et plus court, été-automne plus précoce, plus long et moins productif, hiver plus court) (Chapitre 3). Nous avons également montré que le changement climatique pourrait induire (Chapitre 4) :

- une modification des types d'année climatiques les plus fréquents (les types d'années les plus fréquents du passé deviendront les moins fréquents dans le futur),
- et une augmentation de la variabilité interannuelle de la quantité d'herbe disponible à l'échelle de la saison.

Dans la Partie III, nous avons développé une méthode de conception participative de systèmes d'élevage moins vulnérables au changement et à la variabilité du climat (Chapitre 5). Ses originalités sont :

- d'hybrider approche participative et modélisation informatique,
- et d'aborder séquentiellement trois caractéristiques du climat : sa moyenne, sa variabilité et son caractère imprévisible.

Nous avons montré que son application permet de tester si une stratégie laisse assez de flexibilité pour faire face à la variabilité climatique et à l'imprévisibilité du climat. Par la mise en forme des connaissances scientifiques sur le climat, le changement climatique et ses conséquences sur la ressource fourragère et également par la mise en situation de gestion des éleveurs, cette méthode apparaît comme un outil prometteur de communication et d'apprentissage auprès des éleveurs sur le changement climatique et sur les adaptations possibles des élevages.

2. Vers une évolution de posture de la recherche

Dans cette thèse nous avons exploré l'intérêt de coupler analyse de vulnérabilité et conception participative, dans une démarche inspirée du courant d'*adaptation science*. Les outils et méthodes développés au cours de cette thèse ont pour ambition d'être mobilisés pour accompagner l'adaptation des élevages au changement climatique dans le sens où ils peuvent faciliter les choix des décideurs et des éleveurs, et appuyer le conseiller agricole dans sa mission de stimuler voire d'accroître les capacités réflexives des éleveurs.

La situation climatique à laquelle nous devons nous préparer est inédite dans l'histoire de l'humanité. Le changement climatique appelle à réinventer les objectifs des chercheurs de telle sorte que les adaptations soient anticipées par les individus et les organisations. Il s'agit pour la communauté scientifique d'accompagner les mutations structurelles, organisationnelles et cognitives des systèmes socio-écologiques pour relever le défi du changement climatique. Un enjeu majeur pour la communauté scientifique des agro-écosystèmes réside dans l'appropriation des résultats scientifiques sur le climat et ses conséquences possibles par les parties concernées (consommateurs, citoyens, professionnels, collectivités, décideurs). La première étape consisterait en la démonstration de la réalité du changement climatique auprès des individus, notamment à l'aide d'indicateurs familiers et auxquels ils peuvent se référer à l'échelle locale. La transformation des connaissances scientifiques en actions concrètes demande au chercheur de fournir des informations pertinentes, crédibles et légitimes, et qui pourront ainsi être mobilisées par les individus, eux même moteurs des changements (Meinke, *et al.* 2006). Le cadre participatif est un moyen de générer ce type d'informations et de les fournir aux acteurs et aux décideurs. La démarche de recherche demandera alors au chercheur de s'engager dans des projets allant au-delà des limites académiques, en partenariat avec les instituts techniques, les structures de conseils, ainsi que les collectivités et groupes d'agriculteurs dans le cas du secteur agricole.

Cette transformation des objectifs des chercheurs, largement aboutie dans les recherches-actions, demande au chercheur des compétences qui vont au-delà de la problématisation d'une situation, la construction d'une expérience et l'analyse des résultats. Il s'agit d'une part de nourrir une pensée systémique, dans laquelle un problème ne peut être perçu et analysé qu'en ayant une vision globale de l'objet étudié et de son environnement, dont leurs interactions, et en tenant compte des différentes échelles de temps et d'espace dans lesquelles s'inscrivent les dynamiques d'évolution des systèmes socio-écologiques. Des compétences de médiation sont également nécessaires pour faciliter le travail en partenariat avec des acteurs de terrain, dont les valeurs, normes et objectifs peuvent être divergents et parfois contradictoires. En cela, le changement climatique appelle à une recherche ingénierique dont l'objectif est de faciliter la prise de décision et l'échange de points de vue à l'échelle collective. Il demande également au chercheur une ouverture d'esprit scientifique suffisante pour comprendre et accepter les différentes postures épistémologiques entre disciplines, chaque discipline nourrissant le débat et apportant des informations pertinentes pour la décision collective. Par ailleurs, accompagner et faciliter les adaptations demande à ce que la recherche soit située ; c'est-à-dire que les questions posées (reconfiguration de systèmes, conception de nouvelles pratiques) soient ancrées dans les contraintes et spécificités de chaque situation sur le terrain, de façon à assurer la pertinence et la crédibilité des solutions élaborées. Cela demande alors au chercheur d'avoir une capacité d'abstraction telle qu'il sera capable, à partir de résultats situés, de faire émerger des connaissances d'intérêt pour un lectorat scientifique international, c'est-à-dire des connaissances génériques. Par ailleurs, le

chercheur devra savoir construire et mener une diversité de dispositifs de recherches. Ces différents dispositifs permettront de produire des connaissances nécessaires à la prise de décision du groupe accompagné, ou alors de faciliter les échanges entre les personnes concernées. Le chercheur en sciences des agro-écosystèmes devra alors savoir mettre en place des expérimentations en laboratoire ou en réseaux d'agriculteurs et savoir mettre en place des observatoires pour suivre les évolutions soit de l'environnement (climat), soit des systèmes. Pour comprendre le système qu'il va accompagner, il devra également savoir construire des dispositifs d'observation ou de recueil de données empruntés aux sciences sociales, les mener et en analyser les données.

Enfin, accompagner l'adaptation au changement climatique nécessite une implication des chercheurs auprès des acteurs et décideurs sur le temps long : à la fois pour produire des connaissances génériques, des connaissances situées et pour instaurer et maintenir une relation de confiance entre les chercheurs et acteurs de terrain. La prise en compte des priorités, des objectifs et de l'expertise des acteurs demande à ce que la planification de la recherche soit souple et autorise les acteurs à influencer les objectifs et les méthodes des chercheurs. Cependant, ces deux aspects, flexibilité et perspectives à long terme d'un projet de recherche, sont mis à mal par le financement de la recherche sur projets, dont les dotations sont accordées pour trois années en moyenne.

Références

J'ai regroupé ici les références citées en Introduction, Discussion et Conclusion. Le lecteur peut se rapporter à la page 52 pour les références du Chapitre 1; à la page 83 pour le Chapitre 2 ; à la page 100 pour le Chapitre 3, à la page 122 pour le Chapitre 4 et à la page 162 pour le Chapitre 5.

Adger W.N. 2006. Vulnerability. *Global Environmental Change*, **16**(3), 268–281, doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006.

Adger W.N., Arnell N.W. and Tompkins E.L. 2005. Successful adaptation to climate change across scales. *Global Environmental Change*, **15**, 77–86, doi:10.1016/j.gloenvcha.2004.12.005.

Arbuckle J.G., Morton L.W. and Hobbs J. 2013a. Farmer beliefs and concerns about climate change and attitudes toward adaptation and mitigation: Evidence from Iowa. *Climatic Change*, **118**(3-4), 551–563, doi:10.1007/s10584-013-0700-0.

Arbuckle J.G., Prokopy L.S., Haigh T., Hobbs J., Knoot T., Knutson C., Loy A., Mase A.S., McGuire J., Morton L.W., Tyndall J. and Widhalm M. 2013b. Climate change beliefs, concerns, and attitudes toward adaptation and mitigation among farmers in the Midwestern United States. *Climatic Change*, **117**, 943–950, doi:10.1007/s10584-013-0707-6.

Barnaud C. 2013. La participation, une légitimité en question. *Natures Sciences Sociétés*, **21**(1), 24–34, doi:10.1051/nss/2013062.

Barnes A.P. and Toma L. 2011. A typology of dairy farmer perceptions towards climate change. *Climatic Change*, **112**(2), 507–522, doi:10.1007/s10584-011-0226-2.

Barreteau O., Bots P.W.G. and Daniell K.A. 2010. A Framework for Clarifying "Participation " in Participatory Research to Prevent its Rejection for the Wrong Reasons. *Ecology And Society*, **15**(2).

Belliveau S., Smit B. and Bradshaw B. 2006. Multiple exposures and dynamic vulnerability: Evidence from the grape industry in the Okanagan Valley, Canada. *Global Environmental Change*, **16**(4), 364–378, doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.03.003.

Bergez J.-E., Debaeke P., Deumier J.-M., Lacroix B., Leenhardt D., Leroy P. and Wallach D. 2001. MODERATO: an object-oriented decision tool for designing maize irrigation schedules. *Ecological Modelling*, **137**(1), 43–60, doi:10.1016/S0304-3800(00)00431-2.

Berrang-Ford L., Ford J.D. and Paterson J. 2011. Are we adapting to climate change? *Global Environmental Change*, **21**(1), 25–33, doi:10.1016/j.gloenvcha.2010.09.012.

Bindi M. and Olesen J.E. 2010. The responses of agriculture in Europe to climate change. *Regional Environmental Change*, **11**(S1), 151–158, doi:10.1007/s10113-010-0173-x.

Braconnot P., Dufresne J., Salas y Mélia D. and Terray L. 2009. *Livre blanc Escrime: Analyse et modélisation du changement climatique*. 2nd ed.

Brisson N. and Levrault F. eds. 2010a. *Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces: Livre Vert CLIMATOR*. ADEME. p. 336.

Brisson N. and Levrault F. 2010b. Synthèse du projet CLIMATOR. pp. 1–24.

Carberry P.S., Z. Hochman R.L., McCown N.P., Dalgliesh M.A., Foale P.L., Poulton J.N.G., Hargreaves, D.M.G. Hargreaves S., Cawthray, Hillcoat N. and Robertson M.J. 2002. The FARMSCAPE approach to decision support: farmers', advisers', researchers' monitoring, simulation, communication and performance evaluation. *Agricultural Systems*, **74**(1), 141–177, doi:10.1016/S0308-521X(02)00025-2.

Cordier J., Erhel A., Pindard A. and Courleux F. 2008. La gestion des risques en agriculture de la théorie à la mise en œuvre : éléments de réflexion pour l'action publique. *Notes et Etudes Economiques*, **30**, 33–71.

Costa L. and Kropp J.P. 2012. Linking components of vulnerability in theoretic frameworks and case studies. *Sustainability Science*, , doi:10.1007/s11625-012-0158-4.

Darnhofer I., Bellon S. and Dedieu B. 2008. Adaptive farming systems: a position paper. *of farming systems*, (July), 6 –10.

Dedieu B. and Ingrand S. 2010. Incertitude et adaptation : cadres théoriques et application à l'analyse de la dynamique des systèmes d'élevage. *Productions Animales*, **23**(1), 81–90.

Déqué M., Dreventon C., Braun A. and Cariolle D. 1994. The ARPEGE/IFS atmosphere model : a contribution to the French community climate modelling. *Climate Dynamics*, **10**, 249–266, doi:10.1007/BF00208992.

Dumont B., Fortun-Lamothe L., Jouven M., Thomas M. and Tichit M. 2013. Prospects from agroecology and industrial ecology for animal production in the 21st century. *Animal*, **7**(6), 1028–1043, doi:10.1017/S1751731112002418.

Durand J.-L., Lorgeou J., Picon-Cochard C. and Volaire F. 2013. Ecophysiologie de la réponse et de l'adaptation des plantes fourragères et prairiales au changement climatique. *Fourrages*, **214**, 111–118.

Duru M., Adam M., Cruz P., Martin G., Ansquer P., Ducourtieux C., Jouany C., Theau J.P. and Viegas J. 2009. Modelling above-ground herbage mass for a wide range of grassland community types. *Ecological Modelling*, **220**(2), 209–225, doi:10.1016/j.ecolmodel.2008.09.015.

Engle N.L. 2011. Adaptive capacity and its assessment. *Global Environmental Change*, , 1–10, doi:10.1016/j.gloenvcha.2011.01.019.

Felten B., Duru M., Martin G. and Sautier M. 2011. Changement climatique en Midi-Pyrénées et conséquences sur la croissance de l'herbe. , 8.

Fleming A. and Vanclay F. 2010. Farmer responses to climate change and sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, **30**(1), 11–19, doi:10.1051/agro/2009028.

Füssel H.-M. 2007. Adaptation planning for climate change: concepts, assessment approaches, and key lessons. *Sustainability Science*, **2**(2), 265–275, doi:10.1007/s11625-007-0032-y.

Gallopin G. 2006. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change*, **16**(3), 293–303, doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.02.004.

Girard N., Bellon S., Hubert B., Lardon S., Moulin C.-H. and Osty P.-L. 2001. Categorising combinations of farmers' land use practices: an approach based on examples of sheep farms in the south of France. *Agronomie*, **21**(5), 435–459, doi:10.1051/agro:2001136.

Gonzalo-Turpin H., Couix N. and Hazard L. 2008. Rethinking partnerships with the aim of producing knowledge with practical relevance: a case study in the field of ecological restoration. *Ecology and Society*, **13**(2).

Graux A.-I., Bellocchi G., Lardy R. and Soussana J.-F. 2013. Ensemble modelling of climate change risks and opportunities for managed grasslands in France. *Agricultural and Forest Meteorology*, **170**, 114–131, doi:10.1016/j.agrformet.2012.06.010.

Hannart A., Ghil M., Dufresne J.-L. and Naveau P. 2013. Disconcerting learning on climate sensitivity and the uncertain future of uncertainty. *Climatic Change*, , 585–601, doi:10.1007/s10584-013-0770-z.

Hinkel J. 2011. "Indicators of vulnerability and adaptive capacity": Towards a clarification of the science–policy interface. *Global Environmental Change*, **21**(1), 198–208, doi:10.1016/j.gloenvcha.2010.08.002.

Holling C.S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual review of ecology and systematics*, **4**, 1–23.

Holling C.S. 2001. Understanding the Complexity of Economic, Ecological, and Social Systems. *Ecosystems*, **4**(5), 390–405, doi:10.1007/s10021-001-0101-5.

Hopkins A. and Del Prado A. 2007. Implications of climate change for grassland in Europe: impacts, adaptations and mitigation options: a review. *Grass and Forage Science*, **62**(2), 118–126, doi:10.1111/j.1365-2494.2007.00575.x.

Hulme M., Dessai S., Lorenzoni I. and Nelson D.R. 2009. Unstable climates: Exploring the statistical and social constructions of "normal" climate. *Geoforum*, **40**(2), 197–206, doi:10.1016/j.geoforum.2008.09.010.

IPCC. 2013. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report - Summary for Policymakers. *In* Stocker, T., Dahe, Q. & Plattner, G.-K., *eds. Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. pp. 1–36.

IPCC-TGICA. 2007. General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 2. *In* T.R. Carter on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T.G. on D. and S.S. for I. and C.A., *ed.* p. 66.

Kates R.W., Travis W.R. and Wilbanks T.J. 2012. Transformational adaptation when incremental adaptations to climate change are insufficient. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **109**(19), 7156–7161, doi:10.1073/pnas.1115521109.

Le Gal P.-Y., Merot A., Moulin C.-H., Navarrete M. and Wery J. 2010. A modelling framework to support farmers in designing agricultural production systems. *Environmental Modelling & Software*, **25**(2), 258–268, doi:10.1016/j.envsoft.2008.12.013.

Lecomte C., Prost L., Cerf M. and Meynard J.-M. 2010. Basis for designing a tool to evaluate new cultivars. *Agronomy for Sustainable Development*, **30**(3), 667–677, doi:10.1051/agro/2009042.

Lien G. and Hardaker J.B. 2001. Whole-farm planning under uncertainty : impacts of subsidy scheme and utility function on portfolio choice in Norwegian agriculture. **28**(1), 17–36.

Linderholm H.W. 2006. Growing season changes in the last century. *Agricultural and Forest Meteorology*, **137**(1-2), 1–14, doi:10.1016/j.agrformet.2006.03.006.

Loyce C., Félix I., Bouchard C., Mischler P., Omon B., Rolland B. and Valantin-Morison M. 2008. Méthodes d'évaluation en réseau d'itinéraires techniques potentiellement innovants : nouveaux acquis opérationnels. *In* Reau, R. & Doré, T., *eds. Systèmes de culture innovants et durables*. Educagri éditions: Dijon, pp. 129–147.

Luers A.L. 2005. The surface of vulnerability: An analytical framework for examining environmental change. *Global Environmental Change*, **15**(3), 214–223, doi:10.1016/j.gloenvcha.2005.04.003.

Marshall N. a., Park S., Howden S.M., Dowd A.B. and Jakku E.S. 2013. Climate change awareness is associated with enhanced adaptive capacity. *Agricultural Systems*, **117**, 30–34, doi:10.1016/j.agsy.2013.01.003.

Martin G., Felten B. and Duru M. 2011. Forage rummy: A game to support the participatory design of adapted livestock systems. *Environmental Modelling & Software*, **26**(12), 1442–1453, doi:10.1016/j.envsoft.2011.08.013.

Martin G., Martin-Clouaire R. and Duru M. 2013. Farming system design to feed the changing world. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, **33**(1), 131–149, doi:10.1007/s13593-011-0075-4.

Martin G., Martin-Clouaire R., Rellier J.-P. and Duru M. 2010. A simulation framework for the design of grassland-based beef-cattle farms. *Environmental Modelling & Software*, **26**(4), 371–385, doi:10.1016/j.envsoft.2010.10.002.

Meinke H., Howden S.M., Struik P.C., Nelson R., Rodriguez D. and Chapman S.C. 2009. Adaptation science for agriculture and natural resource management—urgency and theoretical basis. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, **1**(1), 69–76, doi:10.1016/j.cosust.2009.07.007.

Meinke H., Nelson R., Kokic P., Stone R., Selvaraju R. and Baethgen W. 2006. Actionable climate knowledge: from analysis to synthesis. *Climate Research*, **33**, 101–110, doi:10.3354/cr033101.

Metzger M., Rounsevell M., Acostamichlik L., Leemans R. and Schroter D. 2006. The vulnerability of ecosystem services to land use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **114**(1), 69–85, doi:10.1016/j.agee.2005.11.025.

Meynard J.-M. 2008. Produire autrement : réinventer les systèmes de culture. *In* Reau, R. & Doré, T., *eds. Systèmes de culture innovants et durables*. Educagri éditions: Dijon, pp. 11–27.

Moraine M., Therond O. and Duru M. 2013. Integrated crop-livestock systems in a perspective of strong ecological modernisation of agriculture: a review to build a conceptual model that frames the design process.

Morel K. 2012. Développement, mise en œuvre et analyse des potentialités du rami fourrager : un jeu de plateau pour la conception collective de systèmes fourragers - Mémoire d'Ingénieur Agronome. p. 55.

Mosnier C. 2009. *Adaptation des élevages de bovins allaitants aux aléas de prix et de climat : Approches par modélisation*. PhD Thesis, Ecole Doctorale ABIES, France.

Nakicenovic N., Alcamo J., Davis G., de Vries B., Fenhann J., Gaffin S., Gregory K., Grubler A., Jung T.Y., Kram T., Emilio la overe E., Michaelis L., Mori S., Morita T., Pepper W., Pitcher H., Price L., Riahi K., Roehrl A., Rogner H.H., Sankovski A., Schlesinger M., Shukla P., Smith S., Swart R., van Rooyen S., Victor N. and Dadi Z. 2000. Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. SUMMARY FOR POLICYMAKERS. p. 12.

Neef A. and Neubert D. 2010. Stakeholder participation in agricultural research projects: a conceptual framework for reflection and decision-making. *Agriculture and Human Values*, , 6–10, doi:10.1007/s10460-010-9272-z.

Nelson R., Kokic P., Crimp S., Martin P., Meinke H., Howden S.M., de Voil P. and Nidumolu U. 2010. The vulnerability of Australian rural communities to climate variability and change: Part II—Integrating impacts with adaptive capacity. *Environmental Science & Policy*, **13**(1), 18–27, doi:10.1016/j.envsci.2009.09.007.

Nozières M.O., Moulin C.-H. and Dedieu B. 2011. The herd, a source of flexibility for livestock farming systems faced with uncertainties? *Animal*, **5**(9), 1442–1457, doi:10.1017/S1751731111000486.

O'Brien K., Leichenko R., Kelkar U., Venema H., Aandahl G., Tompkins H., Javed A., Bhadwal S., Barg S., Nygaard L. and West J. 2004. Mapping vulnerability to multiple stressors: climate change and globalization in India. *Global Environmental Change*, **14**(4), 303–313, doi:10.1016/j.gloenvcha.2004.01.001.

Olesen J.E., Trnka M., Kersebaum K.C., Skjelvåg a. O., Seguin B., Peltonen-Sainio P., Rossi F., Kozyra J. and Micale F. 2011. Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy*, **34**(2), 96–112, doi:10.1016/j.eja.2010.11.003.

Oppenheimer M., O'Neill B.C. and Webster M. 2008. Negative learning. *Climatic Change*, **89**(1-2), 155–172, doi:10.1007/s10584-008-9405-1.

Pachauri R.K. and Reisinger A. 2007. *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Pachauri, R.K & Reisinger, A., *eds.* Genève, Suisse. p. 103.

Pagé C., Terray L. and Boé J. 2008. *Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle: les scénarii SCRATCH08*. Toulouse. p. 21.

Pearson L.J., Nelsonc R., Crimp S. and Langridge J. 2011. Interpretive review of conceptual frameworks and research models that inform Australia's agricultural vulnerability to climate change. *Environmental Modelling & Software*, **26**(2), 113–123, doi:10.1016/j.envsoft.2010.07.001.

Picon-Cochard C., Bloor J., Zwicke M. and Duru M. 2013. Impacts du changement climatique sur les prairies permanentes. *Fourrages*, **214**, 127–134.

Polsky C., Neff R. and Yarnal B. 2007. Building comparable global change vulnerability assessments: The vulnerability scoping diagram. *Global Environmental Change*, **17**(3-4), 472–485, doi:10.1016/j.gloenvcha.2007.01.005.

Prost L. 2008. *Modéliser en agronomie et concevoir des outils en interaction avec de futurs utilisateurs: le cas de la modélisation des interactions génotype-environnement et de l'outil DIAGVAR.*

Raymond C.M., Fazey I., Reed M.S., Stringer L.C., Robinson G.M. and Evely A.C. 2010. Integrating local and scientific knowledge for environmental management. *Journal of environmental management*, **91**(8), 1766–1777, doi:10.1016/j.jenvman.2010.03.023.

Reidsma P., Ewert F. and Oude Lansink A. 2007. Analysis of farm performance in Europe under different climatic and management conditions to improve understanding of adaptive capacity. *Climatic Change*, **84**(3-4), 403–422, doi:10.1007/s10584-007-9242-7.

Rivington M. 2010. *Climate change uncertainty evaluation, impacts modelling and resilience of farm scale dynamics in Scotland.* PhD Thesis, The University of Edinburgh, the United Kingdom.

Rivington M., Matthews K.B., Buchan K., Miller D.G., Bellocchi G. and Russell G. 2013. Climate change impacts and adaptation scope for agriculture indicated by agro-meteorological metrics. *Agricultural Systems*, **114**, 15–31, doi:10.1016/j.agsy.2012.08.003.

Ruget F, Moreau J., Cloppet E. and Souverain F. 2010. Effect of climate change on grassland production for herbivorous livestock systems in France. *In* Schnyder, H., Isselstein, J., Taube, F., Auerswald, K., Schellberg, J., Wachendorf, M., Herrmann, A., Gierus, M., Wrage, N. & Hopkins, A., *eds. Grassland in a Changing World*. Organising Committee of the 23th General Meeting of the European Grassland Federation: Kiel, Germany, pp. 75–77.

Ruget F., Moreau J., Ferrand M., Poisson S., Gate P., Lacroix B., Lorgeou J., Cloppet E. and Souverain F. 2010. Describing the possible climate changes in France and some examples of their effects on main crops used in livestock systems. *Advances in Science and Research*, **4**(2007), 99–104, doi:10.5194/asr-4-99-2010.

Sautier M., Martin-Clouaire R. and Duru M. 2013a. Use of productivity-defined indicators to assess exposure of grassland-based livestock systems to climate change and variability. *Crop and Pasture Science*, **64**, 641–651, doi:http://dx.doi.org/10.1071/CP13076.

Sautier M., Martin-Clouaire R., Faivre R. and Duru M. 2013b. Assessing climatic exposure of grassland-based livestock systems with seasonal-scale indicators. *Climatic Change*, **120**(1-2), 341–355, doi:10.1007/s10584-013-0808-2.

Sauvant D. and Martin O. 2010. Robustesse, rusticité, flexibilité, plasticité... les nouveaux critères de qualité des animaux et des systèmes d'élevage : définitions systémique et biologique des différents concepts. *Productions animales*, **23**(1), 5–10.

Schaller N. 2011. *Modélisation des décisions d'assolement des agriculteurs et de l'organisation spatiale des cultures dans les territoires de polyculture-élevage*. PhD Thesis, L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech).

Seneviratne S.I., Nicholls N., Easterling D., Goodess C.M., Kanae S., Kossin J., Luo Y., Marengo J., McInnes K., Rahimi M., Reichstein M., Sorteberg A., Vera C. and Zhang X. 2012. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. *In* Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M. & Midgley, P.M., *eds. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).* Cambridge University Press,: Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 109–230.

Smit B. and Wandel J. 2006. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change*, **16**(3), 282–292, doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.03.008.

Soussana J.-F. and Luscher A. 2007. Temperate grasslands and global atmospheric change : a review. *Grass*, **62**, 127–134.

Ten Napel J., van der Veen A. a., Oosting S.J. and Groot Koerkamp P.W.G. 2011. A conceptual approach to design livestock production systems for robustness to enhance sustainability. *Livestock Science*, **139**(1-2), 150–160, doi:10.1016/j.livsci.2011.03.007.

Turner B.L., Kasperson R.E., Matson P. a, McCarthy J.J., Corell R.W., Christensen L., Eckley N., Kasperson J.X., Luers A., Martello M.L., Polsky C., Pulsipher A. and Schiller A. 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **100**(14), 8074–8079, doi:10.1073/pnas.1231335100.

Veysset P., Bébin D. and Lherm M. 2007. Impacts de la sécheresse de 2003 sur les résultats technico-économiques en élevage bovin allaitant Charolais. *Fourrages*, **191**, 311–322.

Wheeler S., Zuo A. and Bjornlund H. 2013. Farmers' climate change beliefs and adaptation strategies for a water scarce future in Australia. *Global Environmental Change*, **23**(2), 537–547, doi:10.1016/j.gloenvcha.2012.11.008.

Willaume M., Rollin A. and Casagrande M. 2013. Farmers in southwestern France think that their arable cropping systems are already adapted to face climate change. *Regional Environmental Change*, , p.13, doi:10.1007/s10113-013-0496-5.

Annexes

Annexe 1 : Les scénarios d'émissions futures de gaz à effet de serre selon le GIEC..... 196
Annexe 2 : Courbes d'évolution du climat présentées aux éleveurs en fin d'entretien. Chapitre 1..... 199
Annexe 3 : Caractéristiques principales des éleveurs enquêtés. Chapitre 1 202
Annexe 4 : Description des caractéristiques et limites des six zones pédoclimatiques du Sud-Ouest étudiées dans le Chapitre 2..... 203
Annexe 5 : Détail de la méthode d'analyse statistique employée dans le Chapitre 2 204
Annexe 6: Identification des années exceptionnelles et caractérisation de 2003. Chapitre 2 211
Annexe 7 : Détails des ANOVAs pour identifier les caractéristiques des exploitations de chaque classe de variation de production laitière entre 2003 et 2004. 217
Annexe 8: Evolution de la structure et des pratiques des élevages laitiers au cours de la période d'étude. Chapitre 2 219
Annexe 9 : Annexe accompagnant le Chapitre 3 : "Supplementary material for online publication"..... 222
Annexe 10 : Annexe accompagnant le Chapitre 4 235
Annexe 11 : Adaptations des élevages au changement et à la variabilité climatique : illustration de la méthode de conception par trois cas d'étude. Chapitre 5 236
Annexe 12 : Synthèse des modifications stratégiques imaginées en atelier face au changement et à la variabilité climatique. Chapitre 5 253
Annexe 13 : Synthèse des modifications tactiques imaginées en atelier face au changement et à la variabilité climatique. Chapitre 5 254

Annexe 1 : Les scénarios d'émissions futures de gaz à effet de serre selon le GIEC

Notre thèse a utilisé les simulations d'évolution du climat relatives au scénario SRES-A1B du GIEC. Il est l'un des six scénarios socio-économiques d'évolution des activités humaines retenus par le GIEC en 2007 (IPCC-TGICA 2007; Nakicenovic, *et al.* 2000). Ces scénarios correspondent à des scénarios d'émissions futures de gaz à effet de serre et aident à analyser et modéliser l'évolution du climat (Figure-Annexe 1).

