

# **Caractérisation du changement et de la variabilité climatique**

## **en vue de l'adaptation des systèmes fourragers à base d'herbe**

M. Sautier<sup>1</sup>, R. Martin Clouaire<sup>2</sup>, M. Duru<sup>1</sup>

1 : INRA, UMR 1248 AGIR, F-31326 Castanet-Tolosan ; michel.duru@toulouse.inra.fr

2 : INRA, UR875 BIA, F-31326 Castanet-Tolosan

### **Résumé**

Pour évaluer la variabilité climatique entre années, de même que pour prévoir l'ampleur des changements attendus afin d'adapter les systèmes d'élevage au changement climatique, une première étape est de définir des indicateurs d'exposition. A cette fin, nous proposons des indicateurs spécifiques aux systèmes d'élevage herbagers portant sur les limites des saisons fourragères (printemps occasionnant des surplus récoltés, hiver nécessitant des distributions, été - automne pouvant combiner surplus et distributions) et l'ampleur des surplus ou manques en fourrages par rapport à une alimentation au pâturage. Ces indicateurs sont mobilisés pour mettre au point deux méthodes génériques de caractérisation des années selon l'amplitude des écarts à la moyenne à l'échelle de la saison. Ces méthodes permettent de définir de manière quantitative des types de saisons et d'années fourragères, de normales à exceptionnelles, et d'en calculer la fréquence pour les climats passé et futur. Elles sont illustrées pour 3 sites du sud ouest de la France et pour deux séries climatiques (1980-2010 ; 2035-2065). Par les unités utilisées (surplus au pâturage ou besoins en fourrage exprimés en jours par animal ; écart type), elles se prêtent à une utilisation avec des éleveurs pour traiter de l'adaptation de leur système fourrager à la variabilité et au changement climatiques.

## Introduction

Le climat est un facteur déterminant de la productivité agricole. L'adaptation des systèmes agricoles au changement climatique nécessite d'anticiper les tendances, la variabilité interannuelle, ainsi que la probabilité de situations extrêmes (SMIT et WANDEL, 2006). L'élaboration d'options d'adaptation au niveau des exploitations est une tâche complexe qui nécessite d'abord une évaluation appropriée de l'impact potentiel des conditions climatiques actuelles et prévues dans la région d'intérêt. Les indicateurs d'exposition au climat (FÜSSEL et KLEIN, 2006) peuvent être utilisés à cette fin, à condition qu'ils soient conçus pour bien s'adapter aux représentations que se font les agriculteurs des phénomènes concernés (MEINKE *et al.*, 2009). En agriculture, CRANE *et al.* (2011) ont souligné que les indicateurs fondés sur des modèles peuvent amener de la confusion ou sont inutiles pour des agriculteurs s'ils ne tiennent pas compte des réalités complexes en jeu dans la gestion d'un système de production agricole. Les agriculteurs perçoivent avant tout les risques qui pèsent sur leurs systèmes de production, contrairement aux climatologues qui mettent l'accent sur les dimensions physiques et naturelles (HULME *et al.*, 2009). Grâce à leurs expériences et à leurs souvenirs, les agriculteurs peuvent construire des catégories implicites de situations « normales » ou « anormales ». Cependant, le plus souvent, la mémoire du temps passé est biaisée par des « extrêmes » ou des épisodes exceptionnels, comme la sécheresse de 2003 en Europe (CIAIS *et al.*, 2005), qui limitent la portée des méthodologies basées uniquement sur des enquêtes.

Les systèmes d'élevage, en particulier ceux pour lesquels l'alimentation des herbivores est basée sur des prairies, sont très vulnérables à la variabilité ainsi qu'au changement climatique (HOPKINS et DEL PRADO, 2007). Ces systèmes n'ont pas la possibilité de cultiver des plantes fourragères annuelles (notamment irriguées), des cultures à double fin (par exemple le maïs pour le grain ou ensilage) ou des cultures dérobées pour faire face à la variabilité interannuelle du climat. Ils ne peuvent pas non plus changer d'espèces ou de variétés pour faire face au changement climatique si leur système est basé sur des prairies permanentes. En régions tempérées et dans ces systèmes, l'impact des tendances et de la variabilité climatiques sur les systèmes d'alimentation peut être évalué par : (i) les dates et les périodes au cours desquelles le pâturage est suffisant pour nourrir le troupeau et celles au cours desquelles l'affouragement est nécessaire, (ii) le surplus de fourrage récoltable en foin ou ensilage, et l'importance de l'affouragement. En conséquence, les indicateurs d'exposition doivent être déterminés à l'échelle saisonnière. Ce grain d'analyse est rarement considéré dans la recherche appliquée qui se focalise sur la production annuelle. Quand le niveau de la saison est considéré, c'est avec des hypothèses peu réalistes comme des dates fixes prédéterminées (par exemple GRAUX *et al.*, 2012a) ou en recourant à des approches à dire d'expert difficilement généralisables (CHAPMAN *et al.*, 2008). En outre, la variabilité interannuelle et l'alternance d'épisodes météorologiques favorables et défavorables devraient être pris en compte car l'exposition dépend tout autant de la succession de deux ou plusieurs événements défavorables que d'un seul événement extrême (CHARPENTEAU et DURU, 1983 ; GIBBONS et RAMSDEN, 2008).