Les six scénarios sont:
- **SRES-B1**, la croissance économique sera très rapide, la population mondiale atteindra un maximum au milieu du siècle pour décliner ensuite mais des innovations technologique permettront d'améliorer significativement l'efficacité d'utilisation des ressources. Les émissions de CO2 seront presque stabilisées dès les années 2000, puis décroîtront à partir de 2050 (5.2 GtC/an d'émissions en 2100).
- **SRES-B2**, la croissance économique et l'évolution technologiques seront intermédiaires et la population mondiale continuera de s'accroitre continuellement mais à un rythme plus faible que dans le scénario A2. Les émissions de CO2 continueront d'augmenter jusqu'en 2100 (jusqu'à 13.8 GtC/an).
- **SRES-A2**, la croissance économique et l'évolution technologiques seront plus lentes que pour les autres scénarios, la population mondiale continuera de s'accroitre continuellement. Les émissions de CO2 continuent de croître jusqu'en 2100 pour atteindre 28.9 GtC/an.

Et trois scenarios de la famille A1 dont la caractéristique commune est de décrire monde futur dans lequel la croissance économique sera très rapide, la population mondiale atteindra un maximum au milieu du siècle pour décliner ensuite et de nouvelles technologies plus efficaces seront introduites rapidement.

- **SRES-A1F**, forte utilisation des énergies fossiles (30.3 GtC/an d'émissions en 2100).
- **SRES-A1B**, équilibre entre les sources d'énergies fossiles et non fossiles (13.1 GtC/an d'émissions en 2100).
- **SRES-A1T**, prédominance des énergies non fossiles (4.3 GtC/an d'émissions en 2100).

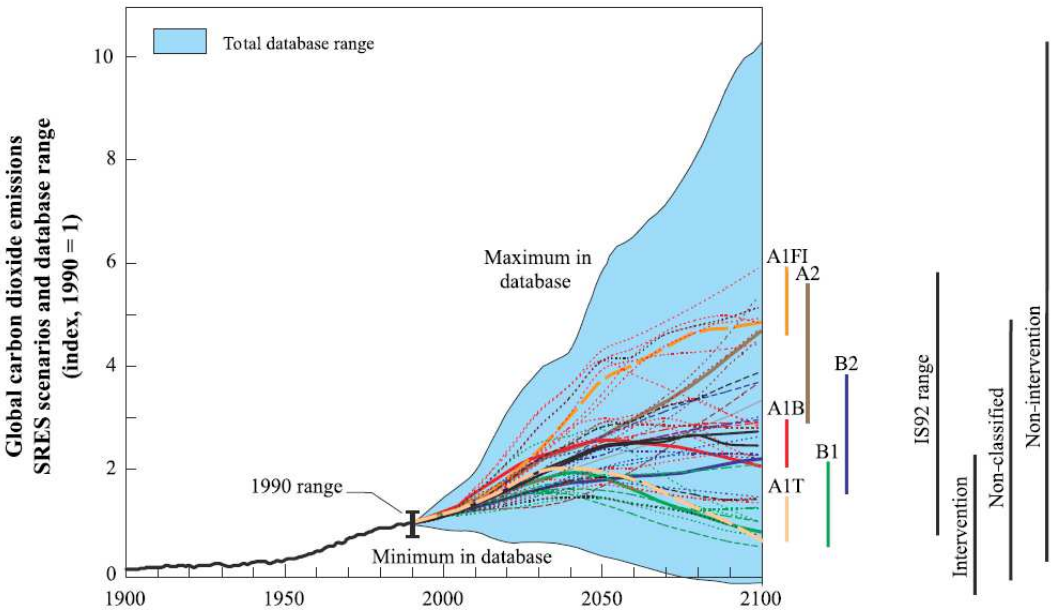


Figure-Annexe 1 : Global CO2 emissions related to energy and industry from 1900 to 1990, and for the 40 SRES scenarios from 1990 to 2100, shown as an index (1990 = 1).
The dashed time-paths depict individual SRES scenarios and the area shaded in blue the range of scenarios from the literature as documented in the SRES database. The scenarios are classified into six scenario groups drawn from the four scenario families. Six illustrative scenarios are highlighted. The colored vertical bars indicate the range of emissions in 2100. The four black bars on the right indicate the emission ranges in 2100 for the IS92 scenarios and three ranges of scenarios from the literature, documented in the SRES database. These three ranges indicate those scenarios that include some additional climate initiatives (designated as "intervention" scenarios), those that do not ("non-intervention"), and those that cannot be assigned to either category ("non- classified"). This classification is based on a subjective evaluation of the scenarios in the database and was possible only for energy and industry CO2 emissions. SAR, Second Assessment Report. D'après (Nakicenovic, *et al.* 2000)

Tableau-Annexe 1 : Projections des valeurs moyennes du réchauffement en surface et de l'élévation du niveau de la mer à la fin du XXIe siècle, à l'échelle du globe. D'après Pachauri and Reisinger (2007).

Cas	Variation de température (°C, pour 2090–2099 par rapport à 1980-1999) [a, d]		Élévation du niveau de la mer (m, pour 2090–2099 par rapport à 1980–1999)
	Valeur la plus probable	Intervalle *probable*	Intervalle fondé sur les modèles sauf évolution dynamique rapide de l'écoulement glaciaire
Concentrations constantes, niveaux 2000[b]	0,6	0,3-0,9	Non disponible
Scénario B1	1,8	1,1-2,9	0,18-0,38
Scénario A1T	2,4	1,4-3,8	0,20-0,45
Scénario B2	2,4	1,4-3,8	0,20-0,43
Scénario A1B	2,8	1,7-4,4	0,21-0,48
Scénario A2	3,4	2,0-5,4	0,23-0,51
Scénario A1FI	4,0	2,4-6,4	0,26-0,59

Notes :
a) Ces valeurs estimées sont établies à partir d'une hiérarchie de modèles comprenant un modèle climatique simple, plusieurs modèles terrestres de complexité moyenne et de nombreux modèles de la circulation générale couplés atmosphère-océan (MCGAO), compte tenu des contraintes d'observation.
b) La composition constante en 2000 est établie uniquement à partir de modèles MCGAO.
c) Ces scénarios sont les six scénarios SRES de référence. Les concentrations approximatives (en équivalent-CO_2) correspondant au forçage radiatif calculé pour les GES et les aérosols anthropiques en 2100 (voir p. 823 de la contribution du Groupe de travail I au TRE) selon les scénarios SRES illustratifs de référence B1, AIT, B2, A1B, A2 et A1FI s'établissent respectivement à 600, 700, 800, 850, 1 250 et 1 550 ppm environ.
d) La variation de température est calculée par rapport à 1980-1999. Il suffit d'ajouter 0,5 °C pour obtenir l'écart relativement à 1850-1899.

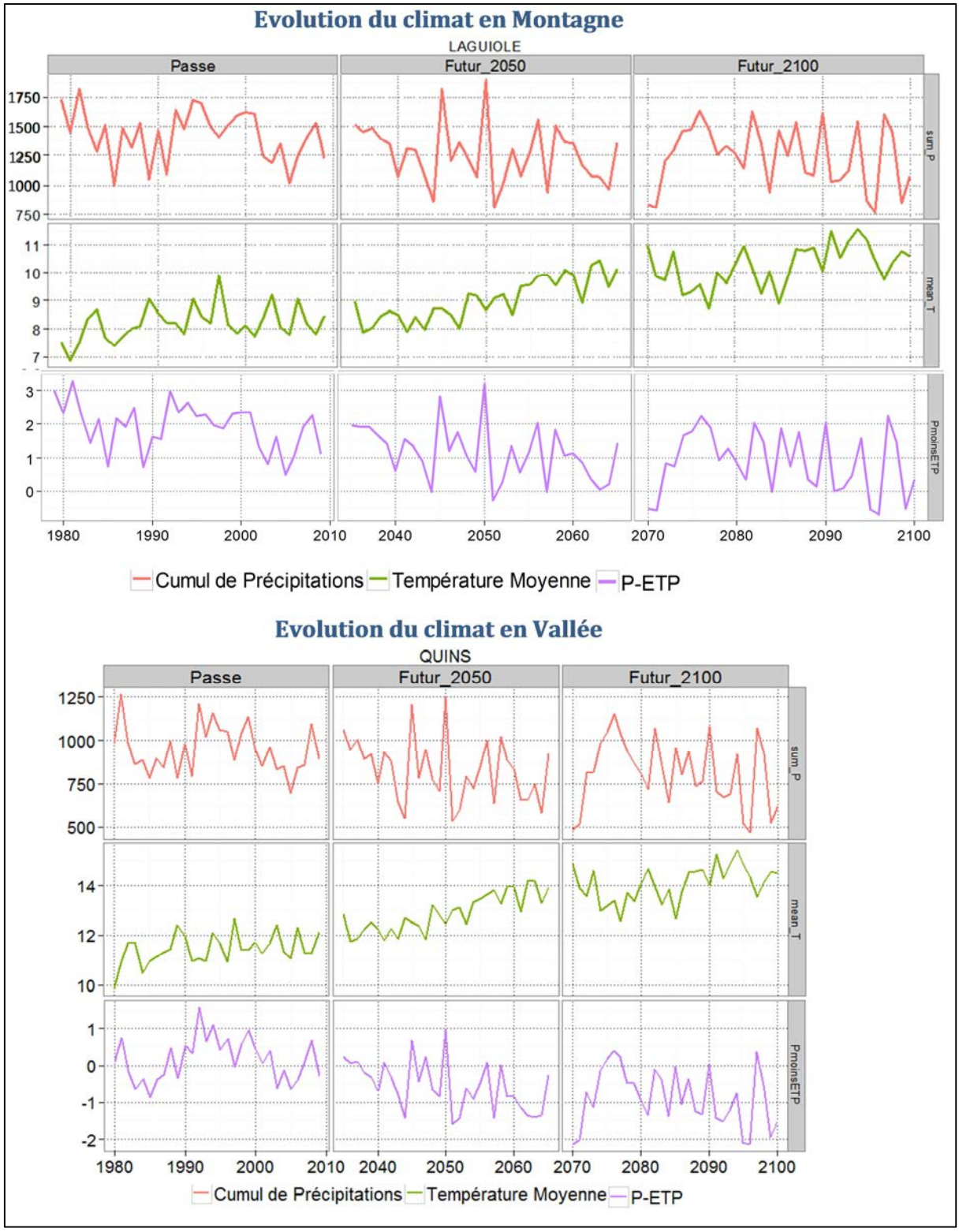
Références

IPCC-TGICA. 2007. General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 2. *In* T.R. Carter on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T.G. on D. and S.S. for I. and C.A., *ed.* 66.

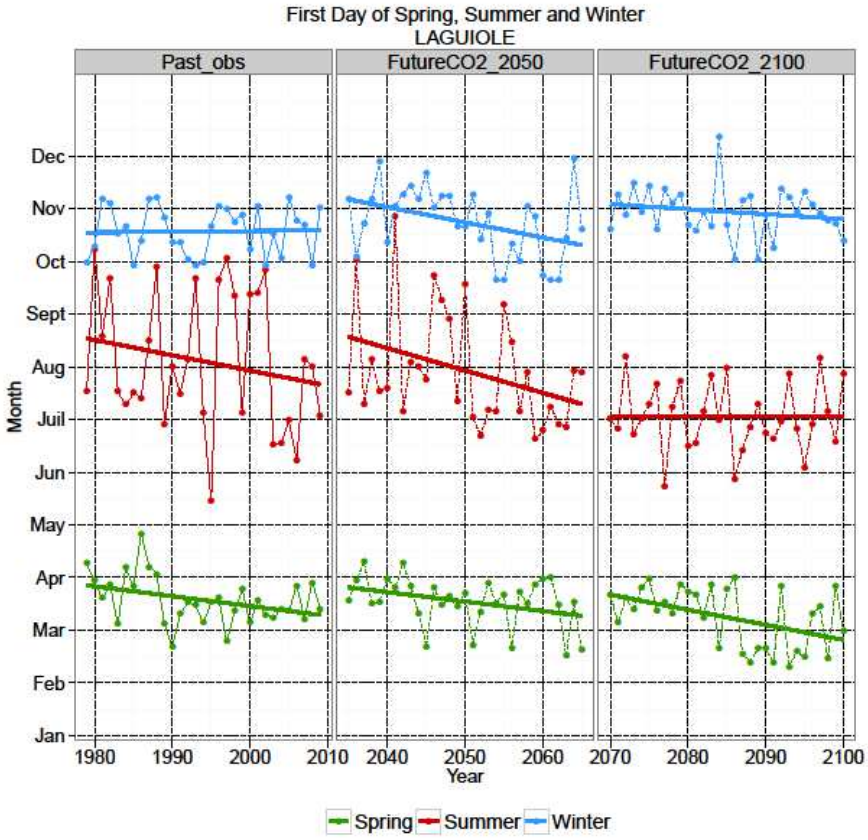
Pachauri R.K. and Reisinger A. 2007. *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Pachauri, R.K & Reisinger, A., *eds.* Genève, Suisse.

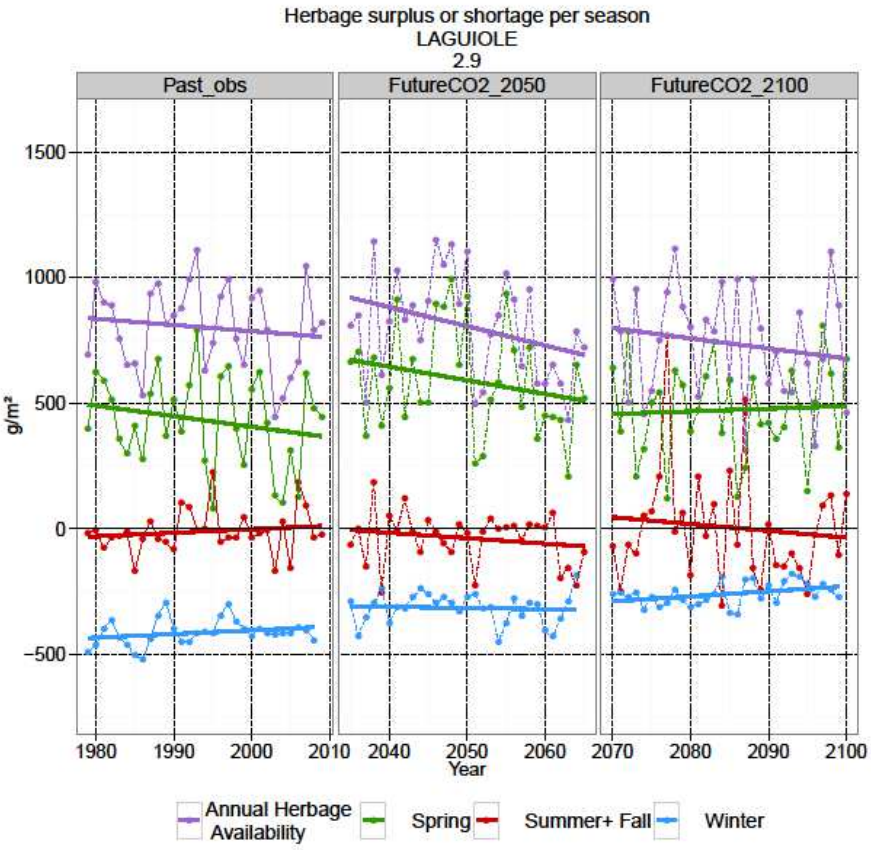
Nakicenovic N., Alcamo J., Davis G., de Vries B., Fenhann J., Gaffin S., Gregory K., Grubler A., Jung T.Y., Kram T., Emilio la overe E., Michaelis L., Mori S., Morita T., Pepper W., Pitcher H., Price L., Riahi K., Roehrl A., Rogner H.H., Sankovski A., Schlesinger M., Shukla P., Smith S., Swart R., van Rooyen S., Victor N. and Dadi Z. 2000. Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. SUMMARY FOR POLICYMAKERS.

Annexe 2 : Courbes d'évolution du climat présentées aux éleveurs en fin d'entretien. Chapitre 1

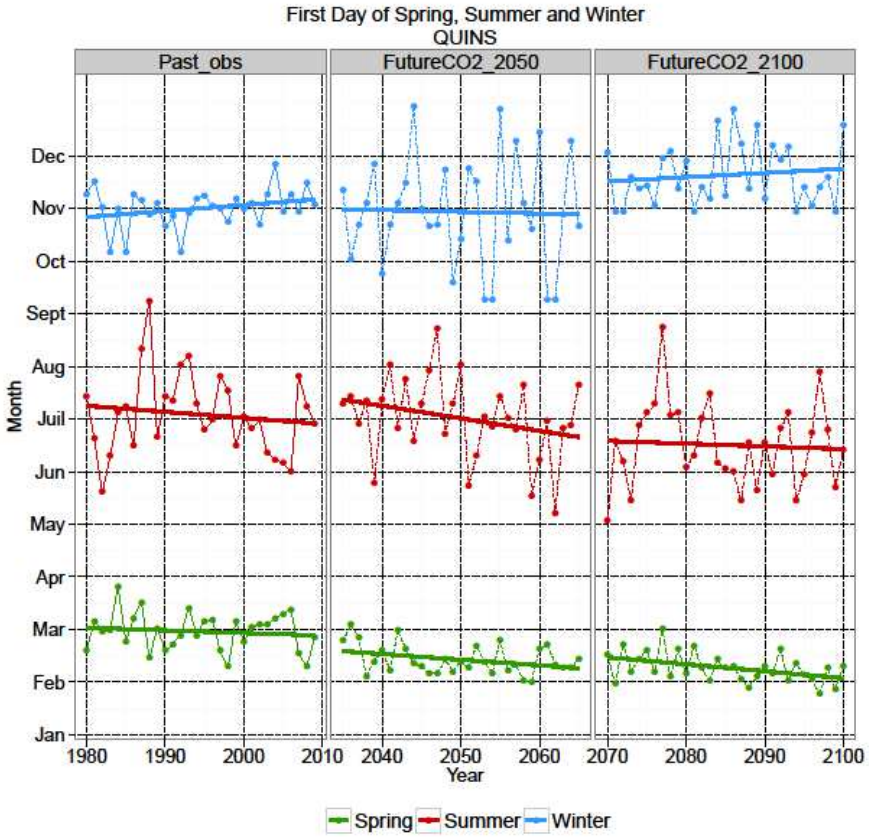


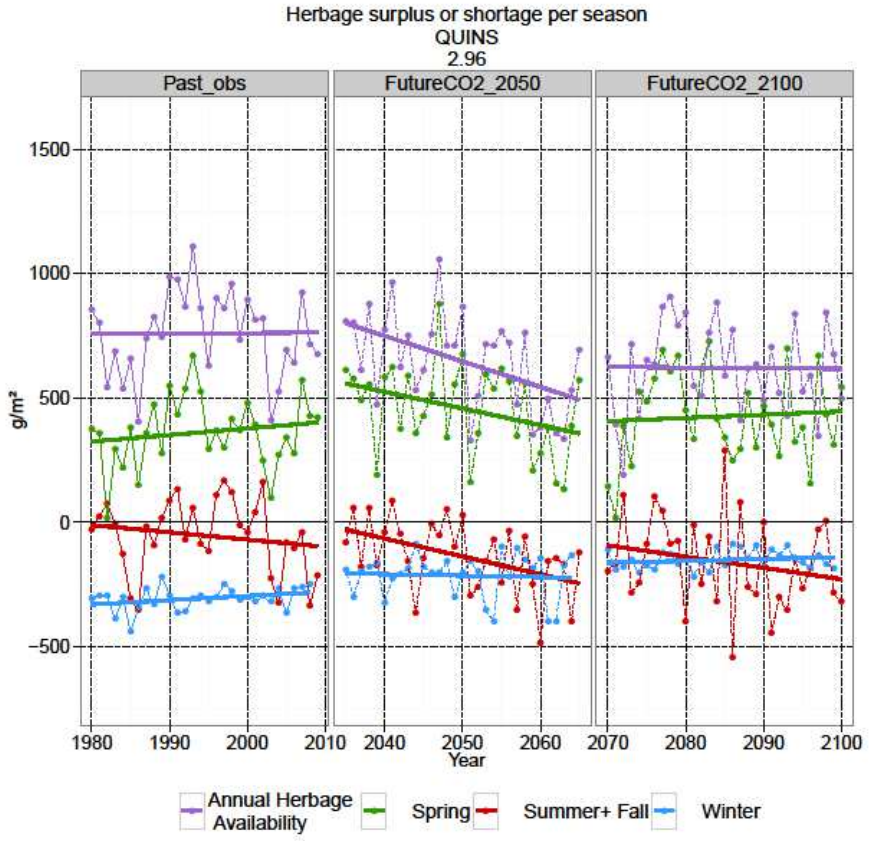
Conséquences de l'évolution du climat sur la production d'herbe, en Montagne





Conséquences de l'évolution du climat sur la production d'herbe, à Quins





Annexe 3 : Caractéristiques principales des éleveurs enquêtés. Chapitre 1

Nom	Sexe	Age	Niveau de formation	Production	Zone	Profil
EIR	H	> 50 ans	BEP	Lait	Montagne	*conscient*
UAE	H	> 50 ans	BAC +2	Lait	Montagne	*négateur*
LEU	H	[41 ; 50 ans]	BEP	Lait	Montagne	*conscient*
CNA	H	[41 ; 50 ans]	BAC+2	Lait	Montagne	*conscient*
ROB	H	[41 ; 50 ans]	BEP	Viande	Montagne	*indécis*
LEI	H	[41 ; 50 ans]	BEP	Viande	Montagne	*négateur*
FRE	H	[41 ; 50 ans]	BEP	Viande	Montagne	*conscient*
EDA	F	[31 ; 40 ans]	BAC +5 ou plus	Viande	Montagne	*conscient*
UOB	H	[41 ; 50 ans]	BAC +2	Lait	Ségala	*conscient*
TRE	H	[41 ; 50 ans]	BEP	Lait	Ségala	*conscient*
SEL	H	<30 ans	BAC +5 ou plus	Lait	Ségala	*négateur*
EBM	H	<30 ans	BAC +2	Lait	Ségala	*indécis*
DRA	F	[41 ; 50 ans]	BAC +2	Viande	Ségala	*négateur*
SEM	H	[41 ; 50 ans]	BAC	Viande	Ségala	*indécis*
LOJ	H	> 50 ans	BAC +5 ou plus	Viande	Ségala	*conscient*
REY	H	> 50 ans	BAC +2	Viande	Ségala	*conscient*

Annexe 4 : Description des caractéristiques et limites des six zones pédoclimatiques du Sud-Ouest étudiées dans le Chapitre 2

➢ Montagnes granitiques et basaltiques, Massif Central et Pyrénées

Les montagnes granitiques et shisteuses ont des sols très légers sableux issus de roches mères granitiques et shisteuses alors que les montagnes basaltiques ont des sols humifères de montagne issus de roches mères basaltiques. Située entre 800 et 1800 mètres d'altitude, la pluviométrie y est abondante surtout dans les Pyrénées de l'Ouest et sur les versants Ouest des Montagnes du Massif Central (900 à 1200 mm). Son climat estival est favorable à la pousse de l'herbe avec très peu de déficit hydrique. La pluviométrie est moins abondante dans les Pyrénées de l'Est et sur les versants Est des Montagnes du Massif Central (800 à 900mm) avec un climat estival irrégulier qui présente parfois un déficit hydrique.

➢ Ségalas et régions assimilées

Région à sols légers sableux, sablo-limoneux ou sablo-limono-argileux issus de roches mères granitiques ou shisteuses située entre 300 et 800 mètres d'altitude. La pluviométrie y est abondante (entre 800 et 1000 mm) mais pas toujours également répartie. Le climat estival est irrégulier avec un déficit hydrique estival court et variable suivant l'altitude.

➢ Causses, Sables et Argiles du Nord Aquitain

Des sols calcaires caillouteux et superficiels, des rendzines peu profondes issues de roches mères calcaires et des sols de type argilocalcaires plus profonds constituent les zones calcaires. Des sols sablo-argileux ou sablo-limoneux constituent les sables et argiles du Nord Aquitain. La région est située entre 50 et 1000 mètres d'altitude avec une pluviométrie assez forte (800 à 1000 mm) mais très mal répartie. Le déficit hydrique estival y est très marqué et aggravé par un pouvoir de rétention d'eau des sols très faible.

➢ Coteaux secs, vallées et terrasses du Sud-Ouest

Dans les coteaux secs, les sols sont lourds et argilo-calcaires alors que dans les vallées et terrasses du Sud-Ouest, on trouve des sols alluvionnaires et sols limoneux battants. Région située entre 50 et 350 mètres d'altitude où la pluviométrie est faible à moyenne (700 à 800 mm mal répartis). Le climat estival est marqué par une sécheresse importante avec un déficit hydrique systématique de fort à très fort suivant l'altitude.

➢ Piémont Pyrénéen Continental et Piémont Montagne Noire

Les sols sont essentiellement limono-argilo sableux mais aussi limono-humifères dans le Piémont Pyrénéen Continental. On trouve des alluvions, des sables et des sols limono-argileux dans le Piémont montagne noire. La région est située entre 200 et 650 mètres d'altitude et la pluviométrie y est abondante (900 à 1200 mm assez bien répartis). Le climat estival est marqué par de nombreux orages mais pas de déficit hydrique en été. La zone est froide en hiver, printemps et automne à cause de sa continentalité.

➢ Sud Aquitain

Dans les coteaux du Piémont Pyrénéen, les sols sont essentiellement limono-argileux ou sablo-limono-argileux alors que dans les Landes sableuses, le bassin de l'Adour et Pont-long, les sols sont légers, alluvionnaires, limono-sableux et limono-humifères. La région est située entre 15 et 350 mètres d'altitude et la pluviométrie est abondante (entre 900 et 1500 mm) avec des sommes de températures élevées et peu de déficit hydrique mais nécessité d'apport d'eau par irrigation pour les sols à très faible rétention.

Annexe 5 : Détail de la méthode d'analyse statistique employée dans le Chapitre 2

Les résultats d'analyse statistique ont été considérés significatifs lorsque la p-value était inférieure à 5 %. L'ensemble des tests statistiques ont été réalisés à l'aide du logiciel R (version 2.15.2).

1. *Classifications des exploitations*

Deux classifications en trois classes naturelles ont été effectuées selon l'algorithme K-means. Il s'agit de classifications sur :

- le % de chute de lactation au cours de l'année N+1 et
- la ΔPL entre l'année N et N+1.

On cherche la partition $S=\{S_1,\ldots,S_n\}$ des observations en k classes afin de minimiser la distance entre les points dans chaque classes. Plus formellement on calcule :

$$\arg\min \sum_{i=1}^{k} \sum_{xj \epsilon Si} \|xj - \mu i\|^2$$

où μ_i est la moyenne des points dans la classe S_i.

2. *Analyses de variances*

Nous avons réalisé des analyses de variance (ANOVA) pour 1- identifier des années exceptionnelles et 2-identifier les caractéristiques des exploitations selon leur classes de sensibilité et de stabilité. Le métamodèle d'ANOVA est :

$$y_i = \mu + \alpha_i + \varepsilon_i$$

y_i la variable à expliquer, μ la moyenne globale, α_i l'effet de la variable explicative et ε_i le résidu (erreur de mesure) qui, par hypothèse, suit une loi normale $N(0, \sigma_\alpha^2)$.

Le détail des variables à expliquer et des variables explicatives sur lesquelles ont porté les ANOVA est reporté dans le Tableau-Annexe 2.

Pour chaque ANOVA, l'homoscédasticité (répartition homogène des résidus) et l'indépendance par rapport aux données ajustées a été vérifiée à l'aide du graphique des résidus en fonction des valeurs ajustées. La fonction R que nous avons utilisée nous permet de déterminer s'il existe une différence significative de la variable à expliquer entre les facteurs mais également d'estimer la différence entre la valeur de chaque facteur et la valeur moyenne globale.

➢ Identification d'années exceptionnelles

Les ANOVAs ont permis d'identifier les années exceptionnelles sur les variables climatiques (T°C moyennes et P-ETP), sur les variables de performances (rendements fourragers, % de chutes de lactation, variations de PL) et de conduite (variations de stocks et autonomie).

Pour chaque variable et chaque région, *n* est une année exceptionnelle lorsque l'ensemble des valeurs prise par la variable l'année *n* est significativement différent de l'ensemble des valeurs prise par la variable sur les 22 ans.

Pour chaque variable, nous n'avons retenu que les années qui se sont révélées exceptionnelles dans au moins 3 régions sur les 6.

➢ Caractérisation des classes d'exploitation

Les ANOVAs entre classes d'exploitations selon les critères PL, %chutes et variance totale de la structure et de la conduite ont permis :

1) ● d'identifier les structures et conduites caractéristiques des exploitations des classes S-, PS et S+ :
   1. Lors de l'année N,
   2. Lors de l'année N+1,
   3. Sur l'ensemble de la période 1989-2010.

   ● d'identifier les évolutions caractéristiques de structure, conduite et performance des exploitations des classes S-, PS et S+ sur le court terme, i.e. entre N et N+1,

2) ● d'identifier les structures, conduites et performances caractéristiques des exploitations des classes PS et TS :

4. Lors de l'année N+1,
5. Sur l'ensemble de la période 1989-2010.

● d'identifier les évolutions caractéristiques de structure, conduite et performance des exploitations des classes PS et TS sur le court terme, i.e. entre N et N+1

3) ● d'identifier les évolutions caractéristiques de structure, conduite et performance de l'ensemble des exploitations sur le long terme, i.e. entre P1 (5ans avant N) et P2 (5ans après N).

Tableau-Annexe 2 : Récapitulatif des tests statistiques effectués.

Variable à expliquer	Variable explicative
Variables climatiques	
- **T** - **P-ETP**	Année
Variables de performances	
- **rendement en ensilage d'herbe, toutes coupes confondues** - **rendement en ensilage de maïs ou de sorgho grain** - **variation de production laitière entre l'année *n* et l'année *n+1***	Année
Variables de conduite	
- **variations de stocks** - **autonomie**	Année
Variables de structure	
- **SFP** - **Effectif du cheptel** - **Chargement apparent** - **Surfaces fourragères irriguées** - **Surfaces de maïs ou de sorgho grain ensilé, en culture principale ou en dérobée interne à la SFP**	*Classe de sensibilité* - S-,PS ou S+ pour le $_{N-1}^{N}\Delta PL$ - TS ou PS pour le % de chute
Variables de conduite	
- **Variation du stock fourrager** - **Stocks fourragers au 31 décembre** - **Autonomie** - **Part de maïs irriguée par rapport au maïs total,** - **Consommation de concentrés** - **Durée moyenne de tarissement**	*Classe de sensibilité* - S-, PS ou S+ pour le $_{N-1}^{N}\Delta PL$ - TS ou PS pour le % de chute
Variables de performances	*Classe de sensibilité*
- **rendement en ensilage d'herbe, toutes coupes confondues** - **rendement en ensilage de maïs ou de sorgho grain**	- S-, PS ou S+ pour le $_{N-1}^{N}\Delta PL$ - TS ou PS pour le % de chute

1. *Objectifs*

- Identifier des tendances d'évolution du climat intra régional.
- Identifier une hypothétique corrélation climatique inter-régionale : les années défavorables d'une région se retrouvent-elles dans les autres régions ?

2. *Matériels et Méthodes*

- *Données climatiques*

La base de données Optilait regroupe les informations recueillies par le contrôle laitier dans les explotiations bovines laitères du Sud-Ouest. Les exploitations sont réparties dans six régions pédoclimatique : Montagnes granitiques et basaltiques, Ségalas et régions assimilées, Causses et sables, Coteaux secs, Piémont Central Pyrénéen et Sud Aquitain. Ces six zones regroupent une grande diversité de reliefs et de climats. Le découpage a été fait à dire d'experts par l'Idele selon la profondeur des sols, l'altitude, le climat et l'orientation fourragère de chaque zone (Annexe 4). Certaines de ces zones sont dispersées spatialement en plusieurs blocs non limitrophes avec des caractéristiques similaires

Les données climatiques proviennent de stations météorologiques Météo-France; une zone étant représentée par une station météorologique (Tableau-Annexe 3). Il s'agit des températures moyennes journalières (Tmoy), du déficit climatique (P-ETP) sur la période 1989-2011. Les six stations météos sont les suivantes :

- Millau = Montagnes granitiques et basaltiques
- Villefranche de Rouergue = Ségalas et régions assimilées
- Gourdon = Causses et sables
- Albi = Coteaux secs
- Saint-Girons = Piémont Central Pyrénéen
- Pau = Sud Aquitain

Tableau-Annexe 3 : Caractéristiques des stations météo choisies pour chaque région pédoclimatique.

N°	Région Optilait	Couleur	Nom du lieu-dit	N° du poste	Type de poste (1à4)	longitude	latitude	altitude
1	Montagnes granitiques et basaltiques	Bleu	Millau	12145001	0	3°01'E	44°07'N	714 m
2	Ségalas et régions assimilées	vert	Villefranche de Rouergue	12300004	2	2°01'E	44°22'N	330m
3	Causses et sables	jaune	Gourdon	46127001	0	1°24'E	44°45'N	260 m
4	Coteaux secs	rouge	Albi	81284001	0	2°07'E	43°55'N	172 m
5	Piémont central Pyrénéen	rose fuschia	St girons	9289001	0	1°06'E	43°00'N	414 m
6	Sud Aquitain	rose pale	Pau	64549001	0	0°25'O	43°23'N	183 m

- *Identification de corrélations intra-régionales et de tendances par région*

D'une part, nous avons identifié s'il existait des corrélations entre les T°C et P-ETP de deux régions par comparaison des variabilités inter-régionales des T°C et P-ETP moyens annuels par le test de corrélation de Pearson, suivant le modèle :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(xi-\overline{x}).(yi-\overline{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(xi-\overline{x})^2}.\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(yi-\overline{y})^2}}$$ avec X (x1,…,xn) et Y (y1,….,yn) les valeurs des deux régions considérées.

D'autre part, nous avons étudié par régression linéaire s'il existait des tendances d'évolutions par région en 1989-2011 de plusieurs indicateurs climatiques.

Les variables climatiques étudiées sont :

- Températures moyennes journalières du 1er janvier au 31 décembre et du 1er mai au 31 septembre
- déficit climatique du 1er janvier au 31 décembre et du 1er mai au 31 septembre
- date à laquelle le cumul 500°C et date à laquelle le cumul de 1000°C à partir du 1er février sont atteints

Le modèle de régression est le suivant : Variable = α Année + β.

Les résultats d'analyse statistique ont été considérés significatifs lorsque la p-value était inférieure à 5 %. L'ensemble des tests statistiques ont été réalisés à l'aide du logiciel R (version 2.15.2).

3. *Résultats*

On observe graphiquement (de la Figure-Annexe 2 à la Figure-Annexe 7) que l'ensemble des variables climatiques étudiées ont une très forte variabilité interannuelle.

Les Tmoy annuelles d'une part et le déficit climatique P-ETP moyen annuel d'autre part des 6 petites régions sont significativement corrélés positivement (Tableau-Annexe 4). Aucune tendance significative des Tmoy et des dates auxquels les seuils de 500°C / 1000°C sont atteints n'a été observée sur l'ensemble des régions (Tableau-Annexe 5), non montré pour les dates auxquels sont atteints les seuils). Cependant, la représentation graphique montre une légère diminution des Tmoy entre 1989 et 1992, puis une tendance à augmenter de 1992 à 2011 (Figure-Annexe 2).

Le déficit climatique P-ETP moyen annuel a eu tendance à s'accentuer significativement au cours des 23 dernières années en région Coteaux secs (r2=0,30, p<0,05) (Tableau-Annexe 5), avec un coefficient négatif (a=-0,046). Au seuil de 10%, la même tendance a été observée en région Montagnes (r2=0,17, p<0,1) avec un coefficient négatif (a=-0,031). Aucune tendance n'a été observée dans les 4 autres régions. Si l'on considère les valeurs moyennes entre 1992 et 2011, l'accentuation du déficit climatique apparait significatif dans 5 régions sur les 6 (p<0,1) (non montré). L'analyse de mai à septembre du déficit climatique P-ETP montre également une accentuation significative en région Coteaux secs (r2=0,30) et Montagnes (r2=0,24) (Tableau-Annexe 6) sur la période 1989-2011.

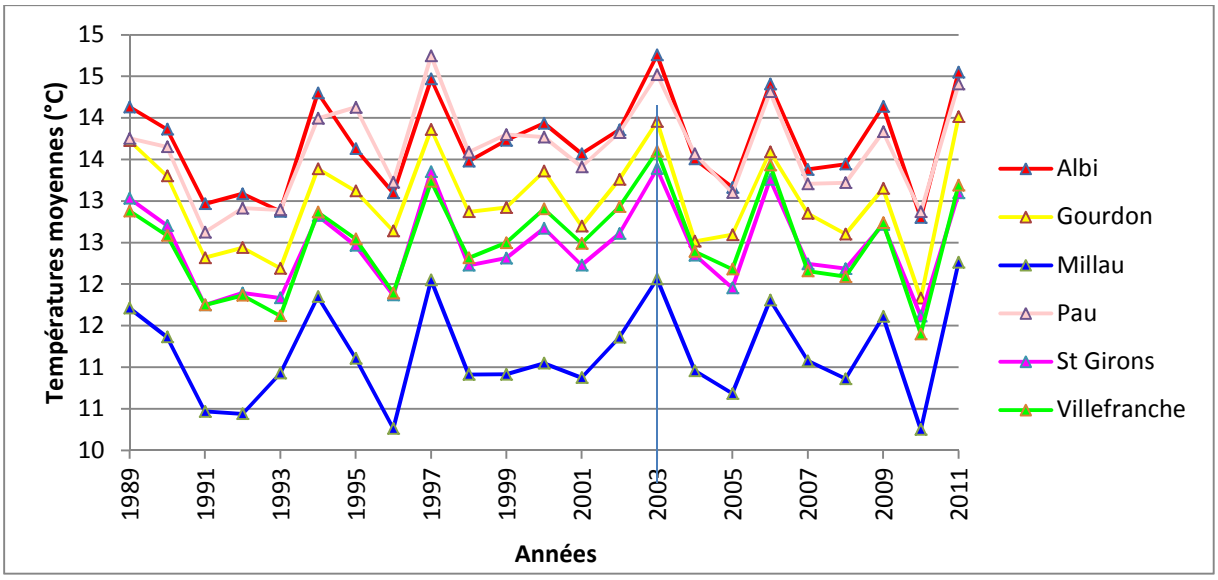


Figure-Annexe 2: Evolution des températures moyennes annuelles par région pédoclimatique de 1989 à 2011.

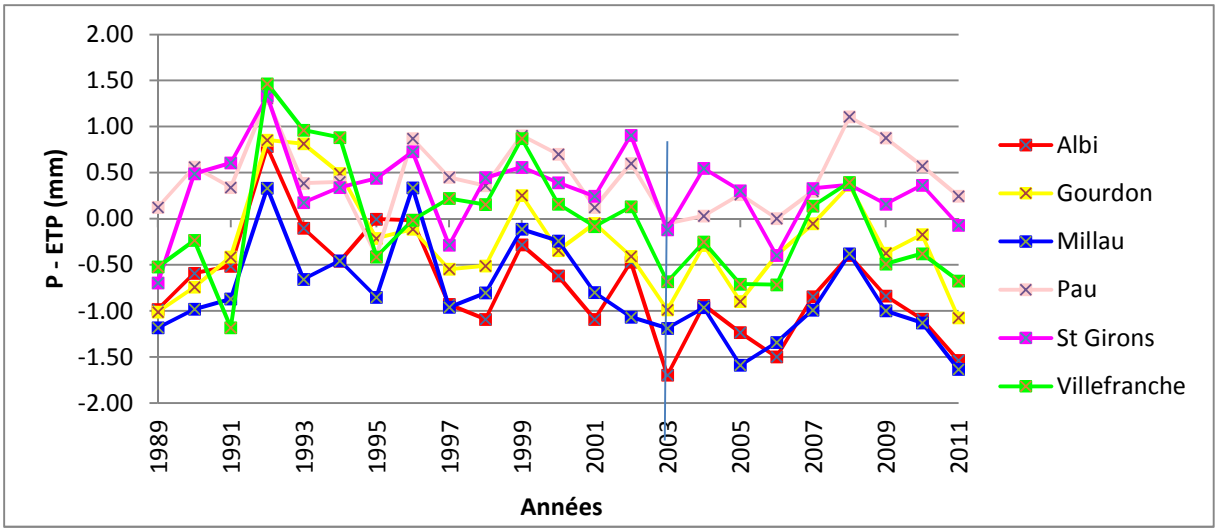


Figure-Annexe 3 : Evolution du déficit climatique (P-ETP) moyen annuel par région pédoclimatique de 1989 à 2011.

Tableau-Annexe 4: Test de corrélation de Pearson (p<0,05) entre les six régions pédoclimatiques pour les variables de Températures moyennes annuelles (T°C moyennes) et le déficit climatique (Pp-ETP) moyen annuel (source: météo France).

r		Montagnes (Millau)	Ségalas (Villefranche)	Causses (Gourdon)	Coteaux secs (Albi)	Piémont (St Girons)
P-ETP	Montagnes	-	-	-	-	-
	Ségalas	0,71	-	-	-	-
	Causses	0,71	0,81	-	-	-
	Coteaux secs	0,80	0,67	0,74	-	-
	Piémont	0,60	0,45	0,51	0,70	-
	Sud Aquitain	0,65	0,57	0,49	0,54	0,52
T°C moyennes	Montagnes	-	-	-	-	-
	Ségalas	0,89	-	-	-	-
	Causses	0,91	0,95	-	-	-
	Coteaux secs	0,94	0,98	0,95	-	-
	Piémont	0,95	0,97	0,96	0,93	-
	Sud Aquitain	0,87	0,93	0,90	0,93	0,93

Tableau-Annexe 5: Calcul du coefficient de détermination (r2) par régression linéaire (logiciel R, p<0,05* et p<0,1+) entre les valeurs moyennes annuelles de température et déficit climatique, et le temps (1989 à 2011), par région pédoclimatique.

Valeur de R^2	Montagnes (Millau)	Ségalas (Villefranche)	Causses (Gourdon)	Coteaux secs (Albi)	Piémont (St Girons)	Sud Aquitain (Pau)
T° moyenne	NS	NS	NS	NS	NS	NS
P-ETP	0,17 +	NS	NS	0,30*	NS	NS

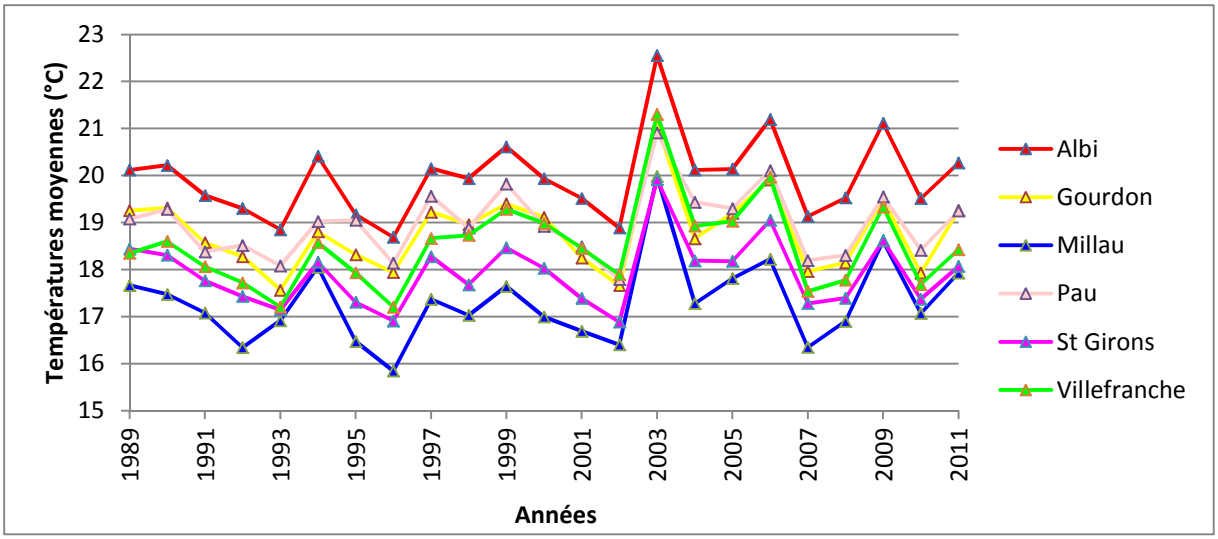


Figure-Annexe 4: Evolution des températures moyennes de mai à septembre par région pédoclimatique de 1989 à 2011.

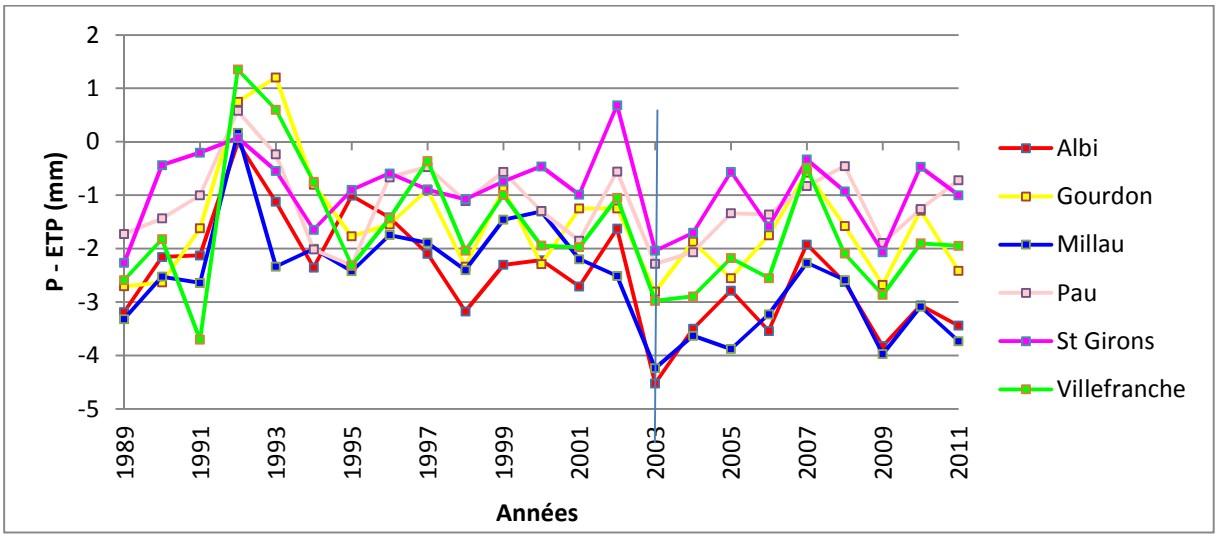


Figure-Annexe 5 : Evolution du déficit climatique (P-ETP) moyen de mai à septembre, de 1989 à 2011.

Tableau-Annexe 6 : Calcul du coefficient de détermination (r2) par régression linéaire (logiciel R, p<0,05*) entre les valeurs moyennes annuelles de température et déficit climatique de mai à septembre, et le temps (1989 à 2011), par région pédoclimatique.

Valeur de R^2 quand p<0,05	Montagnes (Millau)	Ségalas (Villefranche)	Causses (Gourdon)	Coteaux secs (Albi)	Piémont (St Girons)	Sud Aquitain (Pau)
T°C moyenne	NS	NS	NS	NS	NS	NS
P-ETP	0,24*	NS	NS	0,29	NS	NS

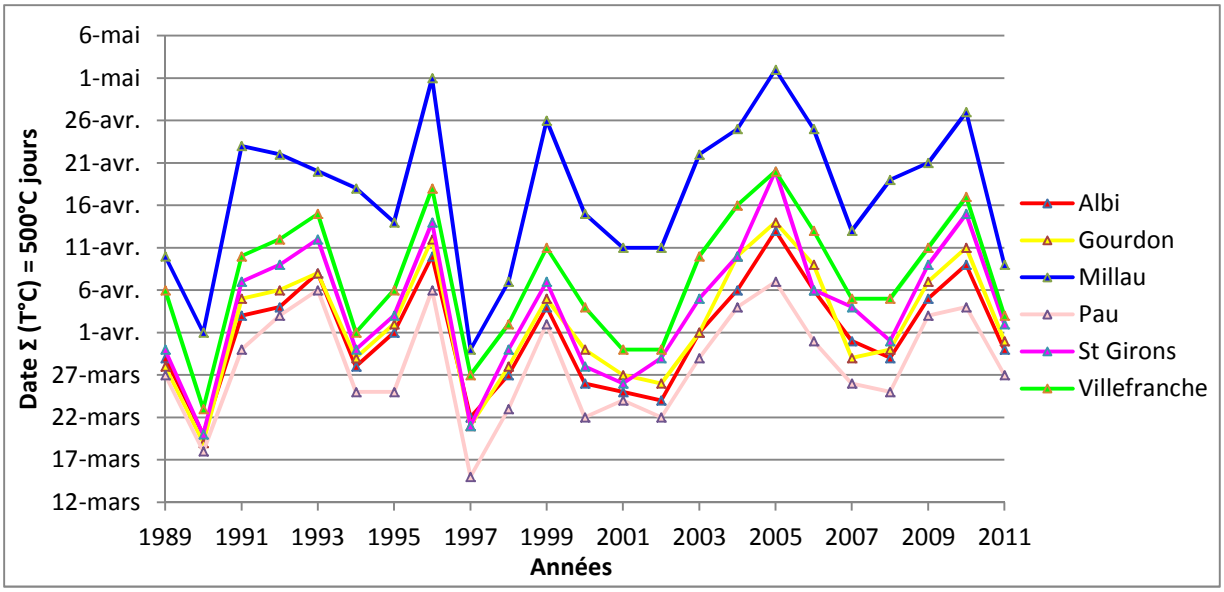


Figure-Annexe 6 : Date à laquelle Σ (T°C) = 500°C jours, de 1989 à 2011 par région pédoclimatique.

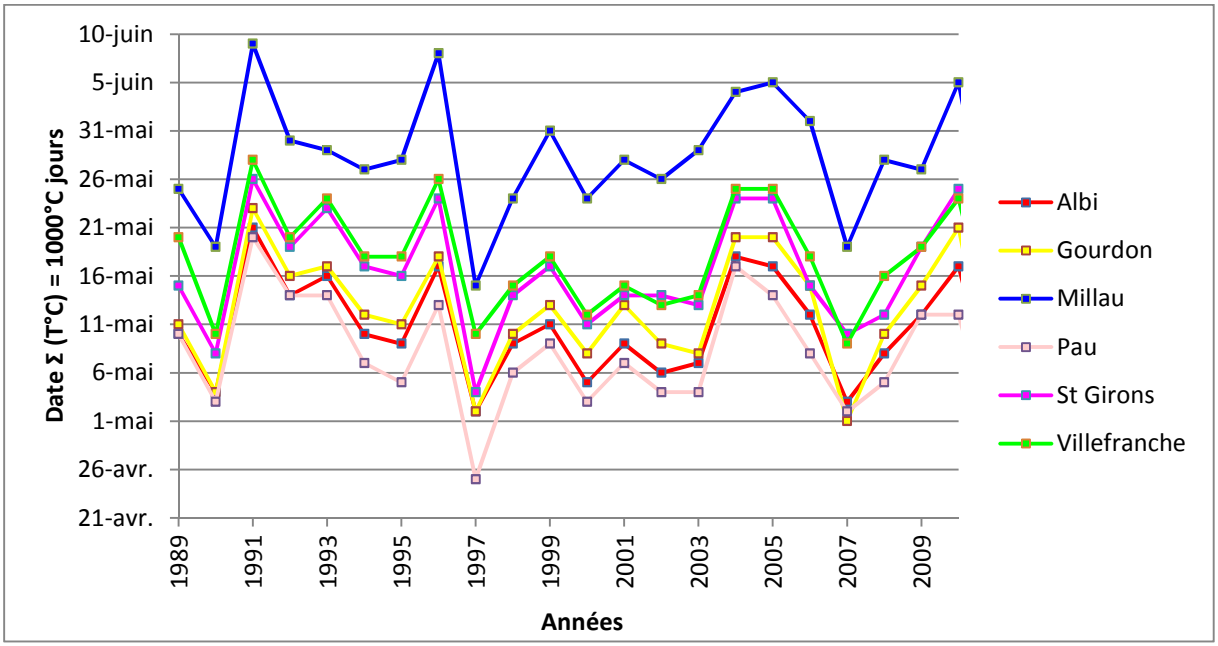


Figure-Annexe 7 : Date à laquelle Σ (T°C) = 1000°C jours, de 1989 à 2011 par région pédoclimatique.

Annexe 6: Identification des années exceptionnelles et caractérisation de 2003. Chapitre 2

1. *Méthode*

- *Identification des années exceptionnelles*

L'identification des années exceptionnelles a été réalisée sur les deux variables de performance agronomique (rendement en ensilage d'herbe et rendement en ensilage de maïs ou de sorgho grain), deux variables de performances intégrées (variation de la production laitière et pourcentage de chutes de lactations), et deux variables de conduite (variation du stock fourrager et autonomie). Chaque analyse est effectuée pour une région donnée.

Pour chaque critère de **performance agronomique** (à savoir de rendement fourrager), l'année *n* est exceptionnelle si les écarts de rendements régionaux pour l'année *n* ($\{\Delta\text{rdt}_n\}_{Région}$) sont significativement différents des écarts annuels de rendement régionaux sur les 22 ans ($\{\Delta\text{rdt}_{1989\text{à}2010}\}_{Région}$). L'écart de rendement pour l'année *n* (Δrdt_n) est la différence entre le rendement de l'année *n* de l'exploitation λ et la moyenne des rendements de l'exploitation, exprimé en % de la moyenne :

$$\Delta\text{rdt}_n = \frac{\text{Rendement année } n - \text{Rendement moyen}}{\text{Rendement moyen}} \text{ x 100, pour l'exploitation } \lambda$$

Si $\overline{\Delta\text{rdt}_{\text{n Région}}} < 0$ alors l'année *n* est défavorable, et si $\overline{\Delta\text{rdt}_{\text{n Région}}} > 0$ alors l'année *n* est favorable.

Dans notre cas, les exploitations dont les rendements n'étaient pas renseignés au moins 6 ans n'ont pas été prises en compte dans l'analyse.

Pour le critère de **variation de production de lait par vache entre deux années** $\Delta\mathbf{PL}$, l'année *n* est exceptionnelle lorsque les variations de PL entre *n-1* et *n* pour une région ($\{{}^{n}_{n-1}\Delta\text{PL}\}_{Région}$) sont significativement différentes des variations de PL d'une année à la suivante pour une région sur la période 1990 et 2010 ($\{{}_{1990\text{à}2010}\Delta\text{PL}\}_{Région}$). Pour chaque exploitation, la variation de PL entre *n-1* et *n* est exprimée en % de la moyenne de l'exploitation λ :

$${}^{n}_{n-1}\Delta\text{PL} = \frac{PL_n - PL_{n-1}}{\text{PL moyenne}} \text{ x 100, pour l'exploitation } \lambda$$

Si $\overline{{}^{n}_{n-1}\Delta\text{PL}}_{Région} < 0$ alors l'année *n* est défavorable, et si $\overline{{}^{n}_{n-1}\Delta\text{PL}}_{Région} > 0$ alors l'année *n* est favorable.

Dans la base de données, la production laitière annuelle de chaque exploitation est renseignée au minimum pour 18 années. Certaines exploitations contiennent donc des valeurs manquantes.

Pour le critère de **pourcentage de chute de lactations** (%chutes), l'année *n* est exceptionnelle lorsque les %chutes sur l'année *n* ($[\%\text{chutes}_n]_{Région}$) sont significativement différents des %chutes sur les 22ans ($[\%\text{chutes}_{1989\text{à}2010}]_{Région}$). De même pour les critères **variations du stock fourrager** et **autonomie** : l'année *n* est exceptionnelle si les valeurs prises par la variable pour l'année *n* son significativement différentes de l'ensemble des valeurs prises sur les 22 ans pour une région donnée.

2. *Résultats*

- *Années climatiques exceptionnelles*

Plusieurs années exceptionnelles ont été identifiées dans chacune des six régions, à partir des données climatiques journalières sur l'ensemble de l'année (Tableau-Annexe 7). Les années 1991 et 2010 ont été significativement plus froides que la moyenne globale sur les 23 ans, alors que 1997, 2003 et 2011 ont été significativement plus chaudes que la moyenne. Par ailleurs, dans au moins 3

régions sur les 6, le déficit climatique était plus faible que la moyenne en 1992 et 1993 alors qu'il est plus grand que la moyenne en 2003, 2005, 2006 et 2011. Avant 2003, les années étaient plutôt favorables avec des précipitations suffisantes. Après 2003, plusieurs années de sécheresse se sont produites. En sommant le nombre de fois où les années apparaissent exceptionnelles au regard de nos deux variables, deux années défavorables ressortent : 2003 et 2011 (très hautes T°C moyennes et fort déficit climatique).

En ne conservant que les données climatiques de mai à septembre, correspondant à la période de croissance du maïs, ce sont cette fois les années 1996 et 2007 qui apparaissent exceptionnelles avec des étés plus froids alors que 2003, 2006 et 2009 ont connu des étés exceptionnellement chauds, dans les 6 régions (Tableau-Annexe 8). Seule 2003 a connu des T°C exceptionnellement hautes, que ce soit sur l'ensemble de l'année ou en été. Le déficit climatique a été très faible en 1992 et 1993, avec des étés favorables tout comme l'année dans sa globalité, alors que 2003 et 2009 ont été significativement plus sèches que la moyenne.

Tableau-Annexe 7: Identification des années exceptionnelles par ANOVA avec le logiciel R (p<0,05), de 1989 à 2011, par petite région pédoclimatique, à partir des températures moyennes ((T min+ T max)/2) et du déficit climatique (P-ETP) journaliers (365 données par an).

		1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
T°C moyenne	Montagnes			-	-				-	+						+							-	+
	Ségalas			-		-				+						+			+				-	+
	Causses	+		-		-				+						+							-	+
	Coteaux secs			-		-				+						+			+				-	+
	Piémont			-		-				+						+			+				-	+
	Sud aquitain			-		-				+						+			+				-	+
	somme	1	0	6	0	5	0	0	1	6	0	0	0	0	0	6	0	0	4	0	0	0	6	6
P-ETP	Montagnes				+				+			+	+					-						-
	Ségalas			-	+	+	+					+				-		-	-					-
	Causses	-			+	+	+									-		-			+			-
	Coteaux secs				+	+		+	+							-			-					-
	Piémont	-			+														-					
	Sud aquitain				+			-																
	somme	2	0	1	6	3	2	2	2	0	0	2	1	0	0	3	0	3	3	0	1	0	0	4
TOTAL		**3**	**0**	**7**	**6**	**8**	**2**	**2**	**3**	**6**	**0**	**2**	**1**	**0**	**0**	**9**	**0**	**3**	**7**	**0**	**1**	**0**	**6**	**10**

Tableau-Annexe 8: Identification des années exceptionnelles par ANOVA avec le logiciel R (p<0,05), de 1989 à 2011, par petite région pédoclimatique, à partir des températures moyennes ((T min+ T max)/2) et du déficit climatique (P-ETP) journaliers de mai à septembre (153 données par an).

		1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
T°C moyenne	Montagnes				-		+	-	-						-	+			+	-		+		
	Ségalas				-	-			-			+				+			+	-	-	+	-	
	Causses					-			-						-	+			+	-	-	+	-	
	Coteaux secs				-	-		-	-			+			-	+			+	-		+		
	Piémont					-		-	-						-	+			+	-		+		
	Sud aquitain			-		-			-	+		+			-	+			+	-	-	+	-	
	somme	0	0	1	3	5	1	3	6	1	0	3	0	0	5	6	0	0	6	6	3	6	3	0
P-ETP	Montagnes				+								+			-		-				-		-
	Ségalas			-	+	+				+						-	-			+		-		
	Causses	-	-		+	+										-						-		
	Coteaux secs				+	+		+	+							-	-		-			-		
	Piémont	-													+	-						-		
	Sud aquitain				+			+								-								
	somme	2	1	1	5	3	0	2	1	1	0	0	1	0	1	6	2	1	1	1	0	5	0	1
TOTAL		**2**	**1**	**2**	**8**	**8**	**1**	**5**	**7**	**2**	**0**	**3**	**1**	**0**	**6**	**12**	**2**	**1**	**7**	**7**	**3**	**11**	**3**	**1**

En confrontant les résultats sur des données climatiques annuelles et les résultats sur des données climatiques entre mai et septembre, 2003 apparaît comme l'année climatique la plus exceptionnelle de la période 1989-2011 (T°C moyennes élevées et une sécheresse importante sur l'année et en été).

- *Années exceptionnelles pour les performances et la conduite de l'exploitation*

Au regard des 3 types de rendements fourragers (EH, EM irrigué et non irrigué), seule l'année 2003 est significativement défavorable, avec des rendements fourragers inférieurs aux rendements moyens sur les 22 ans (Tableau-Annexe 9). Que ce soit pour le maïs irrigué ou non irrigué, l'année 2002 a été favorable avec des rendements en EM supérieurs à la moyenne. L'année 2003, défavorable, a donc été précédée d'une année exceptionnellement favorable aux rendements en EM. Après 2003, la période 2004 à 2008 a été plutôt favorable aux rendements en EH, regroupant 3 années exceptionnellement favorables (2004, 2007 et 2008). Au contraire, la période 1989-1995 a été globalement défavorable aux rendements en EM : 1989 et 1990 ont été exceptionnellement défavorables pour les rendements en EM non irrigué et 1992 a été défavorable pour le maïs irrigué. L'année 1997, quant à elle a été défavorable aux rendements en EH mais favorable aux rendements en EM non irrigué.

Les fluctuations des % de chutes de lactation et variations de production laitière annuelle par vache ne sont pas synchronisées : aucune année exceptionnelle n'est commune aux deux variables (Tableau-Annexe 10). En 1989, 1997, 1998 et 2002, les % de chutes de lactation ont été significativement plus faibles. En 1989, la production laitière a connu peu de chutes malgré de mauvais rendements en EM non irrigué. En 1997, les bons rendements en EM non irrigué coïncident

le faible % de chutes de lactation, de la même façon qu'en 2002 où les rendements en EM irrigué et non irrigué ont été meilleurs. En 2004, le % de chutes a été plus élevé que la moyenne, année défavorable pour la production laitière mais favorable aux rendements en EH.

Tableau-Annexe 9: Identification des années exceptionnelles à partir des variations de rendements en ensilage d'herbe, de maïs irrigué et non irrigué, par région pédoclimatique (- = rendements inférieurs à la moyenne sur les 22 ans ; + = rendements supérieurs à la moyenne sur les 22 ans)

		1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Rendement EH	Montagnes		+													-			-	+	+	-	
	Ségalas			-						-						-	+			+	+		
	Causses	-						-		-						-				+	+		
	Coteaux secs							-		-							+			+	+	+	
	Piémont			+							-		-							+			
	Sud aquitain						-			-					-		+	+					+
	somme	1	1	2	0	0	1	2	0	4	1	0	1	0	1	3	3	1	1	5	4	2	1
Rendement EM non irrigué	Montagnes		-												+	-							
	Ségalas	-	-					-						+	+	-							
	Causses	-	-							+					+	-				+			
	Coteaux secs	-	-						+	+					+	-							
	Piémont	-			-		-							+		-			+				
	Sud aquitain				-		-		+	+					+	-							
	somme	4	4	0	2	0	2	1	2	3	0	0	0	2	5	6	0	0	1	1	0	0	0
Rendement EM irrigué	Ségalas	-			-					+					+	-		+					
	Causses							-							+	-		-	+				
	Coteaux secs	-	-		-					+					+	-							
	Sud aquitain				-	-			+		+	-									+		
	somme	2	1	0	3	1	0	1	1	2	2	1	0	0	3	3	0	2	1	0	1	0	0

Tableau-Annexe 10: Identification des années exceptionnelles à partir des % de chutes de lactation moyens annuels et de la variation de production laitière par vache (kg) entre l'année n et n+1, par région pédoclimatique (- = % de chutes de lactation et variations de productions laitières inférieurs à la moyenne sur les 22 ans, + = % de chutes de lactation et variation de production laitière entre l'année n et n+1 supérieurs à la moyenne sur les 22 ans)

		1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
% chute de lactation	Montagnes	-	-														+	+		+	+		
	Ségalas	-								-	-				-		+			+			
	Causses	-	+			+				-	-				-								
	Coteaux secs	-	+	+	+	+									-								
	Piémont						-										+						
	Sud aquitain		+	+						-	-	-			-								
	somme	4	4	2	1	2	1	0	0	3	3	1	0	0	4	0	3	1	0	2	1	0	0
ΔPL_{n-n+1}	Montagnes						+		-										+	-	-		+
	Ségalas		+					+	-									+		-		-	
	Causses							+	-									+	-	-			+
	Coteaux secs						+	+									-	+		-		-	
	Piémont							+	-						+			+		-		-	
	Sud aquitain				+										+		-	+		-		-	
	somme	0	1	0	1	0	2	4	4	0	0	0	0	0	2	0	2	5	2	6	1	4	2

La production laitière annuelle par vache a quant à elle été significativement plus élevée que la moyenne en 1995 puis a diminué significativement en 1996, ne correspondant à aucune variation exceptionnelle des rendements fourragers. L'année 2005 a été très favorable à la production laitière et ce n'est qu'en 2007 qu'on observe une chute significative de la production, année favorable aux rendements en EH, puis en 2009. Les années 2005 et 2009 n'ont connu aucune variation de rendements fourragers particulière.

Les variables variations de stocks et autonomie nous ont permis d'identifier les années exceptionnelles au cours desquelles les éleveurs ont modifié significativement leurs pratiques (Tableau-Annexe 11). Sur la période 1993-2003, les années ont été plutôt favorables avec des niveaux d'autonomie élevés : en 1993, 1997, 1998 et 2000, l'autonomie est significativement supérieure à la moyenne. A partir de 2003, trois années successives (2003, 2004, 2005) ont été défavorables avec des exploitations en moyenne moins autonomes. Par ailleurs, les variations de stocks ont été significativement plus faibles puis plus élevées que la moyenne en 2003 et 2004 respectivement. 1989 et 2009 ont été deux années également exceptionnelles avec de faibles variations de stocks, contrairement à 1996 et 2007 présentant de fortes variations de stocks.

Pour conclure, en sommant le nombre de fois où les années apparaissent significativement différentes de la moyenne sur les 22 ans pour les variables de productions fourragères, de performances laitières et de gestion des stocks, 2003 est l'année la plus exceptionnelle selon ces critères (Tableau-Annexe 12).

Tableau-Annexe 11: Identification des années exceptionnelles à partir des variations de stocks fourragers (t MS fin d'année – t MS début d'année /EVL) et du niveau d'autonomie des exploitations (100-%MS achats/MS totale utilisée), par région pédoclimatique (- = variations de stocks et autonomie inférieures à la moyenne sur les 22 ans ; + = variations de stocks et autonomie supérieures à la moyenne sur les 22 ans).

		1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Variations de stocks	Montagnes	-	+		+													-		+		-	
	Ségalas	-				+		-								-	+			+			
	Causses	-														-	+			+	-	-	
	Coteaux secs	-		+					+							-	+					-	
	Piémont		+						+							-	+					-	-
	Sud aquitain								+						+	-	+					-	-
	somme	4	2	1	1	1	0	1	3	0	0	0	0	0	1	5	5	1	0	3	1	5	2
Autonomie	Montagnes					+	+						+			-		-	-				
	Ségalas										+		+			-	-		-				-
	Causses					+	+		+	+						-		-					
	Coteaux secs	-								+	+					-	-	-					
	Piémont	-				+										-							
	Sud aquitain									+	+		+				-	-		-			
	somme	2	0	0	0	3	2	0	1	3	3	0	3	0	0	5	3	4	2	1	0	0	1

Tableau-Annexe 12: Récapitulatif des années exceptionnelles, dont la moyenne des variables étudiées (productions fourragères, performances laitières, gestion des stocks) est significativement différente de la moyenne sur les 22 ans (p<0 ,05), avec repérage de l'année la plus atypique sur l'ensemble de ces variables.

Variables utilisées	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Variations de stocks	-							+							-	+			+		-	
Autonomie					+				+	+		+			-	-	-					
Rendements EH									-						-	+			+	+		
Rendements EM non irrigué	-	-							+					+	-							
Rendements EM irrigué				-										+	-							
Δ PL entre N et N+1							+	-									+		+		-	
% de chutes de lactations	-	+							-	-				-		+						
somme	3	2	0	1	1	0	1	2	4	2	0	1	0	3	5	4	2	0	3	1	2	0

Annexe 7 : Détails des ANOVAs pour identifier les caractéristiques des exploitations de chaque classe de variation de production laitière entre 2003 et 2004.

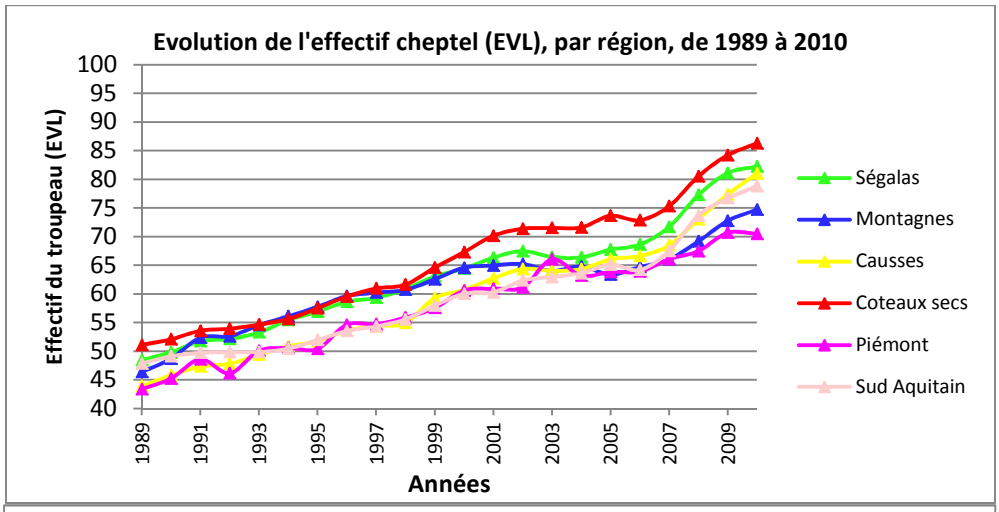
Tableau-Annexe 13 : ANOVA pour 2003, en fonction des classes de variation de production laitière entre 2003 et 2004. * : résultats significatifs

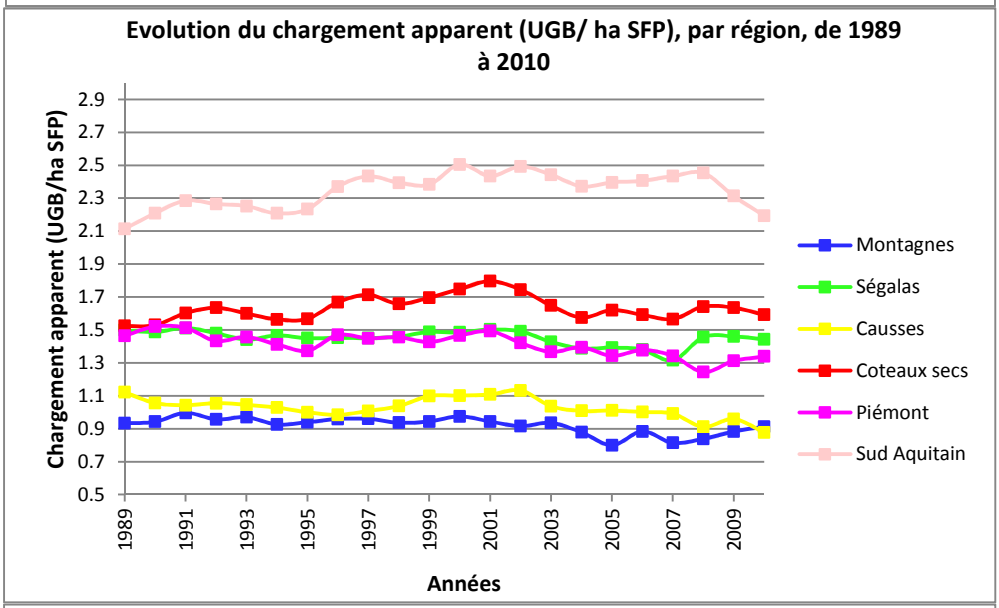
ANOVA pour 2003, en fonction des classes de variation de production laitière entre 2003 et 2004 (*résultats significatifs)		Montagnes	Ségalas	Causses	Coteaux secs	Piémont Pyrénéen	Sud Aquitain
		S-: [-1100;-2] N=70 PS:]-2;629] N=74 S+:]629;2150] N=17	S-: [-1660;-362] N=262 PS:]-362;273] N=479 S+:]273;1810] N=273	S-: [-2180;-391] N=75 PS:]-391;296] N=166 S+:]296;1640] N=80	S-: [-2500;-405] N=314 PS:]-405;261] N=473 S+:]261;1820] N=170	S-: [-1000;-339] N=12 PS:]-339;461] N=13 S+:]461;1250] N=2	S-: [-2790;-591] N=116 PS:]-591;182] N=277 S+:]182;2320] N=115
S-	Production laitière (L/VL/an)		**+354***	**+573***	**+250***		**+266***
	Rendement EH (t/ha)						
	Rendement EM (t/ha)			**-1,0***	**-0,43***		
	% SFP irriguée						**-5,5***
	%MS Achats/MS totale						
	Variations de stocks (t MS)			**-12***	**-9,4***		
	Nombre de jours d'avance au 01/01				**-9***		
PS	Production laitière (L/VL/an)	**-240***					
	Rendement EH (t/ha)			**+0,4***			
	Rendement EM (t/ha)				**-0,32***		
	% SFP irriguée						
	%MS Achats/MS totale						
	Variations de stocks (t MS)				**+6,65***		
	Nombre de jours d'avance au 01/01	**+14***					
S+	Production laitière (L/VL/an)		**-329***	**-509***	**-214***		**-285***
	Rendement EH (t/ha)						
	Rendement EM (t/ha)			**+1,19***	**+0,75***		
	% SFP irriguée						
	%MS Achats/MS totale		**-1,42***				
	Variations de stocks (t MS)			**+10***			
	Nombre de jours d'avance au 01/01				**+15***		

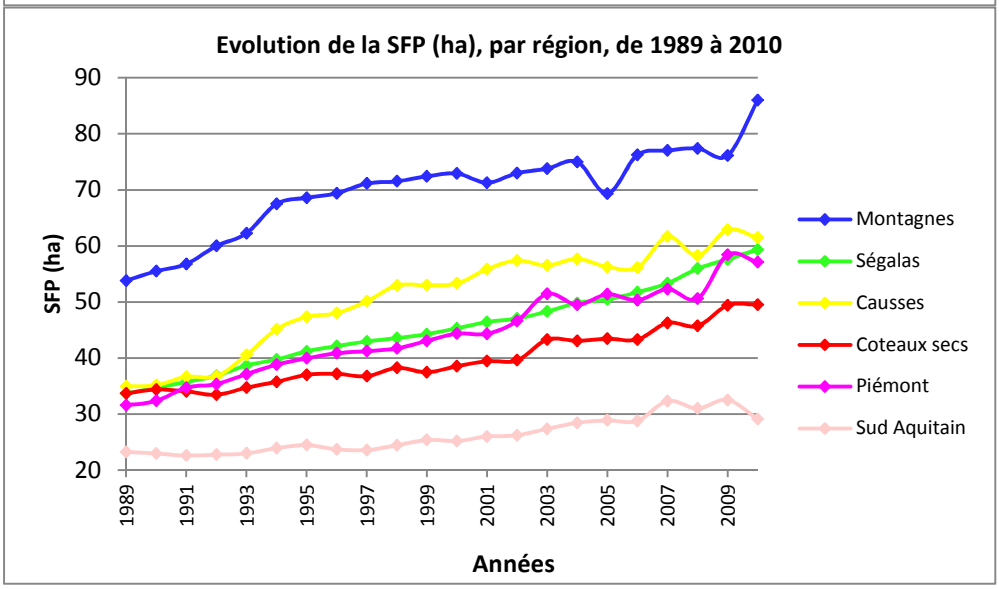
Tableau-Annexe 14: ANOVA pour 2004, en fonction des classes de variation de production laitière entre 2003 et 2004. * : résultats significatifs

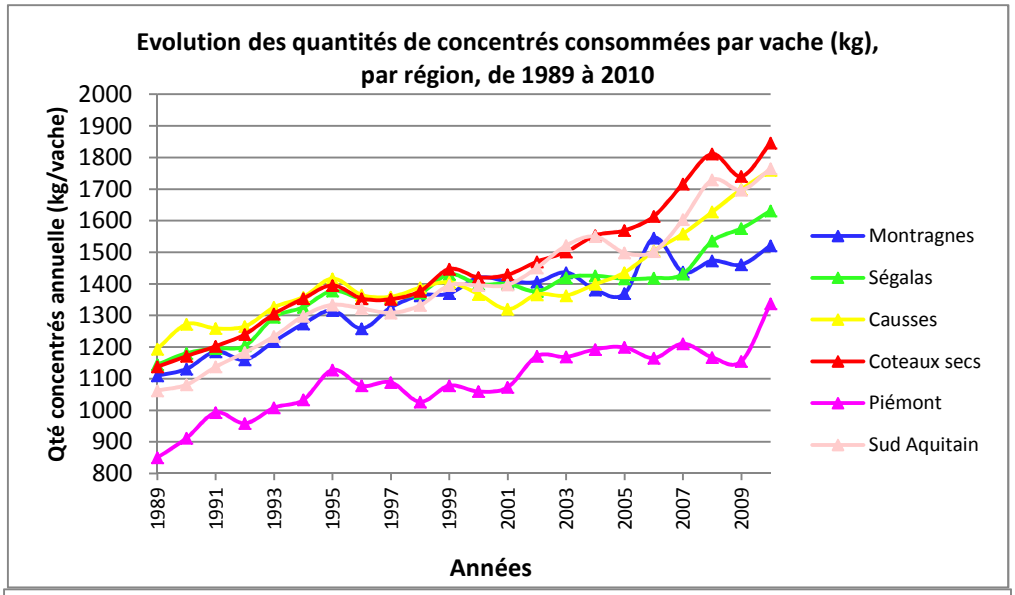
		Montagnes	Ségalas	Causses	Coteaux secs	Piémont Pyrénéen	Sud Aquitain
ANOVA pour 2004, en fonction des classes de variation de production laitière entre 2003 et 2004 (*résultats significatifs)		S-: [-1100;-2] N=70 PS:]-2;629] N=74 S+:]629;2150] N=17	S-: [-1660;-362] N=262 PS:]-362;273] N=479 S+:]273;1810] N=273	S-: [-2180;-391] N=75 PS:]-391;296] N=166 S+:]296;1640] N=80	S-: [-2500;-405] N=314 PS:]-405;261] N=473 S+:]261;1820] N=170	S-: [-1000;-339] N=12 PS:]-339;461] N=13 S+:]461;1250] N=2	S-: [-2790;-591] N=116 PS:]-591;182] N=277 S+:]182;2320] N=115
S-	Production laitière (L/VL/an)	**-470***	**-284***		**-419***		**-498***
	Rendement EH (t/ha)		**+0,21***		**+0,2***		
	Rendement EM (t/ha)			**-0,77***			
	% SFP irriguée						**-5,0***
	%MS Achats/MS totale						
	Variations de stocks (t MS)						
	Nombre de jours d'avance au 01/01						
PS	Production laitière (L/VL/an)	**-316***					
	Rendement EH (t/ha)						
	Rendement EM (t/ha)						
	% SFP irriguée						
	%MS Achats/MS totale		**+0,86***				
	Variations de stocks (t MS)						
	Nombre de jours d'avance au 01/01						
S+	Production laitière (L/VL/an)	**+786***	**+301***		**+451***		**+496***
	Rendement EH (t/ha)		**-0,19***				
	Rendement EM (t/ha)		**-0,25***	**+0,75***			
	% SFP irriguée				**+2,7***		**+4,3***
	%MS Achats/MS totale						**+2,1***
	Variations de stocks (t MS)						
	Nombre de jours d'avance au 01/01				**+12***		

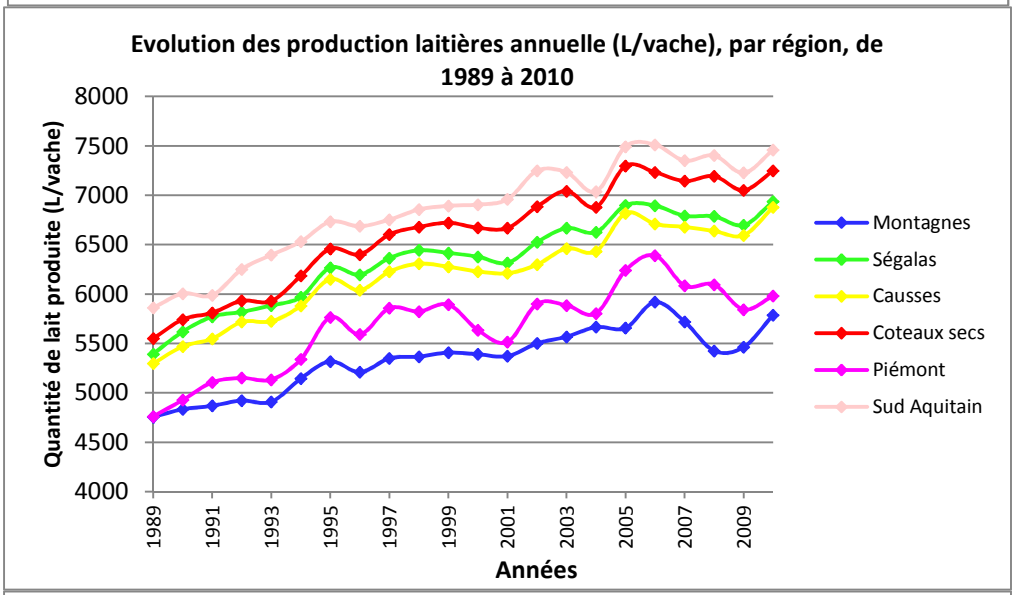
Annexe 8: Evolution de la structure et des pratiques des élevages laitiers au cours de la période d'étude. Chapitre 2

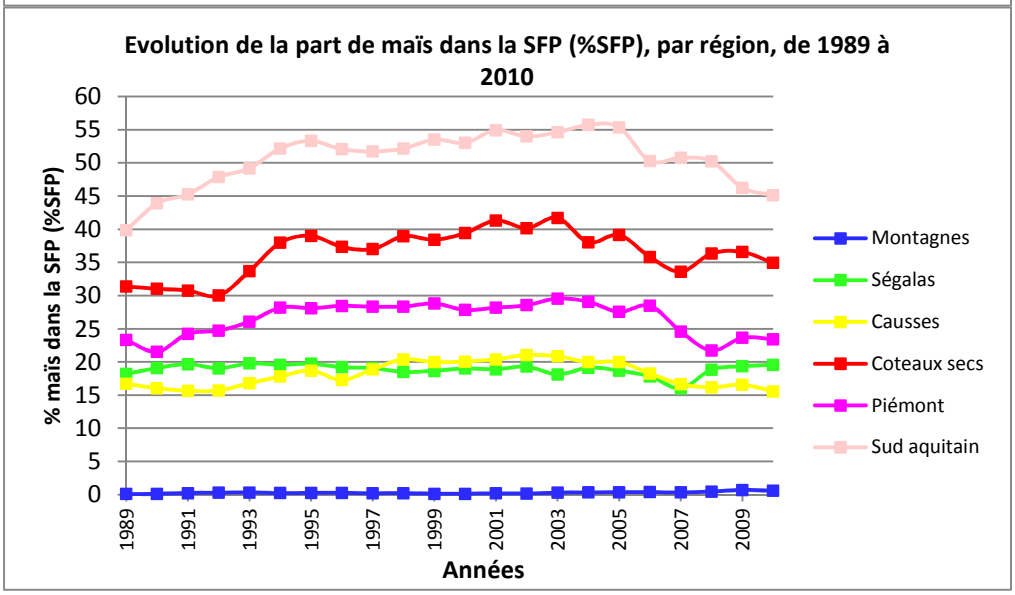


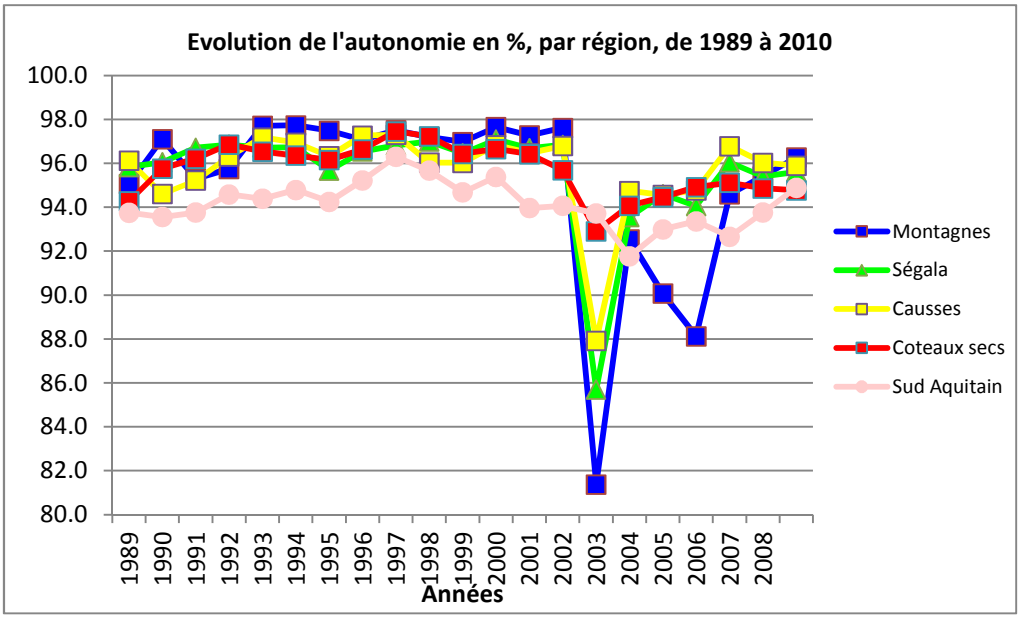





Evolution des quantités de concentrés consommées par vache (kg), par région, de 1989 à 2010
Qté concentrés annuelle (kg/vache)
2000
1900
1800
1700
1600
1500
1400
1300
1200
1100
1000
900
800
1989
1991
1993
1995
1997
1999
2001
2003
2005
2007
2009
Années
Montragnes
Ségalas
Causses
Coteaux secs
Piémont
Sud Aquitain


Evolution des production laitières annuelle (L/vache), par région, de 1989 à 2010
Quantité de lait produite (L/vache)
8000
7500
7000
6500
6000
5500
5000
4500
4000
1989
1991
1993
1995
1997
1999
2001
2003
2005
2007
2009
Années
Montagnes
Ségalas
Causses
Coteaux secs
Piémont
Sud Aquitain


Evolution de la part de maïs dans la SFP (%SFP), par région, de 1989 à 2010
% maïs dans la SFP (%SFP)
60
55
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
1989
1991
1993
1995
1997
1999
2001
2003
2005
2007
2009
Années
Montagnes
Ségalas
Causses
Coteaux secs
Piémont
Sud aquitain


Evolution de l'autonomie en %, par région, de 1989 à 2010
100.0
98.0
96.0
94.0
92.0
90.0
88.0
86.0
84.0
82.0
80.0
1989
1990
1991
1992
1993
1994
1995
1996
1997
1998
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
Années
Montagnes
Ségala
Causses
Coteaux secs
Sud Aquitain

Annexe 9 : Annexe accompagnant le Chapitre 3 : "Supplementary material for online publication".

Indicator-based characterisation of climatic exposure

Suppl. Method 1 Detailed Approach of the indicator-based characterisation of climatic exposure

1. Thresholds

The three seasons (spring, summer-fall and winter) are defined according to seasonal herbage availability and are calculated with thresholds. As described in the paper, the beginning of spring (B_{Spring}) is the theoretical turnout date, the beginning of summer-fall ($B_{Summer\text{-}fall}$) is the first day after the spring peak when full-time grazing is impossible and winter begins (B_{Winter}) when grazing stops. Theoretically, full grazing can be performed if the daily herbage growth is equal or greater than the daily need of the herd (AAH). Practically, over an acceleration phase of herbage growth (e.g. transitional phase between winter and spring), turnout for grazing can begin once the herbage accumulated form the end of the latest shortage period (e.g. winter) is sufficient. Then, turnout for grazing occurs before herbage growth equals AAH, which means that the spring threshold could be set to any value less than AAH. In the same way, over the deceleration phase of herbage growth (e.g. transitional phase between spring and summer or between fall and winter), grazing may be extended beyond the date at which daily herbage growth equals AAH in order to graze the herbage accumulated during the latest surplus period, which means that the summer-fall and the winter thresholds could be set to any value less than AAH.

2. seasonBalance

We defined Bal_{sea} (g/m²) as the sum of the difference between HG and AAH over the entire season :

$$Bal_{sea} = \sum_{d=beginning}^{end} \left(HG(d) - AAH\right) \quad (1)$$

Bal_{sea} may be converted into feeding-days according to the equation:

$$Feeding\text{-}days_{sea} = Bal_{sea} / AAH \quad (2)$$

with Bal_{sea} in g/m² and AAH in g/m²/day.
One feeding day represents the amount of herbage needed per area unit to feed the herd for one day, which equals AAH in a balanced system. The number of feeding days for a given season takes the sign of Bal_{sea}. The feeding day unit facilitates comparison of sites with unequal potential for forage production.

The sum Bal_{sea} can be either positive or negative for a specific year, which quantifies the amount of herbage either purchased or stored for later use, respectively:

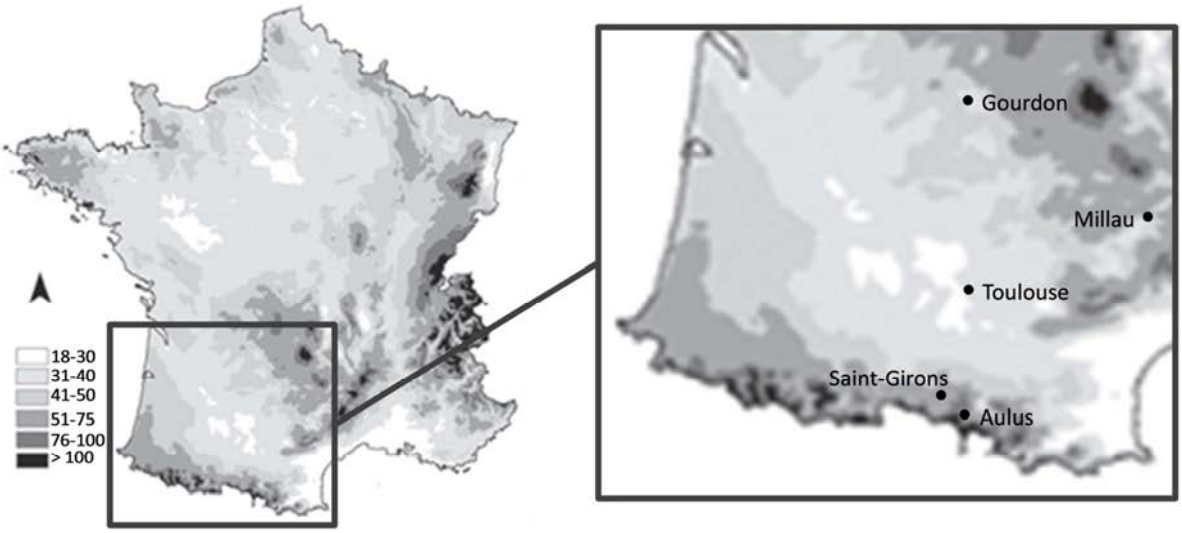
$$Bal^{year} = Bal_{sp} + Bal_{sf} + Bal_{w} \quad \int^{year} = \int_{Spring}^{year} + \int_{Summer+Fall}^{year} + \int_{Winter}^{year} \quad (3)$$

Site characteristics

We chose 5 locations in south-western France (plain, plateau and mountain) that cover a large climate gradient (Table 1), as assessed by their De Martonne Aridity Indices, defined as:

$$\text{Aridity-index} = P_y / (T_y + 10) \qquad (4)$$

where P_y is mean annual precipitation and T_y annual mean average (De Martonne 1926). The index can be calculated on other timescales, such as monthly. The lower the index, the higher the aridity. Figure 2 shows this index for France at the annual scale with a zoom on the south-western region. These 5 locations represent, within a small area, 4 of the 13 environmental zones in Europe (Metzger, *et al.* 2005) and thus have different potentials for forage production.



Suppl. Fig. 1 De Martonne Aridity index. Computed with average climatic variables at 1x1km resolution for the 1961 1990 period (AURELHY model). After Lebourgeois and Piedallu (2006).

Suppl. Table 1 Site locations and De Martonne Aridity Index. Aridity index is computed on the 1980-2011 and 2035-2065 periods. The Environmental Zones refer to the Environmental Stratification of Europe (Metzger, *et al.* 2005)

Site	altitude	latitude	longitude	Environmental Zone	Aridity index for past (mm/°C)	Aridity index for future (mm/°C)
Aulus	733m	42° 47N	1° 20E	Alpin South	82	55
Saint-Girons	414m	43° 00N	1° 06E	Mediterranean mountains	43	26
Gourdon	260m	44° 44N	1° 23E	Lusitanian	37	28
Millau	714m	44° 12N	3° 02E	Mediterranean mountains	35	30
Toulouse	150m	43° 36N	1° 26E	Mediterranean North	27	19

Indicator model and sensitivity analysis

Suppl. Table 2 Percentage of variance of exposure indicators explained by the metamodel and explained by the effect of an isolated parameter and its interactions with the other parameters (the sum can be greater than 100%)

		B_{sp}	B_{sf}	B_w	Bal_{sp}	Bal_{sf}	Bal_w	Bal^{year}
Percentage of variance explained by the metamodel		96.0	90.8	86.9	95.5	95.1	95.7	95.8
Experimenal design & environmental conditions	Site	75.3	52.6	58.2	35.5	58.3	65.9	42.5
	Year	27.6	37.9	68.5	73.0	55.8	30.4	75.2
	Period	~0	~0	1.4	1.4	0.8	1.3	~0
	Soil capacity	4.4	6.6	11.6	9.4	5.2	8.4	xx
Computational parameters	Smoothing factor	4.9	6.6	3.8	4.0	2.2	1.1	xx
	Thr_{Spring}	2.6	xx	xx	*0.5*	xx	xx	xx
	$Thr_{Summer-Fall}$	xx	0.8	xx	*0.5*	*1.5*	xx	xx
	Thr_{Winter}	xx	xx	5.9	xx	*1.5*	1.8	xx

"xx" means the parameter was not included in the multiplicative model of the analysis of variance. Values in italics correspond to sum of the effect of the two parameters.

Weather data

Suppl. Table 3 Mean, standard error, and variation of annual rainfall (sum(P)), mean annual temperature (T), evapotranspiration (PET) and and effective rainfall (PET) for past and future climates at each site. Test for examining if there was a significant trend for each period

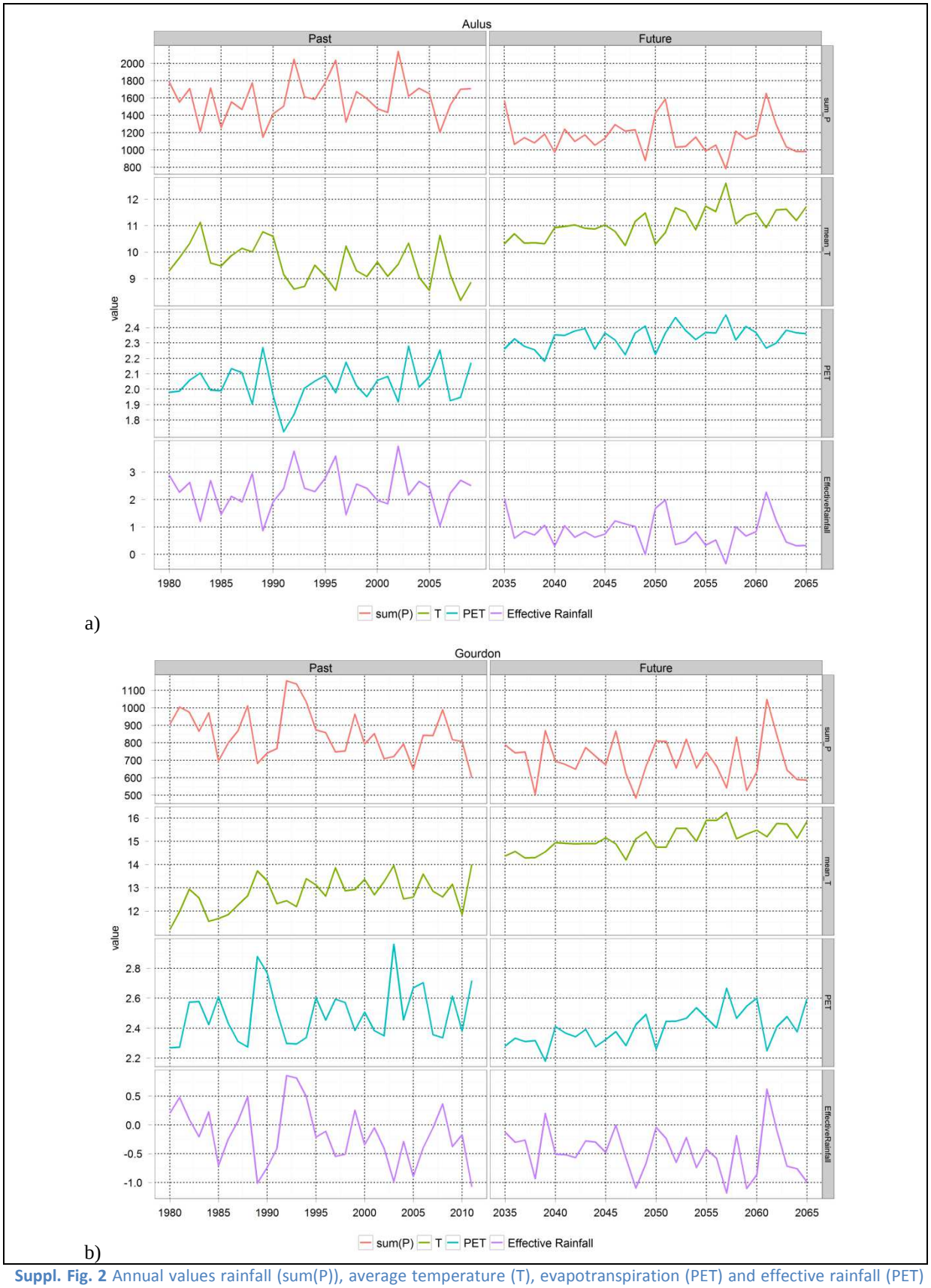
		sum(P)				T				ETP				P-ETP			
		mean	St. dev.	trend/ decade	sign.	mean	St. dev.	trend/ decade	sign.	mean	St. dev.	trend/ decade	sign.	mean	St. dev.	trend/ decade	sign.
Past	Aulus	1 597	240	33.5	ns	9.5	0.74	-0.35	*	2.035	0.124	0.023	ns	2.336	0.721	0.07	ns
	Gourdon	850	135	-49.5	.	12.7	0.72	0.37	**	2.497	0.183	0.039	ns	-0.169	0.511	-0.17	.
	Millau	722	138	-32.6	ns	10.9	0.68	0.37	**	2.738	0.225	0.097	*	-0.761	0.478	-0.186	*
	St-Girons	954	131	-37.1	ns	12.3	0.55	0.2	.	2.227	0.137	0.039	ns	0.385	0.454	-0.14	ns
	Toulouse	656	140	-55.3	ns	14.0	0.57	0.16	ns	2.573	0.200	0.154	**	-0.777	0.548	-0.308	.
Future	Aulus	1 157	197	-24.6	ns	11.1	0.55	0.4	***	2.338	0.069	0.028	*	0.831	0.578	-0.09	ns
	Gourdon	706	124	-92.9	ns	15.1	0.53	0.44	***	2.404	0.114	0.075	***	-0.470	0.405	-0.1	ns
	Millau	703	127	1	ns	13.4	0.54	0.42	***	2.513	0.101	0.066	***	-0.586	0.391	0.064	ns
	St-Girons	624	121	-15.3	ns	14.5	0.49	0.38	***	2.053	0.064	0.026	*	-0.345	0.366	-0.068	ns
	Toulouse	478	91	24.4	ns	15.9	0.49	0.4	***	2.612	0.113	0.08	***	-1.302	0.317	-0.15	*

*** significant level of 0.001 ** significant level of 0.01 * significant level of 0.05 . significant level of 0.1

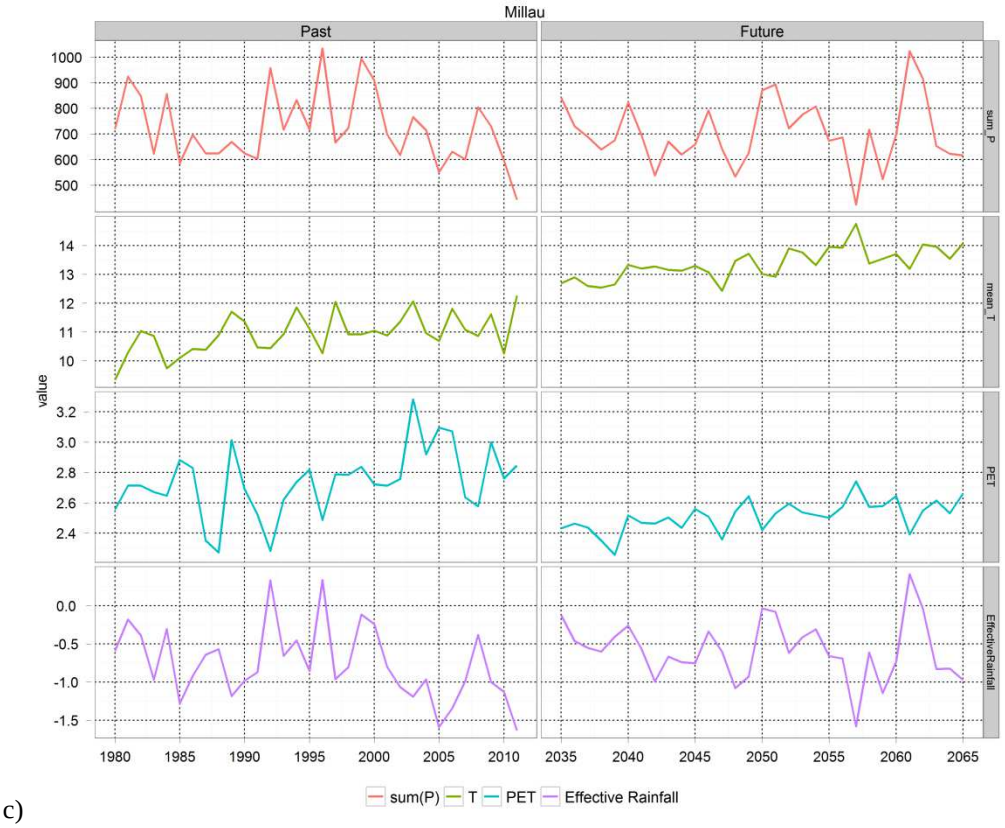
Suppl. Table 4 Difference between future and past values of annual rainfall (sum(P)), mean annual temperature (T), evapotranspiration (PET) and effective rainfall (PET). Test for examining if the difference is significant between past and future.

Past vs Future	sum(P)		T		ETP		P-ETP	
	Future-Past	sign.	Future-Past	sign.	Future-Past	sign.	Future-Past	sign.
Aulus	-440.25	***	1.54	***	0.30	***	-1.51	***
Gourdon	-144.43	***	2.37	***	-0.09	*	-0.30	*
Millau	-18.69	ns	2.44	***	-0.22	***	0.18	ns
St-Girons	-330.56	***	2.12	***	-0.17	***	-0.73	***
Toulouse	-178.08	***	1.89	***	0.04	ns	-0.53	***

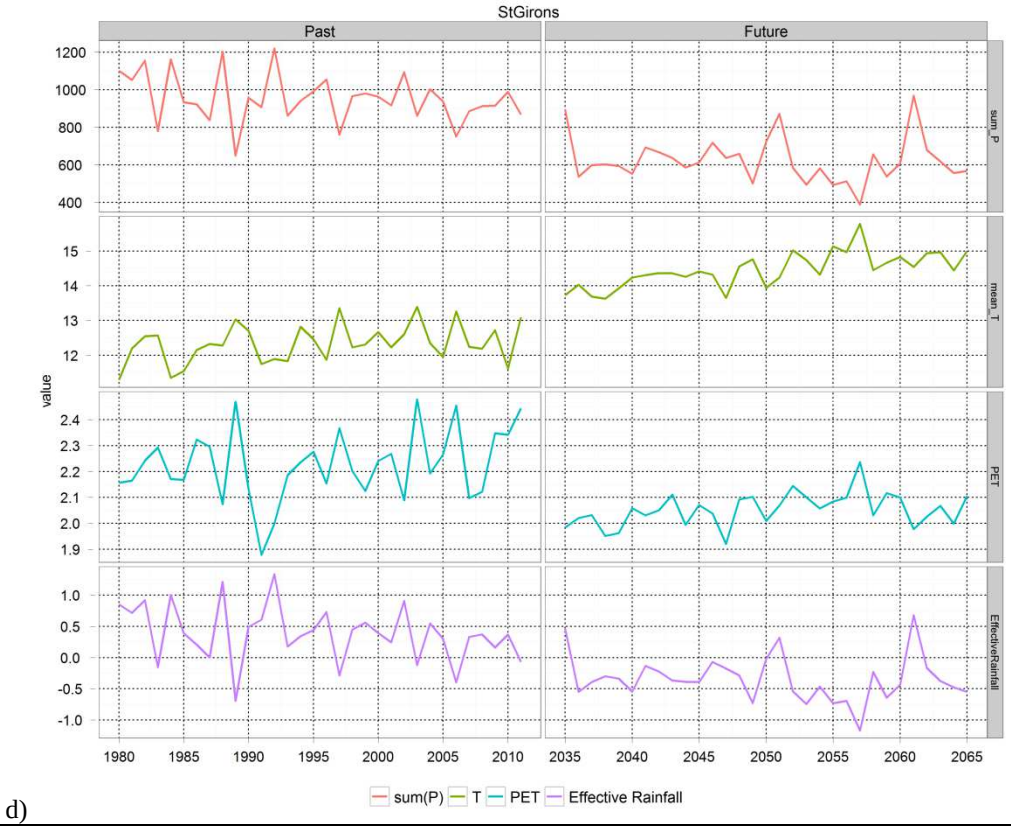
*** significant level of 0.001 * significant level of 0.05



Suppl. Fig. 2 Annual values rainfall (sum(P)), average temperature (T), evapotranspiration (PET) and effective rainfall (PET) for past and future at Aulus (a) and Gourdon (b)

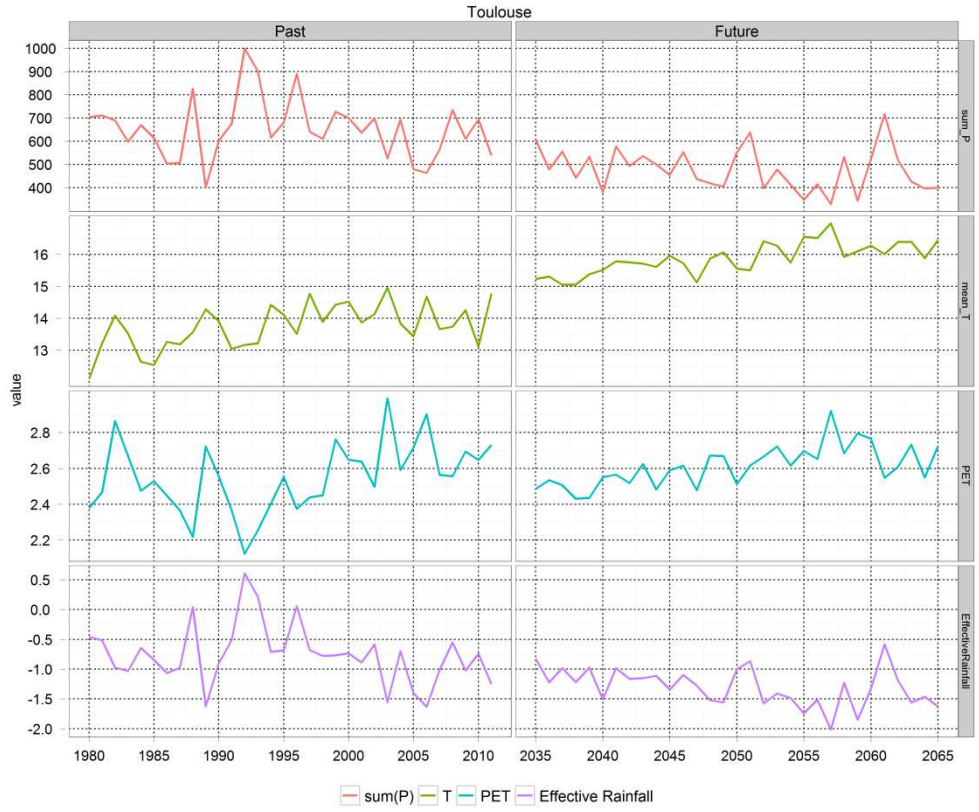


c)



d)

Suppl. Fig. 3 Annual values rainfall (sum(P)), average temperature (T), evapotranspiration (PET) and effective rainfall (PET) for past and future at Millau (c) and Saint-Girons (d)



Suppl. Fig. 4 Annual values rainfall (sum(P)), average temperature (T), evapotranspiration (PET) and effective rainfall (PET) for past and future at Toulouse

Starting dates and lengths of productivity-based seasons

Suppl. Table 5 Mean, standard error, and variation of beginning (a) and length (b) of the productivity-based seasons (spring, summer-fall, winter) for past climate at each site. Test for examining if there was a significant trend over the period

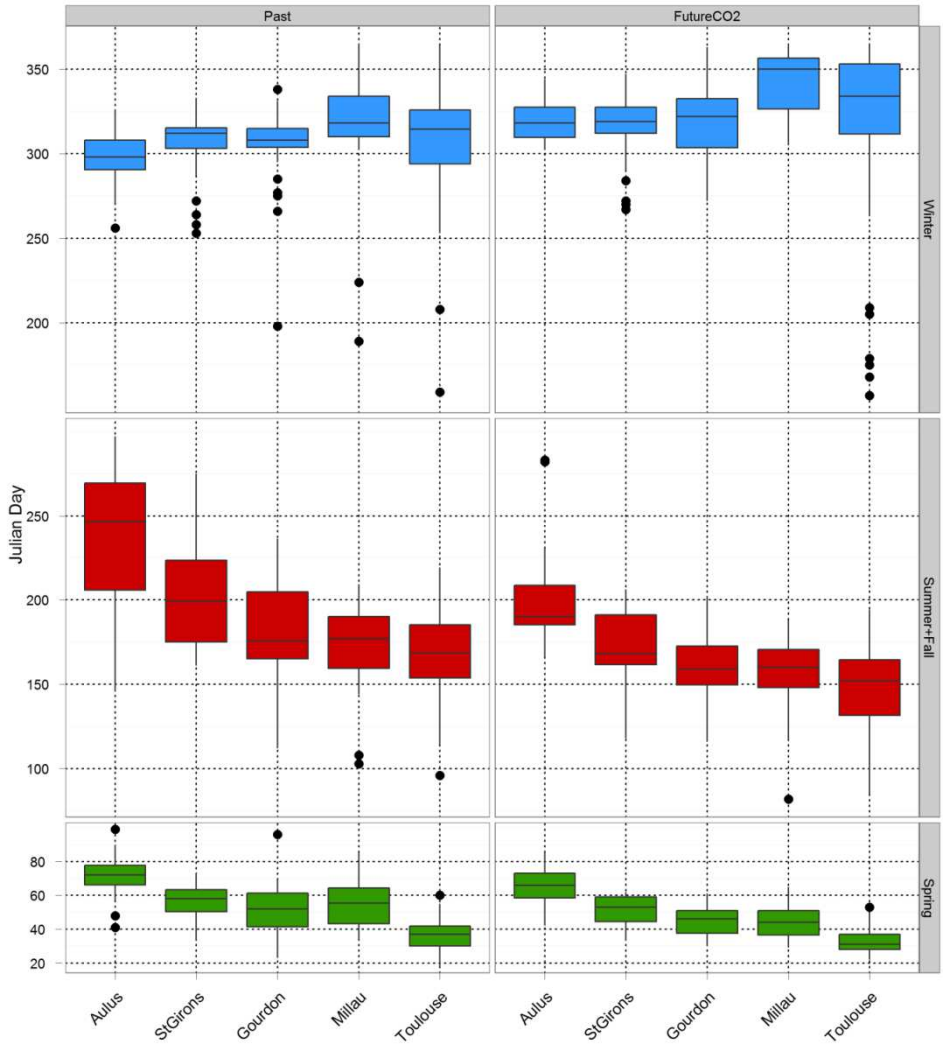
Past		Spring				Summer-fall				Winter			
		mean	St. dev.	trend/ decade	sign.	mean	St. dev.	trend/ decade	sign.	mean	St. dev.	trend/ decade	sign.
Beginning (j day)	Aulus	71	12	4.4	.	237	38	9.5	ns	298	16	0.1	ns
	Gourdon	52	14	0.1	ns	181	31	-7.7	ns	305	25	-0.6	ns
	Millau	54	14	-3.9	ns	172	25	-4.6	ns	319	35	-5.0	ns
	St-Girons	56	10	0.4	ns	203	30	-0.6	ns	305	20	-1.1	ns
	Toulouse	37	10	-1.8	ns	168	27	-7.3	ns	306	41	0.9	ns
Length (day)	Aulus	166	37	5.1	ns	61	37	-9.4	ns	139	23	3.8	ns
	Gourdon	129	33	-7.8	ns	124	43	7.1	ns	115	31	0.4	ns
	Millau	118	30	-0.7	ns	147	38	-0.3	ns	98	34	-4.8	ns
	St-Girons	147	33	-1.0	ns	102	42	-0.5	ns	117	21	3.4	ns
	Toulouse	131	29	-5.5	ns	138	46	8.2	ns	97	42	-1.8	ns

. significant level of 0.1

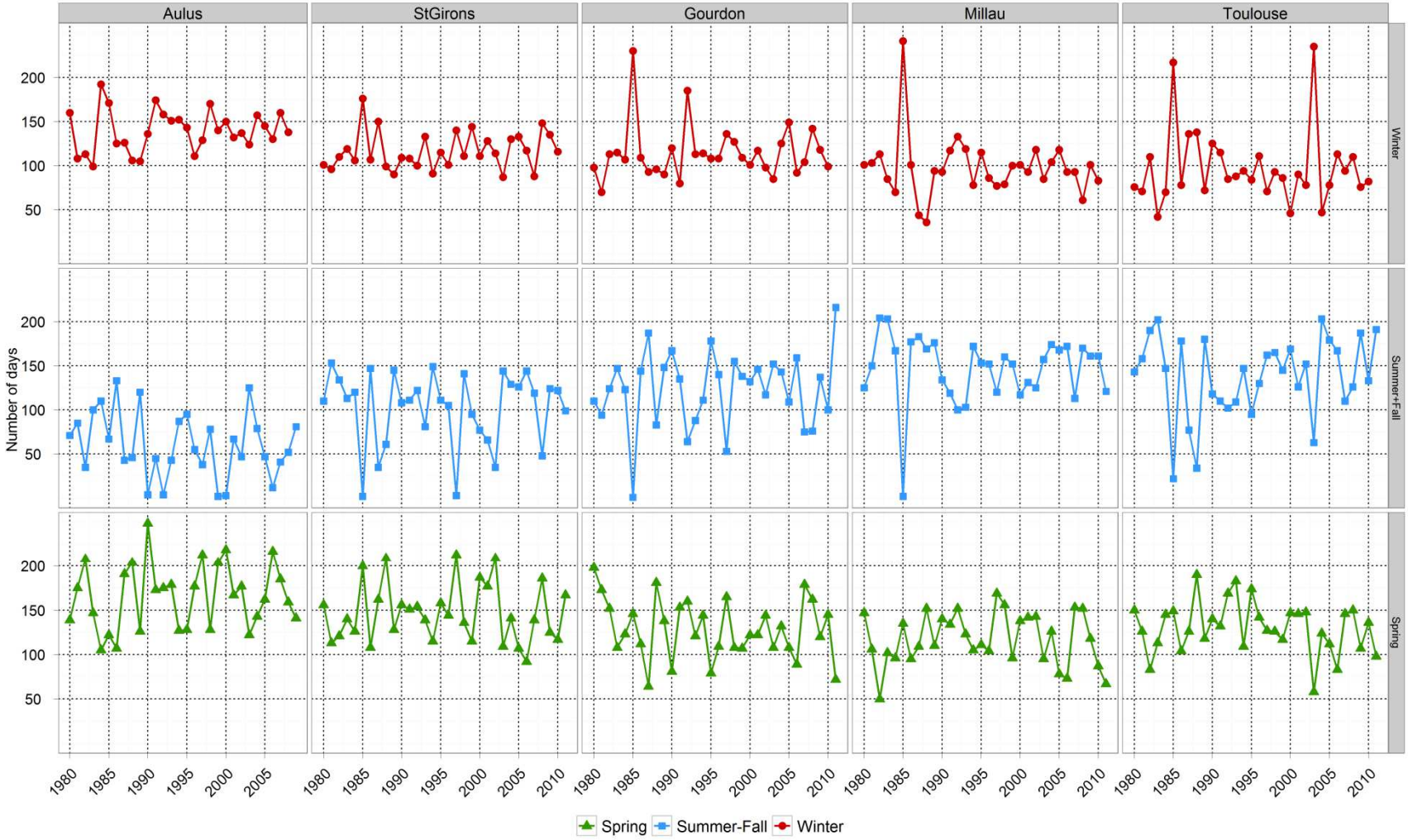
Suppl. Table 6 Mean, standard error, and variation of beginning (a) and length (b) of the productivity-based seasons (spring, summer-fall, winter) for future climate at each site. Test for examining if there was a significant trend over the period

Future		Spring				Summer-fall				Winter			
		mean	St. dev.	trend/ decade	sign.	mean	St. dev.	trend/ decade	sign.	mean	St. dev.	trend/ decade	sign.
Beginning (j day)	Aulus	66	10	-2.9	ns	199	27	0.2	ns	318	11	-1.6	ns
	Gourdon	45	9	0.8	ns	158	22	-8.4	*	320	22	0.9	ns
	Millau	44	9	1.7	ns	156	23	-8.7	*	342	19	-7.4	*
	St-Girons	51	8	0.2	ns	172	23	0.9	ns	315	20	-0.6	ns
	Toulouse	33	7	1.4	ns	148	24	-7.5	.	309	67	-16.4	ns
Length (day)	Aulus	134	30	3.0	.	119	29	-1.7	ns	113	15	0.3	ns
	Gourdon	113	26	-9.2	ns	161	34	9.4	ns	90	24	-0.8	ns
	Millau	111	23	-10.4	*	186	29	1.3	ns	67	21	7.9	.
	St-Girons	120	22	0.7	ns	143	32	-1.5	ns	100	20	-1.4	ns
	Toulouse	116	24	-8.9	*	161	63	-8.9	ns	85	64	10.3	ns

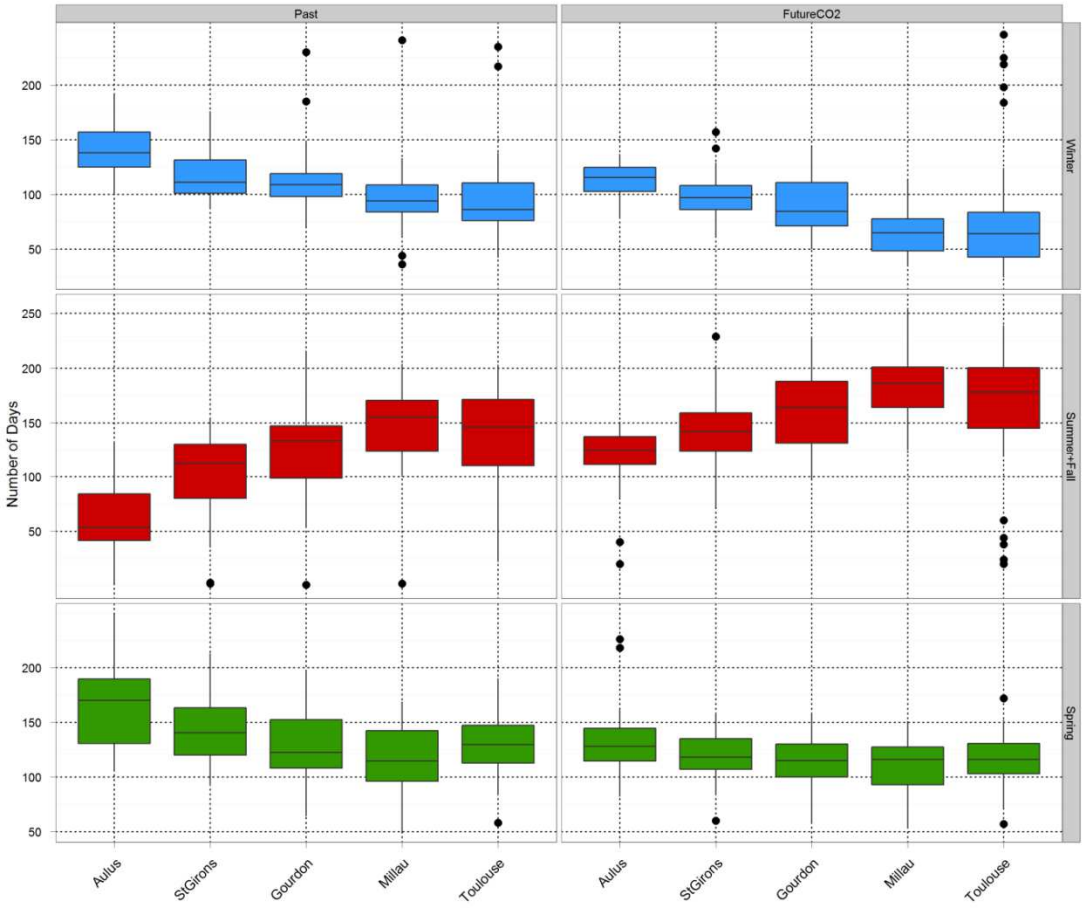
* significant level of 0.05 . significant level of 0.1



Suppl. Fig. 5 Medians (lines), inter-quartile ranges (boxes), and extreme values (dots) of spring, summer-fall and winter starting dates for past and future climates, expressed in julian day.



Suppl. Fig. 6 Simulated values of the length of spring, summer-fall and winter for the past period (1980-2011).



Suppl. Fig. 7 Medians (lines), inter-quartile ranges (boxes), and extreme values (dots) of spring, summer-fall and winter length for past and future climates, expressed in number of days.

Herbage balance

Suppl. Table 7 Mean, standard error, and variation of herbage surplus (spring), shortage (winter), shortage or surplus (summer-fall), and annual herbage production for past climate on each site. Test for examining if there was a significant trend over the period

Past		Spring				Summer-fall				Winter				Annual Production			
		mean†	St. dev.	trend/ decade	sign.	mean	St. dev.	trend/ decade	sign.	mean	St. dev.	trend/ decade	sign.	mean	St. dev.	trend/ decade	sign.
Herbage balance	Aulus	477	140	-31	ns	18	89	-35	.	-483	65	-39	**	1 201	145	-80	**
	St-Girons	397	122	1	ns	-53	144	-19	ns	-341	62	-11	ns	958	159	-33	ns
	Millau	277	149	-7	ns	-74	123	-41	.	-189	81	11	ns	513	162	-40	ns
	Gourdon	327	163	14	ns	-32	130	-24	ns	-292	94	5	ns	723	150	-13	ns
	Toulouse	351	148	5	ns	-147	123	-29	ns	-200	112	9	ns	542	145	-12	ns

† g/m² ** significant level of 0.01 . significant level of 0.1

Suppl. Table 8 Mean, standard error, and variation of herbage surplus (spring), shortage (winter), shortage or surplus (summer-fall), and annual herbage production for future climate on each site. Test for examining if there was a significant trend over the period.

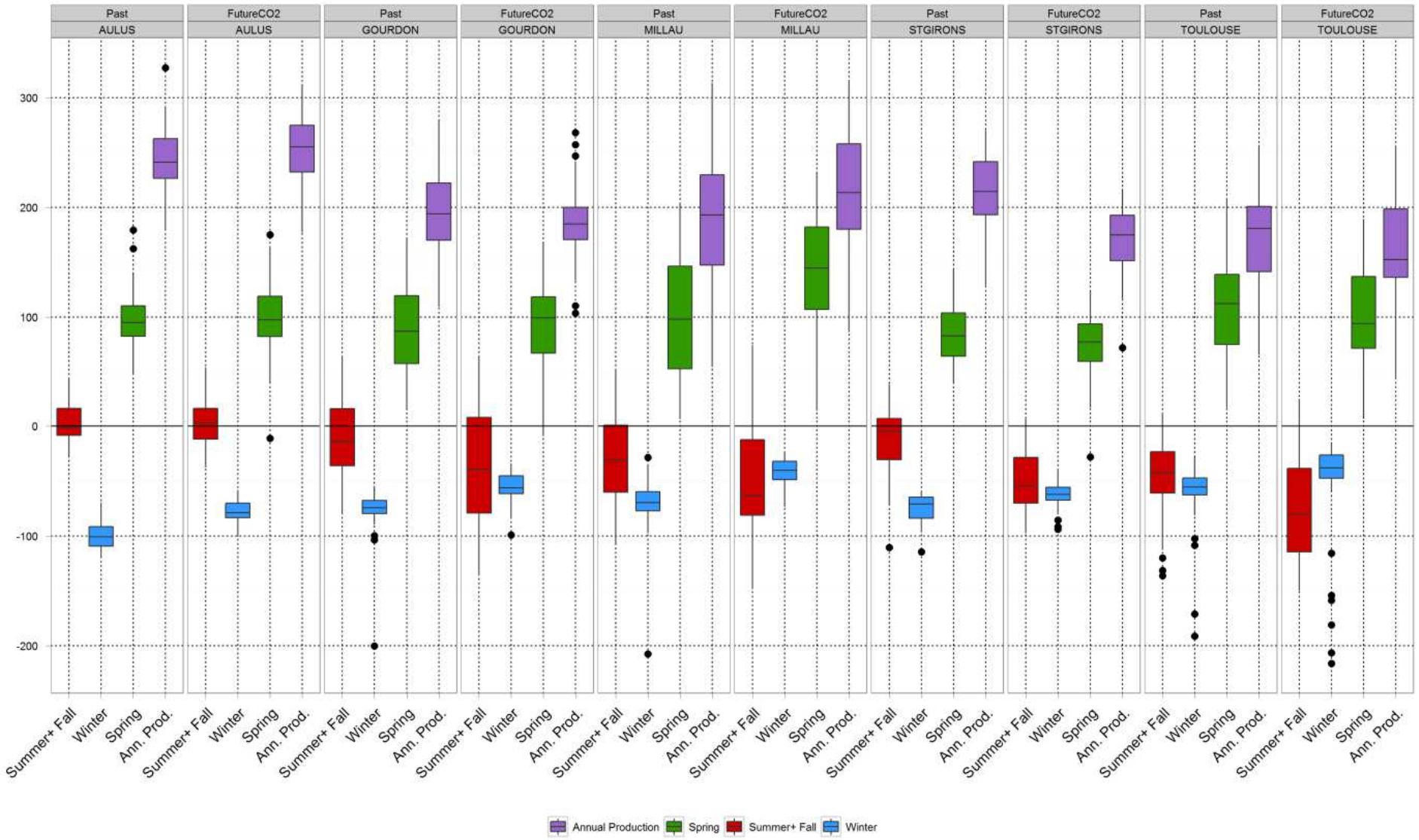
Future		Spring				Summer-fall				Winter				Annual Production			
		mean†	St. dev.	trend/ decade	sign.	mean	St. dev.	trend/ decade	sign.	mean	St. dev.	trend/ decade	sign.	mean	St. dev.	trend/ decade	sign.
Herbage balance	Aulus	477	182	-2	ns	13	105	20	ns	-381	51	6	ns	1 221	163	-12	ns
	St-Girons	353	138	-38	ns	-125	217	-33	ns	-205	50	9	ns	690	144	-43	ns
	Millau	378	152	-24	ns	-140	152	22	ns	-112	34	-11	ns	579	154	-14	ns
	Gourdon	336	139	-11	ns	-228	122	-31	ns	-286	56	8	ns	770	144	-40	ns
	Toulouse	320	133	-47	.	-236	159	12	ns	-190	186	-32	ns	511	145	-56	.

† g/m² . significant level of 0.1

Suppl. Table 9 Difference in days between future and past values of seasonal herbage balance between spring and summer-fall, summer-fall and winter, spring and summer-fall. Test for examining if the difference is significant between past and future

Past vs Future		Spring - Summer-fall				Summer-fall - Winter				Spring - Winter			
		Future - Past	% of the past value	% of the past annual production	sign.	Future - Past	% of the past value	% of the past annual production	sign.	Future - Past	% of the past value	% of the past annual production	sign.
Feeding days	Aulus	1	1%	0%	ns	-21	-21%	-7%	**	-23	-11%	-8%	*
	St-Girons	25	25%	10%	**	-52	-81%	-20%	***	-27	-16%	-10%	**
	Millau	62	48%	20%	**	-55	-122%	-18%	***	5	3%	2%	ns
	Gourdon	32	33%	12%	ns	-48	-67%	-18%	***	-19	-11%	-7%	.
	Toulouse	19	12%	6%	ns	-35	-211%	-10%	ns	-14	-8%	-4%	ns

*** significant level of 0.001 ** significant level of 0.01 * significant level of 0.05 . significant level of 0.1



Suppl. Fig. 8 Medians (lines), inter-quartile ranges (boxes), and extreme values (dots) of seasonal herbage balance and annual production for past and future climates, expressed in feeding-days

Annexe 10 : Annexe accompagnant le Chapitre 4

Tableau-Annexe 15 : Table of correspondence between rank (by number) of forage-year clusters by decreasing relative frequency in the past and rank (by letter) of forage-year clusters by decreasing average annual herbage balance in the past, at the three study sites.

Cluster rank by decreasing relative frequency in the past	Cluster rank by decreasing average annual herbage balance in the past and relative frequency of the cluster in the past (%)					
	Aulus		Saint Girons		Toulouse	
Rank	Rank	%	Rank	%	Rank	%
1	H	30	F	37	B	32
2	B	23	C	23	C	26
3	F	20	G	17	F	13
4	D	13	H	13	A	10
5	A	8	D	10	E	10
6	C	3	A	0	D	3
7	E	3	B	0	G	3
8	G	0	E	0	H	3

Annexe 11 : Adaptations des élevages au changement et à la variabilité climatique : illustration de la méthode de conception par trois cas d'étude. Chapitre 5

Dans cette annexe, nous analysons les adaptations imaginées lors d'ateliers de conception par trois groupes d'éleveurs répartis en deux systèmes de production et deux zones pédoclimatiques. Lors de ces ateliers, chaque groupe d'éleveur a dû imaginer et un système adapté au climat futur moyen et a dû imaginer sa conduite au cours d'une année favorable et au cours d'une année défavorable.

Le plan de cette annexe est le suivant :

1. Matériel et Méthodes
    1.1. Systèmes d'étude
    1.2. Zones d'étude
    1.3. Classification et choix des années
    1.4. Organisation et déroulement des ateliers
    1.5. Analyse des systèmes conçus
2. Résultats
    2.1. Adaptations mises en place dans des systèmes avec des expositions contrastées
    2.2 .Adaptations mises en place, pour une même exposition, sur des systèmes de production contrastés
3. Discussion et conclusion
4. Références

1. *Matériel et Méthodes*

Nous comparons les systèmes conçus au cours d'ateliers de conception (méthode de conception présentée dans le Chapitre 5). D'une part, nous analysons les différences d'adaptations conçues pour un même système de production en fonction de la zone d'étude (production laitière en Montagne et en Vallées). D'autre part, nous analysons les différences d'adaptations conçues sur une même zone en fonction du système de production (production laitière et production allaitante en Vallées).

1.1. Systèmes d'étude

Les deux systèmes d'étude sont les élevages laitiers et les élevages allaitants. Les systèmes allaitants seraient plus flexibles que les systèmes laitiers et seraient ainsi plus aptes à faire face à une variation du climat. Selon nous, cinq des six sources de flexibilité du troupeau définies par (Nozières, *et al.* 2011) seraient plus facilement mobilisables en système allaitant qu'en système laitier. «Utiliser la diversité des espèces et lignées » serait plus facile pour les systèmes allaitants étant donné que le nombre de races bovines bouchères (18) est supérieur au nombre de races bovines laitières (16) (France Génétique Elevage). «Organiser la mobilité du troupeau » serait plus facile pour les systèmes allaitants que pour les systèmes laitiers étant donné qu'en système allaitant il n'y a pas besoin que le troupeau soit à proximité d'un lieu de traite. Sans prendre en compte la transformation du produit sur la ferme, « combiner une diversité de produits » serait plus facile pour le système allaitant étant donné que les animaux (le produit en système allaitant) peuvent être vendus à différents âges et selon différents modes d'engraissement alors que le lait (le produit en système laitier) n'a qu'une seule forme de valorisation. «Utiliser les capacités d'adaptation de l'animal » serait plus facile en système allaitant : les animaux peuvent être momentanément sous alimentés sur une période qui s'étale du vêlage à la préparation à l'insémination suivante alors qu'en système laitier cette fenêtre de sous-alimentation n'existe pas étant donné que la période de gestation recouvre la période de lactation. La source de flexibilité « jongler avec le nombre d'animaux » serait à priori indépendante du système de production.

1.2. Zones d'étude

Les deux zones d'étude (Montagne et Vallées) sont situées dans le sud du Massif Central, en Aveyron (France). La zone Montagne est la petite région agricole de l'Aubrac, que nous avons déjà présenté dans le chapitre 5. Pour rappel, les exploitations sont principalement des exploitations d'élevage bovin, situées entre 900 et 1300m d'altitude. Les précipitations annuelles moyennes sont de 1400mm en Aubrac et le déficit moyen annuel est de 550mm. La sole est composée majoritairement de prairies temporaires (82% de la SAU) et de prairies permanentes (15% de la SAU). Il n'y a pas de cultures annuelles. En 2010, la SAU moyenne des exploitations en Aubrac est de 78 ha. En élevages laitiers, la race majoritaire est la Simmental et en élevage à viande ce sont les races Limousine et Aubrac. Les élevages bovins viande pratiquent la transhumance. La seconde zone d'étude est la zone de Vallées, avec des exploitations entre 500 et 700m d'altitude. Les précipitations annuelles moyennes sont de 950mm et le déficit hydrique est de 50mm. La sole est composée de prairies permanentes (30% de la SAU, qui représentent principalement les surfaces non mécanisables), de prairies temporaires (45% de la SAU) et de cultures annuelles (25% de la SAU). En 2010, la SAU moyenne des exploitations en Vallées est de 41ha. L'alimentation des animaux est principalement permise par l'ensilage d'herbe et de maïs. Les élevages laitiers sont constitués principalement de Prim'Holstein alors que les élevages à viande sont constitués de Limousines.

1.3. Classification et choix des années

L'origine des données climatiques et les critères de choix des années climatiques utilisées (année moyenne du passé, année moyenne du futur et deux années particulières) pour les ateliers sont les même pour la zone Vallées et la zone Montagne (Tableau-Annexe 16). Les années climatiques utilisées pour les ateliers en Montagne sont également présentés dans le Chapitre 5.

Les années climatiques utilisées lors des ateliers proviennent : 1- pour les simulations passées : extrapolation des données de point de grille 12x12km fournies par Météo-France et 2- pour les simulations futures : des simulations climatiques faites par Météo France à l'aide du modèle ARPEGE-Climat (Déqué, *et al.* 1994) qui ont été régionalisées à l'échelle 8x8km par le CERFACS à l'aide de la méthode Boé08 (Pagé, *et al.* 2008).

Comme décrit dans le chapitre 5, les années moyennes passées et futures (atelier 1) ont été reconstruite à partir des deux jeux de données (passé et futur). Les températures moyennes journalières et le rayonnement quotidien ont été calculées en faisant leur moyennes journalières sur les périodes considérées (passé : 1980-2009, futur : 2070-2100) (Tableau-Annexe 16). Pour représenter une occurrence réaliste des précipitations sur l'année (le calcul des précipitations journalières moyennes sur 30 ans uniformise la répartition des pluies sur l'année), les précipitations ont été reprises d'une année dont les productions fourragères annuelle et saisonnière étaient moyennes (écartées à moins d'1/2 écart type de la moyenne) pour la période considérée.

Tableau-Annexe 16: Années support à chaque atelier : origines, précipitations annuelles, concentration de CO2 athmosphérique et coefficient de correction d'utilisation de rayonnement.

		Calcul Origine	Précipitations de l'année	Co2 (ppm)	Correction de l'efficacité utilisation rayonnement
Montagne	Moyenne du passé	Moyenne journalières des températures, du rayonnement et de l'ETP sur la période 1980-2009 Précipitations de l'année 2009	1200mm	550	1
	Moyenne du futur	Moyenne journalières des températures, du rayonnement et de l'ETP sur la période 2070-2100 Précipitations de l'année 2082	1600mm	650	1.2
	Année favorable	2081 printemps moyen, forte repousse d'automne mais qui n'est pas accessible à priori (beaucoup de précipitations)	1150mm	650	1.2
	Année défavorable	2051 été très long+ déficit de printemps	810mm	650	1.2
Vallées	Moyenne du passé	Moyenne journalières des températures, du rayonnement et de l'ETP sur la période 1980-2009 Précipitations de l'année 2009	890mm	550	1
	Moyenne du futur	Moyenne journalières des températures, du rayonnement et de l'ETP sur la période 2070-2100 Précipitations de l'année 2094	920mm	650	1.2
	Année favorable	2087 printemps précoce, été en mai, forte repousse en automne	939mm	650	1.2
	Année défavorable	2051 printemps précoce + déficit de printemps	552mm	650	1.2

Dans chaque zone, les deux années particulières ont été choisies parmi les simulations climatiques de la période 2030-2100 comme pouvant présenter des difficultés de gestion par rapport à la situation moyenne. La première est une année fréquente (éloignées à moins d' 1 écart type de la moyenne) et favorable (dont la production annuelle fourragère est supérieure à la moyenne) mais pas moyenne (écartées à plus d'1/2 écart type de la moyenne) alors que l'autre est exceptionnelle en termes de production annuelle fourragère (écart à la moyenne supérieur à 1.5 écarts type) et défavorable (dont la production annuelle fourragère est inférieure à la moyenne).

Par rapport à l'année moyenne du futur, l'année favorable (année 2081 en Montagne et année 2087 en Vallées) est plus favorable sur le critère de la disponibilité fourragère annuelle (+19% et +21% de disponibilité fourragère annuelle respectivement en Montagne et en Vallées) (Tableau-Annexe 17). Elle est classée 11éme sur 31 années en Montagne selon la disponibilité fourragère décroissante, et 12ème sur 31 années en Vallées. L'année défavorable (année 2051 en Montagne et en Vallées) a une disponibilité fourragère annuelle inférieure à la moyenne du futur (-48% et -56% de la disponibilité fourragère annuelle en Montagne et en Vallées respectivement). Elle est classée 30ème sur 31 années selon la disponibilité fourragère décroissante en Montagne et en Vallées.

Tableau-Annexe 17 : Années support à chaque atelier selon les indicateurs d'exposition date de printemps, date d'été, date d'hiver et herbe disponble sur l'année.

		Année	Date printemps •	Date été •	Date hiver•	Indice d'exposition « Herbe disponible annuelle » (tMS/ha) •	Chargement potentiel ¤ (EqVL/ha)			Rang, selon le critère de la quantité d'herbe disponible au pâturage †
								Par rapport au passé	Par rapport au futur	
Montagne		Moyenne passé	5 avril	3août	18 octobre	*NB, réf=6.9*	*Réf. :1.5*			NA
		Moyenne futur	14 mars	18 juillet	28 octobre	+2.1	+ 0.4	+27%		NA
	2081	Année favorable	23 mars	19 juin	20 octobre	+3.8	+ 0.8	+53%	+19%	11/31 du futur i.e. 65% des années ont un bilan plus fable
	2051	Année défavorable	22 février	4 juillet	10 novembre	-2.2	- 0.5	-33%	-48%	30/31 du futur i.e. 3% des années ont un bilan plus fable
		Moyenne passé	27 février	11 juillet	28 octobre	*NB : réf.=6.1*	*Réf. :1.3*			NA
Vallées		Moyenne futur	8 février	17 juin	21 novembre	+1.2	+0.3	+23%		NA
	2087	Année favorable	2 février	16 mai	9 décembre	+2.7	+0.6	+46%	+21%	12/31 du futur i.e. 61% des années ont un bilan plus fable
	2051	Année défavorable	8 février	25 mai	25 novembre	-2.9	- 0.6	-46%	-56%	30/31 du futur i.e. 3% des années ont un bilan plus fable

• : calculé selon la méthode de sautier et al, 2013, avec type B, pat, ferti : 0.8, période de référence : 1980-2010

¤ : Chargement potentiel = Production annuelle/4.75, 4.75 t étant la quantité de matière sèche consommée par 1EqVL

† : sur la période 2075-2100, soit 31 années

1.4. Organisation et déroulement des ateliers

Les ateliers ont eu lieu entre le 15 février et le 9 avril 2013, avec les ateliers 2 et 3 le plus souvent regroupés sur une journée. Selon le groupe donné, la séquence d'ateliers s'est étalée sur une à quatre semaines. Les ateliers regroupaient 2 à 3 éleveurs et 2 animateurs. Pour chaque groupe, 1 conseiller agricole a participé à au moins 1 des ateliers. Les participants ont soit suivi soit 3 ateliers (6 éleveurs), 2 ateliers (4 éleveurs) ou 1 seul atelier (1 éleveur).

En zone Montagne, l'année favorable a été traitée en atelier 2 et l'année défavorable a été traitée en atelier 3. L'inverse a eu lieu en Vallées.

1.5. Analyse des systèmes conçus

Les systèmes conçus sont décrits et comparés selon leur dimension stratégique (décisions qui conditionnent le fonctionnement du système sur le long terme) et leur dimension tactique (décisions qui sont appliquées à court terme pour satisfaire les objectifs du système). La stratégie de l'exploitation recouvre son dimensionnement (SAU, SFP, nombre d'UGB, stock de fourrages en début d'année), le système d'élevage (dates de vêlage, niveau de production, renouvellement), l'utilisation des sols (part de prairies permanentes, de prairies temporaires, de céréales, de maïs) et le système d'alimentation (types d'aliments qui entrent dans la ration). La tactique comprend la gestion des surfaces (itinéraires techniques mis en place sur les différents couverts de l'exploitation), la gestion du pâturage (date de début, date de fin, période de plein pâturage, répartition des lots sur les parcelles), et la constitution de la ration (périodes de distribution de chaque type d'aliment et proportion distribuée).

2. *Résultats*

Les indicateurs d'exposition pour chaque zone (Montagne et Vallées) et pour chaque année étudiée (année moyenne du passé, année moyenne du futur, année favorable et année défavorable) sont présentés dans le Tableau-Annexe 18.

2.1. Adaptations mises en place dans des systèmes avec des expositions contrastées

Comparaison entre systèmes bovin lait

Système initial

Les systèmes conçus pour l'année moyenne du passé en zone Vallées et en zone Montagne diffèrent dans leur stratégie (dimensionnement, système d'élevage, utilisation des sols, système d'alimentation) et dans leur tactique (gestion du pâturage, constitution de la ration) (Tableau-Annexe 19).

Stratégie Le dimensionnement des systèmes conçus est différent d'une zone à l'autre malgré une SAU semblable (70ha en Montagne, 75ha en Vallées). En effet, le chargement est plus élevé en Vallées qu'en Montagne (1.2 UGB/ha en Vallées et 0.9 UGB/ha en Montagne). De même, les systèmes d'élevage sont contrastés avec, en Vallées, des vêlages groupés en automne, un âge au premier vêlage de 24 mois et un niveau de production de 8000L lait/vache/an, alors qu'en Montagne les vêlages sont étalés, l'âge au premier vêlage est de 36mois et le niveau de production de 5000L lait/vache/an. Concernant l'utilisation des sols, la SAU du système en Vallées est plus diversifiée que celle du système en Montagne. En effet, le système de montagne présente seulement des prairies permanentes alors qu'en Vallées on retrouve aussi du maïs, des céréales, des dérobées et des prairies temporaires. Cette différence d'utilisation des sols provient de différences de contraintes physiques ainsi que de différences d'expositions au climat entre les deux zones. En effet, peu de surfaces sont mécanisables en zone Montagne ce qui limite les cultures annuelles, les prairies temporaires ou les dérobées. De plus, le climat n'est pas compatible avec la culture de maïs (température moyenne journalière maximale de 21°C en Montagne contre 27°C en Vallées). Cette plus grande diversité de cultures en Vallées ainsi que les contraintes de filière du fromage AOC Laguiole induisent de fait une plus grande diversité des aliments dans le système d'alimentation en Vallées qu'en Montagne. En effet, les systèmes laitiers (en AOC) sur la zone de Montagne choisie (à Laguiole) ne peuvent pas utiliser d'ensilage.

Tactique La gestion du pâturage n'est pas la même entre la zone Vallées et la zone Montagne. Seul le système de Montagne pratique le plein pâturage une partie de l'année et conduit au pâturage les deux lots d'animaux (mères et génisses) de la même manière. En outre, les dates de début et de fin de pâturage sont contrastées d'une zone à l'autre : la période de pâture débute et fini 1 mois plus tôt en Vallées qu'en Montagne. Ces différences s'expliquent par des expositions contrastées à la fois concernant les dates de début de saison et l'intensité de la pousse de l'herbe à chaque saison. En effet, selon les indicateurs d'exposition, la date de début de printemps est plus précoce d'environ 1 mois en Vallées. De plus, la pousse de l'herbe au printemps et en été-automne est plus intense en Montagne qu'en Vallées : le printemps et l'été-automne en Montagne sont plus courts (2 semaines pour le printemps et 5 semaines pour l'été-automne) et plus productifs (solde de printemps de +3.9 tMS/ha en Montagne et +3.7 tMS/ha en Vallées, et solde d'été-automne de +0.1 tMS/ha en montagne et -1tMS/ha en Vallées). Cette plus forte intensité de la pousse de l'herbe et le plus faible nombre d'animaux en Montagne permet au système Montagne d'avoir une part plus importante de

la pâture dans la ration qu'en système Vallées. Ainsi, le système Montagne ne distribue pas de foin entre mai et novembre alors que le système Vallées distribue continuellement du foin dans la ration.

Tableau-Annexe 18: Indicateurs d'exposition en Montagne et en Vallées pour les années moyennes du passée, moyenne du futur, année favorable et année défavorable

			Montagne		Vallées	
Contraintes de la zone pour les systèmes			Cahier des charges AOC: -interdiction de l'ensilage - race Simmental ou Aubrac.		N.A.	
Année moyenne du passé et année moyenne du futur	Exposition de l'année **moyenne du passé**	Solde de printemps	3.9 tMS/ha		3.7 tMS/ha	
		Solde été	0.1 tMS/ha		-1 tMS/ha	
		Solde hiver	-3.9 tMS/ha		-2.6 tMS/ha	
		Bilan année	6.9 tMS/ha		6.1 tMS/ha	
		Date Printemps	5-avr.		27-févr.	
		Date Eté	3-août		11-juil.	
		Date Hiver	18-oct.		28-oct.	
		Temp Moy annuelle, min, max	7 °C, -3.3°C, 21.1°C		10.9°C, -0.4°C, 26.6°C	
		Cumul de préc	1200 mm		890 mm	
	Exposition de l'année **moyenne du futur**	Solde de printemps	4.7 tMS/ha		4.3 tMS/ha	
		Solde été	0.1 tMS/ha		-1.6 tMS/ha	
		Solde hiver	-2.6 tMS/ha		-1.5 tMS/ha	
		Bilan année	9 tMS/ha		7.3 tMS/ha	
		Date Printemps	14-mars		8-févr.	
		Date Eté	18-juil.		17-juin	
		Date Hiver	28-oct.		21-nov.	
		Temp Moy annuelle, min, max	10.2 °C, -1.2 °C, 27.5 °C		14°C, 1.9°C, 33°C	
		Cumul de préc	1600 mm		920 mm	
	Evolution de l'exposition entre le passé et le futur	Solde de printemps	+ 0.8 tMS/ha	+21%	+0.6 tMS/ha	+16%
		Solde été	0 tMS/ha	0%	-0.6 tMS/ha	-60%
		Solde hiver	+ 1.3 tMS/ha	+33%	+1.1 tMS/ha	+42%
		Bilan année	+ 2.1 tMS/ha	+30%	+1.2 tMS/ha	+20%
		Date Printemps	- 22 jours	NA	-19 jours	NA
		Date Eté	- 16 jours	NA	-24 jours	NA
		Date Hiver	+ 10 jours	NA	24 jours	NA
		Temp Moy annuelle, min, max	+ 3.2°C, + 2.1°C, +	NA	+3.1°C, +2.3°C,	NA
		Cumul de préc	6.4°C + 400 mm	+33%	+6.4°C +30 mm	+3%
Année favorable	Exposition de l'année **favorable**	Solde de printemps	4.7 tMS/ha		2.9 tMS/ha	
		Solde été	2.1 tMS/ha		0.8 tMS/ha	
		Solde hiver	-3 tMS/ha		-1 tMS/ha	
		Bilan année	10.7 tMS/ha		8.8 tMS/ha	
		Date Printemps	23-mars		02-févr	
		Date Eté	19-juin		16-mai	
		Date Hiver	20-oct		09-déc	
		Temp Moy annuelle, min, max	11°C, -11.5°C, 34.1°C		14.5°C, -3.1°C, 35.1°C	
		Cumul de préc	1150 mm		940 mm	
	Evolution de l'exposition entre l'année moyenne du futur et l'année favorable	Solde de printemps	0 tMS/ha	0	-1.4 tMS/ha	-33%
		Solde été	+2 tMS/ha	NA	+2.4 tMS/ha	NA
		Solde hiver	-0.4 tMS/ha	-15%	+0.5 tMS/ha	+33%
		Bilan année	+1.7 tMS/ha	+19%	+1.5 tMS/ha	+21%
		Date Printemps	+9 jours	NA	-6 jours	NA
		Date Eté	-29 jours	NA	-32 jours	NA
		Date Hiver	-8 jours	NA	+18 jours	NA
		Temp Moy annuelle, min, max	+0.8°C, -10.3°C, +6.6°C	NA	+0.5°C, -5°C, +2.1°C	NA
		Cumul de préc	-450 mm	-28%	+20 mm	+2%
Année défavorable	Exposition de l'année **défavorable du futur**	Solde de printemps	2.6 tMS/ha		1.6	
		Solde été	-2.3 tMS/ha		-3	
		Solde hiver	-2.6 tMS/ha		-1.6	
		Bilan année	4.7 tMS/ha		3.2	
		Date Printemps	22-févr		08-févr	
		Date Eté	04-juil		25-mai	
		Date Hiver	10-nov		25-nov	
		Temp Moy annuelle, min, max	9.1°C, -10.5°C, 29.9°C		13°C, -9.8°C, 35.1°C	
		Cumul de préc	810 mm		552 mm	
	Evolution de l'exposition entre l'année moyenne du futur et l'année défavorable	Solde de printemps	-2.1 tMS/ha	-45%	-2.7 tMS/ha	-63%
		Solde été	-2.4 tMS/ha	x-24	-1.4 tMS/ha	x 1.8
		Solde hiver	0 tMS/ha	0%	-0.1 tMS/ha	-7%
		Bilan année	-4.3 tMS/ha	-48%	-4.1 tMS/ha	-56%
		Date Printemps	-20 jours	NA	0 jours	NA
		Date Eté	-14 jours	NA	-23 jours	NA
		Date Hiver	+13 jours	NA	+4 jours	NA
		Temp Moy annuelle, min, max	-1.1°C, -9.3°C, +2.4°C	NA	-1°C, -11.7°C, +2.1°C	NA
		Cumul de préc	-790 mm	-49%	-368 mm	-40%

Tableau-Annexe 19 : Caractéristiques des systèmes conçus en Montagne et en Vallées pour l'année du moyenne passé et pour l'année moyenne du futur. - : pas de modification

Systèmes				Montagne	Vallées
Année moyenne du passé	Stratégie	Dimensionnement		70ha SAU, 61 UGB 0.9 UGB/ha 200 000L de lait 40 VL à 5 000L de lait Stock initial : 120tMS soit 147 jours d'avance	75ha SAU, 91 UGB 1.2 UGB/ha 480 000L de lait 60 VL à 8 000L de lait Stock initial : 150tMS soit 90 jours d'avance
		Système d'élevage		Vêlages étalés Age au premier vêlage : 36mois	Vêlages groupées en octobre Age au premier vêlage : 24 mois
		Stratégie d'utilisation des sols		100% Prairies Permanentes 1 grand type de couvert (PP) Déclinées selon 6 couverts (1 ITK max par couvert)	17% PP (13ha) 39% PT (29ha) 17% de maïs (13ha) 27% de céréales (20ha) Dont des dérobées sur 3% de la SAU (2ha) 5 grands types de couvert (PP, PT, céréales, maïs, dérobées) Déclinées selon 9 couverts (1 ITK max par couvert)
		Système d'alimentation		Foin Pâture	Maïs ensilage Foin Pâture Ensilage d'herbe Fourrage de légumineuses
	Tactique	Gestion des surfaces	**Prairies permanentes**	50% fauchées 50% pâturées	100% pâturées
			Prairies temporaires	-	17% pâturées 83% fauchées 0% déprimées puis fauchées
			Céréales, Maïs	-	
			Dérobées	-	Dérobées sur le maïs
		Gestion du pâturage	**Date de pâturage**	Début Pâture : fin avril Fin Pâture : fin novembre Plein Pâturage : mi-mai à début novembre	Début Pâture : fin mars Fin Pâture : début novembre Plein Pâturage : jamais
			Gestion des lots au pâturage	Même conduite pour les deux lots	Fin de pâturage des mères 2 mois et demi plus tôt que celui des génisses
		Constitution de la ration		Foin : de novembre à mai	Foin en permanence Début maïs : septembre Arrêt maïs : fin mai Début ensilage d'herbe: mi-juin Arrêt ensilage d'herbe : fin mars
Adaptations du système passé à l'année moyenne du futur	Stratégie	Dimensionnement		Augmentation du nombre d'animaux Diminution de la SAU (suppression des estives) Diminution du stock initial –en jours d'avance –	_
		Stratégie d'utilisation des sols		Diminution des PP (suppression des estives)	_
		Système d'alimentation		Distribution de foin en été (50% de la ration pendant 2 mois)	100% de foin pour les génisses en été (2 mois)
	Tactique	Gestion des surfaces	**Prairies permanentes**	40% pâturées (suppression des estives, -13ha) 60% fauchées (même nombre d'ha)	_
			Prairies temporaires	_	21% pâturées (même nombre d'ha) 79% fauchées (-5ha)
			Céréales, Maïs	_	_
			Dérobées	_	Augmentation des dérobées (x4) Diversification des dérobées
		Gestion du pâturage	**Date de pâturage**	Mise à l'herbe plus précoce (4 semaines)	Mise à l'herbe plus précoce (4 semaines)
			Gestion des lots au pâturage	_	Arrêt du pâturage des génisses en été
		Constitution de la ration		Foin : mi-juin à fin mai	Arrêt ensilage d'herbe : fin février

Systèmes adaptés au climat futur

Pour être adaptés à l'année moyenne du futur, la stratégie (dimensionnement, utilisation des sols, système d'alimentation) et la tactique (gestion des surfaces, gestion du pâturage et constitution de la ration) des systèmes conçus en année moyenne du passée ont été modifiés en Montagne et en Vallées (Tableau-Annexe 19).

Stratégie Dans les deux zones, les indicateurs d'exposition au climat montrent une plus forte disponibilité de la ressource herbagère sur l'année que dans le passé (+30% en Montagne et +20% en Vallées). Seul le système Montagne a été modifié pour tirer profit de cette amélioration : la SAU a été diminuée par la suppression des estives (-19% SAU) et le nombre d'animaux a été augmenté (+ 8UGB soit +13%). Ainsi, le chargement a été augmenté. Par ailleurs, les indicateurs d'exposition montrent une détérioration de la situation en été-automne avec la diminution du solde d'herbe en été-automne (-0.6tMS/ha en Vallées) ou l'allongement de la durée de l'été (+ 26 jours soit +34% en Montagne). Face à cette situation d'été-automne plus sévère que dans le passé, le système Vallées a augmenté la quantité de foin distribué aux génisses en été alors que le système de Montagne a intégré du foin dans la ration des génisses et des mères en été.

Tactique Les indicateurs d'exposition montrent un solde d'herbe au printemps plus élevé que dans le passé (+21% en Montagne et +16% en Vallées) et un printemps plus précoce (22 jours en Montagne et 19 jours en Vallées). Face au printemps plus précoce, le début de pâturage est avancé d'une période (4 semaines) dans les deux zones. Concernant la conduite du pâturage, seul le système Vallées augmente la part du pâturage dans la ration des animaux au printemps (par la diminution de l'ensilage d'herbe pour les mères et la diminution du foin pour les génisses). En effet, la diminution des estives pour le système Montagne (voir section stratégie) induit un plus fort chargement et permet de valoriser l'augmentation de la productivité des pâtures au printemps sans augmenter la part du pâturage dans la ration.

Malgré une évolution de l'exposition du système en hiver (hiver plus tardif et augmentation du solde d'herbe), ni les dates de fin de pâturage ni l'objectif de stock en fin d'année n'ont été volontairement modifiées (en Montagne, l'objectif de stock a été diminué en jours d'avance- mais pas en tMS – car le chargement a été augmenté).

Adaptations à une année favorable

Tactique D'après les indicateurs d'exposition (Tableau-Annexe 18), les quantités d'herbe disponible au printemps en Montagne pour l'année favorable et l'année moyenne du futur sont égales. En revanche, la disponibilité de printemps est plus faible (-33%) en Vallées pour l'année favorable que pour l'année moyenne du futur. Le solde d'été-automne est plus important que pour l'année moyenne du futur dans les deux zones (+2 tMS/ha en Montagne et +2.4 tMS/ha en Vallées). Le solde d'hiver est plus faible en Montagne (-15%) et plus élevé en Vallées (+21%) qu'en année moyenne du futur. Par rapport à l'année moyenne du futur, le printemps est plus tardif en Montagne (+9 jours) et plus précoce en Vallées (-6 jours), l'été plus précoce (-29 jours en Montagne, -32 jours en Vallées) et l'hiver est plus précoce en Montagne (8 jours) et plus tardif en Vallées (+ 18jours). Les adaptations tactiques des systèmes ont consisté en une modification de la gestion des surfaces et en une modification de la gestion du pâturage dans les deux zones ainsi qu'en une modification de la constitution de la ration en Montagne (Tableau-Annexe 20). La gestion des surfaces a été modifiée seulement pour les prairies permanentes avec une priorité donnée à la fauche dans les deux zones :

les surfaces initialement pâturées exclusivement ont été déprimées puis fauchées (7ha sur 23ha en Montagne et 3ha sur 13ha en Vallées). Concernant la gestion du pâturage, la mise à l'herbe a été plus précoce dans les deux zones (1 semaine en Montagne et 4 semaines en Vallées). En outre, le pâturage d'été est modifié en Vallées avec le pâturage des dérobées en été-automne ou des prairies permanentes fauchées. En Vallées, la gestion du système en année favorable a permis de constituer du stock supplémentaire par rapport à l'objectif de stock (+30% en Vallées). En revanche, le stock en Montagne a été reconstitué à 95%.

Tableau-Annexe 20: Modifications des systèmes conçus en Montagne et en Vallées pour tirer parti de l'année favorable et pour faire face à l'année défavorable.

Systèmes				Montagne	Vallées
Adaptations du système futur à l'année favorable	Tactique	Gestion des surfaces	**Prairies permanentes**	Diminution des surfaces pâturées (jusqu'à 28% des PP, -7ha) Augmentation des surfaces déprimées puis fauchées (jusqu'à 21% des PP, +7ha)	Diminution des surfaces pâturées (jusqu'à 77% des PP, -3ha) Augmentation des surfaces déprimées puis fauchées (jusqu'à 23% des PP, +3ha)
			Prairies temporaires	_	_
			Céréales, Maïs	_	_
			Dérobées	_	
		Gestion du pâturage	**Date de pâturage**	Mise à l'herbe plus précoce (1 semaine)	Mise à l'herbe plus précoce (4 semaines)
			Utilisation des surfaces	Déprimage des PP	Pâturage des PP fauchées après fauche Déprimage des PP de fauche Pâturage des dérobées en été-automne
			Calendrier de pâturage	Décalage des mises à l'herbe : mères en priorité	Décalage des mises à l'herbe avec les génisses en priorité au pâturage
			Répartition des lots sur les métaparcelles	-	Pâturage des dérobées exclusivement par génisses
		Constitution de la ration		-	-
Adaptations du système futur à l'année défavorable	Tactique	Gestion des surfaces	**Prairies permanentes**	Suppression des surfaces déprimées puis fauchées (-5ha) Augmentation des surfaces pâturées (jusqu'à 49% des PP, +5ha)	_
			Prairies temporaires	_	_
			Céréales, Maïs	_	_
			Dérobées	_	_
		Gestion du pâturage	**Date de pâturage**	Mise à l'herbe plus précoce (5 semaines)	Mise à l'herbe plus précoce (4 semaines) Arrêt de pâturage plus tardif (4 semaines)
			Utilisation des surfaces	Pas de pâturage des PP fauchées après leur fauche	Pâturage des dérobées en été-automne Pâturage des PT après leur fauche
			Calendrier de pâturage	Fin de pâturage simultané pour mères et génisses (en AT1 : mères pâturent plus longtemps) Décalage des mises à l'herbe avec les mères en priorité au pâturage	Arrêt momentané du pâturage des mères en été Pâturage des génisses continu entre mise à l'herbe et retour définitif à l'étable
			Répartition des lots sur les métaparcelles	_	Pâturage des PP exclusivement par les génisses Pâturage des PT et des dérobées exclusivement par les mères
		Constitution de la ration		Augmentation de la part de foin dans la ration des génisses (100% de foin quand pas assez d'herbe disponible: 3mois)	Augmentation de la part de foin dans la ration des génisses (100% de foin quand pas assez d'herbe disponible, soit 2 mois)

Adaptations à une année défavorable

Tactique Dans les deux lieux, la production annuelle d'herbe de l'année défavorable est inférieure à celle de l'année moyenne du futur (-48% en Montagne et -56% en Vallées) (Tableau-Annexe 18). De même, à l'échelle de la saison, le solde de printemps et d'été-automne sont plus faibles pour l'année défavorable (-45% et -63% au printemps et -2.4tMS/ha et -1.4tMS/ha, respectivement en Montagne et en Vallées). Le solde d'hiver est égal en Montagne et est plus faible de 7% en Vallées. Le début de printemps est plus précoce en Montagne (20jours) et est stable en Vallées. Dans les deux zones, l'été est plus précoce (-14 jours en Montagne et -23 jours en Vallées) et l'hiver plus tardif (+13 jours en Montagne et +4 jours en Vallées). Pour faire face à ces années défavorables, les systèmes ont dû modifier leur tactique concernant la gestion du pâturage et la constitution de la ration (les deux zones) et la gestion des surfaces (uniquement en Montagne) (Tableau-Annexe 20). En Montagne, les surfaces déprimées puis fauchées ont été utilisées en pâturage exclusivement. Concernant la gestion du pâturage, la mise à l'herbe a été plus précoce dans les deux zones (1 semaine en Montagne et 4 semaines en Vallées). En outre, le pâturage d'été est soit diminué avec un arrêt du pâturage des surfaces fauchées après leur fauche (Montagne), soit augmenté avec le pâturage des dérobées ou des prairies temporaires fauchées (Vallées). La part du foin dans la ration des génisses durant les mois d'été a été augmentée dans les deux lieux (3 mois supplémentaires en Montagne et 2 mois supplémentaires en Vallées). Les deux systèmes ont dû acheter du foin, à hauteur de à 15tMS (13% du stock initial) à Laguiole et en 5tMS (3% du stock initial) en Vallées.

Synthèse

Pour faire face au climat moyen futur (atelier 1), les adaptations les plus grandes (i.e. stratégiques) ont été mises en place pour les variations d'exposition les plus importantes (i.e. perceptibles à l'échelle de l'année). En effet, la différence de quantité d'herbe disponible à l'échelle de l'année entre les situations moyennes passée et future est plus grande en Montagne qu'en Vallées et a nécessité plus d'adaptations stratégiques en système Montagne qu'en système Vallées. En outre, la différence de quantité d'herbe disponible à l'échelle du printemps et de l'été-automne est plus marquée en Vallées qu'en Montagne et a nécessité plus d'adaptations tactiques en système Vallées qu'en système Montagne.

Pour tirer parti de l'année favorable, les adaptations les plus grandes ont également été mises en place pour les variations d'exposition les plus importantes. En effet, la différence de quantité d'herbe disponible entre l'année moyenne du futur et l'année favorable est plus grande en Vallées qu'en Montagne et a nécessité plus de modifications en Vallées qu'en Montagne (à la fois pour la gestion des surfaces et la gestion du pâturage). Par ailleurs, les performances du système Vallées sont supérieures à celles du système Montagne pour cette année favorable ce qui montre que le système et les adaptations mis en place en Vallées permettent de mieux tirer parti de l'évolution d'exposition que le système et les adaptations mis en place en Montagne.

Pour faire face à l'année défavorable, les adaptations les plus grandes ont été mises en place pour les variations d'exposition les plus fortes si l'on considère le critère « solde d'herbe disponible en été-automne ». En effet, la différence de quantité d'herbe disponible entre l'année moyenne du futur et l'année défavorable est plus grande en Montagne lorsqu'il s'agit de l'été-automne et a nécessité de faire appel à une pratique exceptionnelle en montagne (alors qu'elle est habituelle en Vallées) : distribuer 100% de foin dans la ration en été.

2.2. Adaptations mises en place, pour une même exposition, sur des systèmes de production contrastés

Comparaison entre systèmes de Vallées

Systèmes initiaux

Les systèmes laitier et allaitant conçus en Vallées pour l'année moyenne du passé diffèrent dans leur stratégie (dimensionnement, système d'élevage, utilisation des sols, système d'alimentation) et leur tactique (gestion des surfaces, gestion du pâturage, constitution de la ration) (Tableau-Annexe 21).

Stratégie La SAU et le nombre d'UGB sont semblables d'un système à l'autre mais sont légèrement plus élevés en laitier qu'en allaitant (75ha SAU et 91 UGB en laitier et 70ha SAU et 83 UGB en allaitant). Malgré un rapport nombre d'UGB sur SAU égal (1.2 UGB/ha SAU), le système laitier a un chargement plus élevé que le système allaitant (1.7 UGB/ha SFP en laitier et 1.3 UGB/ha SFP en allaitant). Le stock initial est de l'ordre de 90 jours d'avance dans les deux systèmes. Les systèmes d'élevage diffèrent dans la date au premier vêlage, qui est plus précoce en laitier (24 mois contre 36 mois en allaitant). Les vêlages sont groupés en automne dans les deux systèmes. L'utilisation des sols consiste en une sole plus diversifiée en laitier qu'en allaitant avec une plus forte part des cultures annuelles (céréales et maïs) dans la SAU. En système laitier la SAU est constituée à 17% de prairies permanentes, 39% de prairies temporaires, 17% de maïs et 27% de céréales alors qu'elle est constitué en système allaitant de 46% de prairies permanentes, 46% de prairies temporaires et 10% de céréales. En outre, le système laitier met en place des dérobées contrairement au système allaitant. Les deux systèmes ont la même diversité de combinaisons de couverts et d'itinéraires techniques (9 combinaisons) avec une plus forte diversité de couverts en laitier (5 couverts contre 3 en allaitant) et une plus grande diversité d'itinéraires techniques en allaitant (jusqu'à 5 itinéraires techniques pour un même couvert en allaitant contre 1 unique itinéraire technique par couvert en laitier). Le système d'alimentation du système laitier (maïs ensilage, foin, pâture, ensilage d'herbe et fourrages de légumineuses) est plus diversifié que celui du système allaitant (foin, pâture, ensilage d'herbe).

Tactique En système laitier, les 13ha de prairies permanentes sont exclusivement destinées à la pâture alors qu'en système allaitant, les 31ha de prairies permanentes sont pâturées pour les ¾ et fauchées pour le quart restant. Concernant les prairies temporaires, le système laitier les valorise en fauche de façon plus importante que le système allaitant (83% sont exclusivement fauchées sur les 29ha totaux en laitier contre 63% sur 32ha totaux en allaitant). En outre, le système laitier ne déprime aucune de ses surfaces fauchées (9% des prairies temporaires du système allaitant sont déprimées avant d'être fauchées). La gestion du pâturage distingue les deux systèmes. Le système allaitant pratique le plein pâturage de mi-avril à mi-août alors que le système laitier n'a pas de période de plein pâturage. En outre, le pâturage en système allaitant débute plus tôt (1mois) et s'arrête plus tard (1 mois). Les rations des deux systèmes sont contrastées et reflètent à la fois les différences stratégiques d'utilisation des sols et de système d'alimentation et les différences tactiques de gestion du pâturage et des surfaces. Le système laitier donne du foin en permanence et débute la distribution de l'ensilage d'herbe plus tôt que le système allaitant (début en mi-juin pour le système laitier et octobre pour le système allaitant). Cette différence vient notamment du fait que, pour le système laitier, les prairies sont plus valorisés par des fauches et le pâturage est moins long (cf. période de pâturage) et moins intense (cf. pratique ou non du plein pâturage) que pour le système allaitant. En revanche, le système allaitant donne du foin de mi-août à fin mars. La culture

de maïs en système laitier permet de distribuer de l'ensilage de maïs entre septembre et fin mai. Le système allaitant ne distribue pas de maïs.

Tableau-Annexe 21 : Caractéristiques des systèmes et allaitants conçus en Vallées pour l'année du moyenne passé et pour l'année moyenne du futur.

Zone Vallées				Allaitant	Laitier
Année moyenne du passé	Stratégie	Dimensionnement		70ha SAU, 83 UGB 1.2 UGB/ha SAU 1.3 UGB/ha SFP Stock initial : 110tMS soit 93 jours d'avance	75ha SAU, 91 UGB 1.2 UGB/ha SAU 1.7 UGB/ha SFP 480 000L du lait 60 VL à 8 000L de lait Stock initial : 150tMS soit 90 jours d'avance
		Système d'élevage		Vêlages groupées en octobre Age au premier vêlage : 36 mois	Vêlages groupées en octobre Age au premier vêlage : 24 mois
		Stratégie d'utilisation des sols		44% PP (31ha) 46% PT (32ha) 10% de céréales (7ha) 3 grands types de couvert (PP, PT, céréales) Déclinées selon 9 couverts (5 ITK max par couvert)	17% PP (13ha) 39% PT (29ha) 17% de maïs (13ha) 27% de céréales (20ha) Dont des dérobées sur 3% de la SAU (2ha) 5 grands types de couvert (PP, PT, céréales, maïs, dérobées) Déclinées selon 9 couverts (1 ITK max par couvert)
		Système d'alimentation		Foin Pâture Ensilage d'herbe	Maïs ensilage Foin Pâture Ensilage d'herbe Fourrage de légumineuses
	Tactique	Gestion des surfaces	**Prairies permanentes**	74% pâturées 26% fauchées	100% pâturées
			Prairies temporaires	28% pâturées 63% fauchées 9% déprimées puis fauchées	17% pâturées 83% fauchées 0% déprimées puis fauchées
			Céréales, Maïs	-	-
			Dérobées	-	Dérobées sur le maïs
		Gestion du pâturage	**Date de pâturage**	Début Pâture : fin février Fin Pâture : début décembre Plein Pâturage : mi-avril à mi-août	Début Pâture : fin mars Fin Pâture : début novembre Plein Pâturage : jamais
			Gestion des lots au pâturage	Fin de pâturage des mères 3 mois plus tôt que celui des génisses	Fin de pâturage des mères 2 mois et demi plus tôt que celui des génisses
		Constitution de la ration		Foin : mi-août à fin mars Début ensilage d'herbe : octobre Arrêt ensilage d'herbe : fin mars	Foin en permanence Début maïs : septembre Arrêt maïs : fin mai Début ensilage d'herbe : mi-juin Arrêt ensilage d'herbe : fin mars
Adaptations du système passé à l'année moyenne du futur	Stratégie	Dimensionnement		-	_
		Stratégie d'utilisation des sols		Diminution des PP (-4ha) Augmentation des PT (+1ha) Augmentation des céréales (+3ha)	_
		Système d'alimentation		Distribution de foin en été aux génisses (100% de la ration pendant 3 mois)	100% de foin pour les génisses en été (2 mois)
	Tactique	Gestion des surfaces	**Prairies permanentes**	70% pâturées (-4ha) 30% fauchées (+4ha)	_
			Prairies temporaires	18% pâturées (-3ha) 61% fauchées (même nombre d'ha) 21% déprimées puis fauchées (+4ha)	21% pâturées (même nombre d'ha) 79% fauchées (-5ha)
			Céréales, Maïs	+ 3ha de céréales	_
			Dérobées	_	Augmentation des dérobées (x4) Diversification des dérobées
		Gestion du pâturage	**Date de pâturage**	Mise à l'herbe plus précoce, dès le début de l'année (2 période soit 8 semaines)	Mise à l'herbe plus précoce (1 période soit 4 semaines)
			Gestion des lots au pâturage	Arrêt du pâturage des génisses en été Pâturage continue des génisses en hiver	Arrêt du pâturage des génisses en été
		Constitution de la ration		Arrêt ensilage d'herbe : fin février	Arrêt ensilage d'herbe : fin février

Systèmes adaptés au climat futur

Pour les systèmes allaitant et laitier, l'adaptation à l'année moyenne du futur a consisté en la modification de la stratégie (utilisation des sols, système d'alimentation) et de la tactique (gestion des surfaces, gestion du pâturage et constitution de la ration) (Tableau-Annexe 21). L'année moyenne du futur se caractérise par une plus grande disponibilité de l'herbe sur l'année, une diminution de l'herbe disponible en été-automne, un printemps plus précoce, un hiver plus tardif et plus court (Tableau-Annexe 18), une augmentation des rendements des céréales et une diminution des rendements en maïs sec.

Stratégie Le système d'alimentation a été modifié dans les deux systèmes pour faire face à la baisse de la disponibilité de l'herbe en été-automne (Tableau-Annexe 21): la quantité de foin distribué en été est augmentée dans les systèmes allaitant et laitiers (jusqu'à 100% de la ration des génisses pendant 3 mois en allaitant et pendant 2 mois en laitier). En outre, l'utilisation des sols a été modifiée en allaitant avec une diminution des prairies permanentes (-4ha soit -13% de la surface initiale) pour augmenter les surfaces de prairies temporaires (+1ha soit +3% de surface initiale) et de céréales (+3ha soit +43% de surface initiale). En revanche, le dimensionnement a été maintenu pour les deux systèmes (allaitant et laitier) et l'utilisation des sols a été maintenue en laitier.

Tactique La gestion des surfaces en prairies permanentes a été modifiée pour le système allaitant (contrairement au système laitier) avec une diminution de 4ha des surfaces pâturées au profit de surfaces exclusivement fauchées (Tableau-Annexe 21). La gestion des surfaces en prairies temporaires a été modifiée pour les deux systèmes : augmentation de la part des surfaces pâturées en laitier (et diminution des surfaces fauchées) et diminution de la part des surfaces pâturées en allaitant (et augmentation des surfaces déprimées puis fauchées). Les surfaces en céréales ont été augmentées en allaitant (+3ha) mais ont été maintenue en laitier. Dans les deux systèmes, la mise à l'herbe est plus précoce qu'en année passée mais la différence est plus marquée en système allaitant (8 semaines) qu'en système laitier (4 semaines). Concernant la constitution de la ration, l'arrêt de l'ensilage d'herbe a été avancé d'un mois dans les deux systèmes (début en fin février contre fin mars dans le passé).

Adaptations à une année favorable

Tactique Face à la même année climatique qualifiée de favorable selon le critère de disponibilité annuelle d'herbe, les systèmes laitiers et allaitants ont mis en place des tactiques différentes (Tableau-Annexe 22). La gestion des surfaces a été modifiée à la fois en laitier et en allaitant pour augmenter les surfaces fauchées. Le système allaitant a modifié la gestion des prairies temporaires (+2ha de surfaces fauchées) alors que le système laitier a modifié la gestion des prairies permanentes (+3ha de prairies déprimées puis fauchées au détriment des prairies pâturées). En outre, le système allaitant a mis en place des dérobées (4ha), alors que cette pratique existait déjà en système laitier en année moyenne du passé. Modifier la gestion du pâturage a également été un moyen de s'adapter à cette année climatique favorable pour les deux systèmes. La mise à l'herbe a été avancée (4 semaines) en laitier ou retardée (4 semaines) en allaitant et l'herbe disponible entre mi-juillet et début novembre a été valorisée par du plein pâturage en système allaitant ou par le pâturage des prairies permanentes en laitier. En outre, la constitution de la ration a été modifiée en système allaitant (et non en laitier) : pâture exclusive entre mi-juillet et début novembre et distribution d'ensilage d'herbe de mi-mai à mi-juin.

Tableau-Annexe 22: Modifications des systèmes et allaitant conçus en Vallées pour tirer parti de l'année favorable et pour faire face à l'année défavorable

Zone Vallées				Allaitant	Laitier
Adaptations du système futur à l'année favorable	Tactique	Gestion des surfaces	**Prairies permanentes**	_	Diminution des surfaces pâturées (jusqu'à 77% des PP, -3ha) Augmentation des surfaces déprimées puis fauchées (jusqu'à 23% des PP, +3ha)
			Prairies temporaires	Augmentation des surfaces uniquement fauchées (jusqu'à 76%, +2ha)	_
			Céréales, Maïs	-	_
			Dérobées	Mise en place de dérobées (4ha)	-
		Gestion du pâturage	**Date de pâturage**	Mise à l'herbe plus tardive (4 semaines)	Mise à l'herbe plus précoce (4 semaines)
			Utilisation des surfaces	Pâturage des dérobées en été-automne	Pâturage des PP fauchées après fauche Déprimage des PP de fauche Pâturage des dérobées en été-automne
			Calendrier de pâturage	Plein pâturage entre mi-juillet et début novembre	Décalage des mises à l'herbe avec les génisses en priorité au pâturage
			Répartition des lots sur les métaparcelles	Pâturage des PP exclusivement par les génisses Pâturage des dérobées exclusivement par les mères	Pâturage des dérobées exclusivement par génisses
		Constitution de la ration		Pâture exclusive entre mi-juillet et début novembre Distribution d'ensilage d'herbe de mi-mai à mi-juin	-
Adaptations du système futur à l'année défavorable	Tactique	Gestion des surfaces	**Prairies permanentes**	Augmentation des surfaces pâturées (jusqu'à 85% des PP, +5ha) Diminution des surfaces fauchées exclusivement (jusqu'à 15% des PP,-5ha)	_
			Prairies temporaires	Augmentation des surfaces pâturées (jusqu'à29% des PT, +4ha) Diminution des surfaces fauchées exclusivement (jusqu'à 62% des PT,-2ha)	_
			Céréales, Maïs	-	-
			Dérobées	Mise en place de dérobées (4ha)	_
		Gestion du pâturage	**Date de pâturage**	Mise à l'herbe plus tardive (2 semaines)	Mise à l'herbe plus précoce (4semaines) Arrêt de pâturage plus tardif (4 semaines)
			Utilisation des surfaces	Pâturage des dérobées en été-automne Pâturage des PT après leur fauche	Pâturage des dérobées en été-automne Pâturage des PT après leur fauche
			Calendrier de pâturage	Pâturage d'automne pour les mères	Arrêt momentané du pâturage des mères en été Pâturage des génisses continu entre mise à l'herbe et retour définitif à l'étable
			Répartition des lots sur les métaparcelles	Pâturage des PP exclusivement par les génisses	Pâturage des PP exclusivement par les génisses Pâturage des PT et des dérobées exclusivement par les mères
		Constitution de la ration		Distribution de paille aux mères pendant 8 semaines (environ 50% de la ration) Distribution d'ensilage d'herbe aux génisses en été.	Augmentation de la part de foin dans la ration des génisses (100% de foin quand pas assez d'herbe disponible soit 17 semaines)

Adaptations à une année défavorable

Tactique Face à la même année climatique qualifiée de défavorable selon le critère de disponibilité annuelle d'herbe, les systèmes laitiers et allaitants ont mis en place des tactiques différentes (Tableau-Annexe 22). La gestion des surfaces a été modifiée seulement en système allaitant pour augmenter les surfaces pâturées (pâturage de 5ha de prairies permanentes et 2ha de praires temporaires initialement fauchées et mise en place de dérobées pâturées sur 4ha). Pour les deux systèmes, l'adaptation à cette année climatique défavorable a été permise notamment par la modification de la gestion du pâturage. La mise à l'herbe est avancée (2 semaines) en allaitant et est retardée (4 semaines) en laitier alors que la fin du pâturage est uniquement modifiée en laitier (4 semaines plus tard). Les deux systèmes valorisent au maximum les surfaces pâturage en été en pâturant les prairies temporaires après leur fauches et les dérobées. En système allaitant, les mères pâturent en automne alors qu'en laitier le pâturage des mères est interrompu plusieurs mois en été.

En outre, la constitution de la ration a été modifiée pour les deux systèmes : de la paille est distribuée pendant 8 semaines au lot de mères à hauteur de 50% de la ration et de l'ensilage d'herbe est distribué aux génisses en été pour le système allaitant alors que pour le système laitier, la part de foin dans la ration des génisses est augmentée jusqu'à atteindre 100% pendant 13 semaines.

Synthèse

Nos résultats montrent que les modifications les plus importantes ont surtout été mises en place pour le système allaitant. En effet, les modifications de système ont été de plus grande ampleur en allaitant qu'en laitier tant sur le plan stratégique (utilisation des sols et système d'alimentation) que tactique (gestion des surfaces, gestion du pâturage et constitution de la ration) pour s'adapter au changement climatique moyen. Pour tirer parti de l'année favorable, les modifications tactiques ont été plus importantes en système allaitant qu'en système laitier (notamment pour la mise en place de dérobées, la gestion des prairies ou la constitution de la ration). Pour faire face à l'année défavorable, la gestion des surfaces a été plus grandement modifiée en système allaitant qu'en système laitier alors que le calendrier de pâturage a été plus modifié en système laitier qu'en système allaitant.

L'évolution des stocks fourragers entre le début et la fin de l'année montre que le système laitier a un niveau d'utilisation des ressources fourragères par le troupeau plus forte que le système allaitant. En effet, le système allaitant produit plus de stocks (en jours d'alimentation) que le système laitier en année favorable et défavorable (+65 jours de stock en allaitant et +34 jours de stock en laitier pour l'année favorable et +5 jours de stock en allaitant et -12 jours de stock en laitier pour l'année défavorable).

3. *Discussion et conclusion*

Nos résultats renvoient à deux leviers d'adaptations au changement tirés de la littérature de la résilience et de la robustesse et particulièrement repris lorsqu'il s'agit de l'exploitation agricole : la diversité des éléments et des processus et la surcapacité du système (Darnhofer, *et al.* 2010; Dumont, *et al.* 2013; Gunderson 2010; Nozières, *et al.* 2011; ten Napel, *et al.* 2011). Dans notre étude, le système avec la diversité de ressources fourragères et de formes d'alimentation la plus grande (système laitier en zone Vallées, avec la possibilité de donner de l'ensilage et avec des surfaces en maïs) n'ont pas eu besoin de mettre en place autant d'adaptations stratégiques que les autres systèmes (système laitier en zone montagne et système allaitant en Vallées). De plus, le système avec une surcapacité plus grande (système allaitant en Vallées) apparaît comme le système qui tire le mieux parti d'une situation favorable (par un grand nombre de modifications tactiques). Cette stratégie de surcapacité (ou sous-chargement), associée à une organisation du troupeau avec des vêlages groupées en automne permet au système allaitant conçu en Vallées d'être le système le moins affecté par une situation défavorable.

Les différences d'adaptations proposées lors de la conception des scénarios de systèmes dépendent du système de production, du niveau d'exposition mais également des éleveurs réunis autour de la table. En effet, la capacité d'adaptation d'un système piloté dépend, au-delà de la structure et des caractéristiques physiques du système, de la propre capacité d'adaptation du gestionnaire. Marshall et al. (2013) définissent la capacité d'un individu à s'adapter au changement comme sa capacité à convertir les ressources existantes (financières, naturelles, humaines, sociales et physiques) en des stratégies d'adaptations réussies. Ils proposent quatre caractéristiques mesurables de la capacité

d'adaptation d'un individu (1) la gestion du risque et de l'incertitude, (2) les compétences de planification, d'apprentissage et de réorganisation, (3) la flexibilité financière et émotionnelle et (4) l'intérêt pour s'adapter. En effet, lorsqu'un agriculteur est enclin au changement il augmente la plasticité de son système (Rodriguez, *et al.* 2013). En perspective de notre étude, une analyse des systèmes imaginés en fonction des personnalités de ceux qui les ont imaginés permettrait de mieux comprendre les différences dans les adaptations choisies. Par exemple en Vallées, il semblerait que les éleveurs les plus expérimentés dans la gestion d'une exploitation agricole (cf. «compétences de planification, d'apprentissage et de réorganisation») aient proposé plus d'adaptations que les autres. Dans l'objectif d'analyser les liens entre sensibilité et adaptations à mettre en place, il serait également intéressant de comparer des scénarios de systèmes conçus par un même groupe d'éleveurs pour différentes zones (différents niveaux d'exposition) et différents systèmes de production (différentes sensibilités).

4. *Références*

Darnhofer I., Fairweather J. and Moller H. 2010. Assessing a farm's sustainability: insights from resilience thinking. *International Journal of Agricultural Sustainability*, **8**, 186–198, doi:10.3763/ijas.2010.0480.

Déqué M., Dreventon C., Braun A. and Cariolle D. 1994. The ARPEGE/IFS atmosphere model : a contribution to the French community climate modelling. *Climate Dynamics*, **10**, 249–266, doi:10.1007/BF00208992.

Dumont B., Fortun-Lamothe L., Jouven M., Thomas M. and Tichit M. 2013. Prospects from agroecology and industrial ecology for animal production in the 21st century. *Animal*, **7**, 1028–1043, doi:10.1017/S1751731112002418.

Gunderson L.H. 2010. Ecological and Human Community Resilience in Response to Natural. *Ecology And Society*, **15**.

Marshall N. a., Park S., Howden S.M., Dowd A.B. and Jakku E.S. 2013. Climate change awareness is associated with enhanced adaptive capacity. *Agricultural Systems*, **117**, 30–34, doi:10.1016/j.agsy.2013.01.003.

Nozières M.O., Moulin C.-H. and Dedieu B. 2011. The herd, a source of flexibility for livestock farming systems faced with uncertainties? *Animal*, 1–16, doi:10.1017/S1751731111000486.

Pagé C., Terray L. and Boé J. 2008. *Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle: les scénarii SCRATCH08*. Toulouse.

Rodriguez D., Cox H., deVoil P. and Power B. 2013. A participatory whole farm modelling approach to understand impacts and increase preparedness to climate change in Australia. *Agricultural Systems*, doi:10.1016/j.agsy.2013.04.003.

Ten Napel J., van der Veen A. a., Oosting S.J. and Groot Koerkamp P.W.G. 2011. A conceptual approach to design livestock production systems for robustness to enhance sustainability. *Livestock Science*, **139**, 150–160, doi:10.1016/j.livsci.2011.03.007.

Annexe 12 : Synthèse des modifications stratégiques imaginées en atelier face au changement et à la variabilité climatique. Chapitre 5

Stratégie		Laitier_Montagne	Laitier_Vallées	Allaitant_Montagne	Allaitant_Vallées
Dimensionnement	En atelier 1 (adaptation au climat futur moyen)	Augmentation du nombre d'animaux Diminution de la SAU (suppression des estives) Diminution du stock initial –en jours d'avance –	–	–	Diminution du stock initial –en jours d'avance –
	En atelier 2 (par rapport à A1)	Augmentation du nombre d'animaux Diminution du stock initial –en jours d'avance –	Diminution de la SAU (diminution des PT et des céréales) Augmentation du stock initial –en jours d'avance-	Diminution du stock initial –en jours d'avance –	Augmentation de la SAU (augmentation des PT) Diminution du stock initial –en jours d'avance –
Utilisation des sols	En atelier 1 (adaptation au climat futur moyen)	Diminution des PP (suppression des estives)	–	–	Diminution des PP Augmentation des PT Augmentation des céréales
	En atelier 2 (par rapport à A1)	–	Diminution des PT Diminution des céréales	–	Augmentation des PT
Constitution de la ration	En atelier 1 (adaptation au climat futur moyen)	Distribution de foin en été (50% de la ration pendant 2 mois)	100% de foin pour les génisses en été (2 mois)	Distribution de foin en été pour un lot de mères (50% de la ration pendant 1 mois)	Distribution de foin en été aux génisses (100% de la ration pendant 3 mois)
	En atelier 2 (par rapport à A1)	–	–	–	–

Annexe 13 : Synthèse des modifications tactiques imaginées en atelier face au changement et à la variabilité climatique. Chapitre 5

Tactique (1/3)		Laitier_Montagne	Laitier_Vallées	Allaitant_Montagne	Allaitant_Vallées
Constitution de la ration	En atelier 2 (par rapport à A1)		Augmentation de la part de foin dans la ration des génisses (100% de foin quand pas assez d'herbe disponible)	Intégration de paille dans la ration des génisses quand il n'y a plus de foin dans la grange	Intégration de paille dans la ration des mères (30% pendant 2 mois en été).
	En atelier 3 (par rapport à l'A1)	Augmentation de la part de foin dans la ration des génisses (100% de foin quand pas assez d'herbe disponible : 3mois)		Intégration de paille dans la ration de l'ensemble du troupeau quand il n'y a plus de foin dans la grange	

Tactique (2/3)			Laitier_Montagne	Laitier_Vallées	Allaitant_Montagne	Allaitant_Vallées
Gestion des surfaces	En atelier 1 (pour faire face au CC moyen)	Prairies permanentes	Diminution des surfaces pâturées (suppression des estives)	_	Augmentation des surfaces pâturées Diminution des surfaces fauchées – (parcelles déprimées)	Diminution des surfaces pâturées
		Prairies temporaires	_	_	_	Diminution des surfaces pâturées Augmentation des surfaces fauchées – (parcelles déprimées)
		Céréales	_	_	_	
		Dérobées	_	Augmentation des dérobées Diversification des dérobées	_	_
	En atelier 2 (par rapport à l'A1)	Prairies permanentes	Diminution des surfaces pâturées Augmentation des surfaces fauchées (déprimées)	_	_	Diminution des surfaces fauchées Augmentation des surfaces pâturées
		Prairies temporaires	_	_	_	Diminution des surfaces fauchées Augmentation des surfaces pâturées
		Céréales	_	_	_	_
		Dérobées	_	-	_	Mise en place de dérobées
	En atelier 3(par rapport à l'A1)	Prairies permanentes	Diminution des surfaces fauchées Augmentation des surfaces pâturées	Diminution des surfaces pâturées Augmentation des surfaces fauchées	_	_
		Prairies temporaires	_	_	_	_
		Céréales	_	_	_	_
		Dérobées	_	-	Mise en place de dérobées	Mise en place de dérobées

Tactique (3/3)			Laitier_Montagne	Laitier_Vallées	Allaitant_Montagne	Allaitant_Vallées
Gestion du pâturage	En atelier 1 (adaptation au climat futur moyen)	Date de pâturage	Mise à l'herbe plus précoce	Mise à l'herbe plus précoce		Mise à l'herbe plus précoce
		Allocation des lots		arrêt du pâturage des génisses en été	pâturage plus tardif des génisses pâturage plus tardif du second lot de mères	pâturage plus tardif des génisses
	En atelier 2 (par rapport à A1)	Date de pâturage	Mise à l'herbe plus précoce	Mise à l'herbe plus précoce Arrêt de pâturage plus tardif	Mise à l'herbe plus précoce	Mise à l'herbe plus tardive
		Utilisation des surfaces	Déprimage des PP	Pâturage des dérobées en été-automne Pâturage des PT après leur fauche	Déprimage des PP Pas de pâturage des PT de fauche Diminution du chargement sur les PP de fauche	Pâturage des dérobées en été-automne Pas de pâturage des PP de fauche
		Calendrier de pâturage	Décalage des mises à l'herbe : mères en priorité	Arrêt momentané du pâturage des mères en été Pâturage des génisses continu entre mise à l'herbe et retour définitif à l'étable	Décalage des mises à l'herbe : génisses et lot 2 de mères en priorité. Décalage des fins de pâturage : en 1er : les mères lot 1 sur PP pat, en 2 : génisses sur PP pat, et en 3 mères lot2 sur PP fauche	Pâturage des génisses continu sur l'année Fin de pâturage plus tardif pour les mères
		Répartition des lots sur les métaparcelles		Pâturage des PP exclusivement par les génisses Pâturage des PT et des dérobées exclusivement par les mères		Pâturage des PT pâturées exclusivement par les génisses
	En atelier 3 (**par rapport à l'A1**)	Date de pâturage	Mise à l'herbe plus précoce	Mise à l'herbe plus précoce	Mise à l'herbe plus précoce	Mise à l'herbe plus tardive Arrêt de pâturage plus tardif pour les mères
		Utilisation des surfaces	Pas de pâturage des PP fauchées après leur fauche	Pâturage des PP fauchées après fauche Déprimage des PP de fauche Pâturage des dérobées en été-automne	Déprimage des PP de fauche Diminution du chargement des PP pat au printemps Diminution du chargement des PP pat en automne Diminution du chargement des PP fauchées en automne Diminution du chargement des PT fauchées en automne Pâturage de dérobées en automne	Pas de déprimage des PP fauchées
		Calendrier de pâturage	Fin de pâturage simultané pour mères et génisses (en AT1 : mères pâturent plus longtemps) Décalage des mises à l'herbe avec les mères en priorité au pâturage	Décalage des mises à l'herbe avec les génisses en priorité au pâturage	Arrêt momentané du pâturage des génisses au printemps	
		Répartition des lots sur les métaparcelles		Pâturage des dérobées exclusivement par génisses		Pâturage des génisses continu sur l'année Pâturage exclusif des PP de fauche par les génisses Pâturage exclusif des PT pat par les mères

Titre de la thèse : Outiller l'adaptation des élevages herbagers au changement climatique : de l'analyse de la vulnérabilité à la conception participative de systèmes d'élevage

Auteur : Marion SAUTIER

Directeurs de thèse : Michel DURU et Roger MARTIN-CLOUAIRE

Résumé

Les systèmes de production agricole sont exposés au changement climatique dès lors qu'ils mobilisent des ressources dépendantes du climat. L'enjeu pour la communauté scientifique est de produire des connaissances permettant aux praticiens d'anticiper les effets du changement climatique sur leur système, et d'élaborer des méthodes et outils pour s'y adapter. Les systèmes d'élevage herbagers sont particulièrement concernés par le changement climatique étant donné qu'ils dépendent de la ressource fourragère, dont la saisonnalité et la productivité sont fortement liées au climat. Leur adaptation au changement climatique nécessite d'anticiper les tendances et la variabilité interannuelle. L'objectif de la thèse est de proposer une analyse de la vulnérabilité des systèmes d'élevage herbagers au changement et à la variabilité climatiques, ainsi qu'une méthode de conception de ces systèmes. La thèse repose sur la spécification et l'application du cadre de la vulnérabilité à l'échelle de l'exploitation d'élevage, et la mise en œuvre d'une méthode de conception participative. La démarche d'ensemble articule la représentation de l'exposition au climat en lien avec les contraintes de gestion des élevages, l'analyse rétrospective des dynamiques des élevages et la construction participative de systèmes d'élevage moins vulnérables au changement et à la variabilité climatiques. Nous avons mis en œuvre cette démarche sur les élevages du Sud-Ouest de la France. Nous avons mis en évidence que ces élevages, bien qu'exposés à l'évolution de la saisonnalité de la production herbagère et des types d'années fourragères les plus fréquents, disposent de capacités d'adaptation structurelles et organisationnelles suffisantes pour faire face au changement climatique à horizon 2085. Nous avons également identifié les caractéristiques des exploitations les plus sensibles et les adaptations les plus efficaces face à la variabilité climatique. Outre son intérêt pour comprendre et réduire la vulnérabilité des élevages herbagers à la variabilité et au changement climatiques, cette méthodologie à la fois réflexive et interactive pourrait être utilisée pour communiquer auprès des éleveurs et des organismes de développement agricole sur le changement climatique, ses effets et les adaptations possibles des élevages.

Thesis title: Enhancing adaptation of grassland-based livestock systems to climate change and variability: from vulnerability assessment to participatory design of systems

Abstract

Agricultural systems are exposed to climate change since they use climate-dependent resources. The current challenge for research is to produce knowledge, methods and tools to help farmers to anticipate and to cope with the effects of climate change on their systems. Climate change influences fodder production in seasonality and productivity and thus grassland-based livestock systems. The adaptation of those systems to climate change requires anticipating trends and inter-annual variability. The aim of this thesis is to propose a vulnerability assessment of grassland-based livestock systems to climate variability and climate change, and a method to design such systems. The thesis specifies and implements the vulnerability framework to livestock systems and develops a participatory design method. The whole approach articulates the representation of climate exposure in relation with management constraints of livestock systems, the retrospective analysis of livestock farms dynamics and the participatory design of grassland-based livestock systems that are less vulnerable to climate variability and change. We implemented this approach on cattle systems in South-West France. We have demonstrated that those cattle systems will be exposed to a change in the seasonality of grassland production and in the most frequent forage years. However, they have enough structural and organizational capacities to cope with climate change by 2085. We also identified sensitivity sources to extreme climatic events and the most efficient adaptations to cope with it. This approach helps to understand and reduce the vulnerability of grassland-based livestock systems to climate variability and change. In addition, this interactive and reflexive approach is an opportunity to make farmers and rural development actors aware of climate change, its consequences and the possible adaptations of livestock systems.