L'utilisation d'indicateurs d'exposition dans le cadre d'études locales (par exemple MCCRUM *et al.*, 2009) vise à montrer aux agriculteurs les évolutions prévues du climat, de façon à faciliter leur apprentissage et ainsi concevoir des systèmes fourragers adaptés au changement climatique. En effet, les agriculteurs ont peu de points de repère pour situer les conditions climatiques futures par rapport aux expériences qu'ils ont connues. Tout au plus, ils ont entendu parler de certains scénarios de changement globaux, mais sans contextualisation régionale (ZHANG *et al.*, 2007). En outre, ces scénarios ne traitent pas explicitement de la variabilité climatique alors qu'elle est considérée par la plupart des agriculteurs comme étant plus problématique que le changement moyen (DURU *et al.*, 2012 ; PANNEL, 2010). Les indicateurs d'exposition doivent donc être « formatés » de façon à constituer des supports informatifs fondés scientifiquement et faisant sens pour les utilisateurs.

A cette fin, nous avons développé **des indicateurs spécifiques aux systèmes herbagers pour caractériser leur exposition en tenant compte de la temporalité de la production d'herbe et de la quantité en surplus et en déficit au pâturage** (SAUTIER *et al.*, 2012). Ces indicateurs permettent d'examiner au grain de la saison s'il y a eu une tendance d'évolution de l'exposition au cours des dernières années (par exemple accroissement du déficit estival) et d'identifier les impacts attendus pour le climat futur. Nous avons ainsi montré que, bien qu'il y ait eu une augmentation significative des températures et de l'évapotranspiration au cours des trois dernières décennies, il n'y a pas eu dégradation des indicateurs d'exposition. A moyen terme (années 2035-2065), en considérant le

scénario A1B du GIEC, il est attendu des effets positifs ou négatifs sur la production de biomasse selon les régions, mais surtout une augmentation des contrastes entre saisons (SAUTIER *et al.*, 2012). Toutefois, ces indicateurs d'exposition basés sur la temporalité et la durée des saisons fourragères et sur le bilan fourrager saisonnier doivent être complétés pour **caractériser de manière quantitative, synthétique et générique des « années fourragères »** permettant d'aller au-delà d'une classification entre années normales et exceptionnelles.

L'objectif de cet article est de mettre au point et d'illustrer deux méthodes de caractérisation des années fourragères basées, l'une sur des profils saisonniers de surplus ou de déficit au pâturage, l'autre sur l'écart à la moyenne du surplus ou du déficit à l'échelle de la saison. La section 1 résume la façon dont les indicateurs d'exposition ont été calculés, puis comment ils ont été mobilisés dans chacune des méthodes. Les résultats de trois sites de Midi-Pyrénées sont présentés dans la section 2. Enfin, l'intérêt de ces méthodes est examiné pour la définition d'adaptation de systèmes d'élevage herbagers au changement et à la variabilité climatique.

## 1. Matériel et méthodes

### 1.1. Définition des indicateurs d'exposition

Nous reprenons les indicateurs d'exposition spécifiques aux systèmes d'élevages herbagers que nous avons définis dans un article précédent (SAUTIER *et al.*, 2012). Il s'agit des **dates de début de printemps, d'été-automne et d'hiver** ( $D_{\text{print}}$ ,  $D_{\text{été-aut}}$ ,  $D_{\text{hiv}}$ ) et des **soldes d'herbe au pâturage pour chacune de ces saisons** ( $S_{\text{print}}$ ,  $S_{\text{été-aut}}$ ,  $S_{\text{hiv}}$ ).

Les six indicateurs sont définis à partir de la quantité moyenne d'herbe disponible ( $Q_{\text{herbe}}$ ), qui est la moyenne de la croissance journalière de l'herbe ( $V_j$ ) sur  $n$  années (Equation 1) pour une période et un lieu donnés.  $Q_{\text{herbe}}$  correspond, pour un système équilibré, aux besoins journaliers d'un lot d'animaux (besoins considérés comme constants).  $V_j$  peut être calculée à partir de tout modèle de simulation de croissance de l'herbe qui prenne en compte la composition de la prairie et la défoliation (suite au pâturage et aux fauches). Dans cette étude, la croissance journalière de l'herbe est simulée par le modèle Herb'sim (DURU *et al.*, 2009).

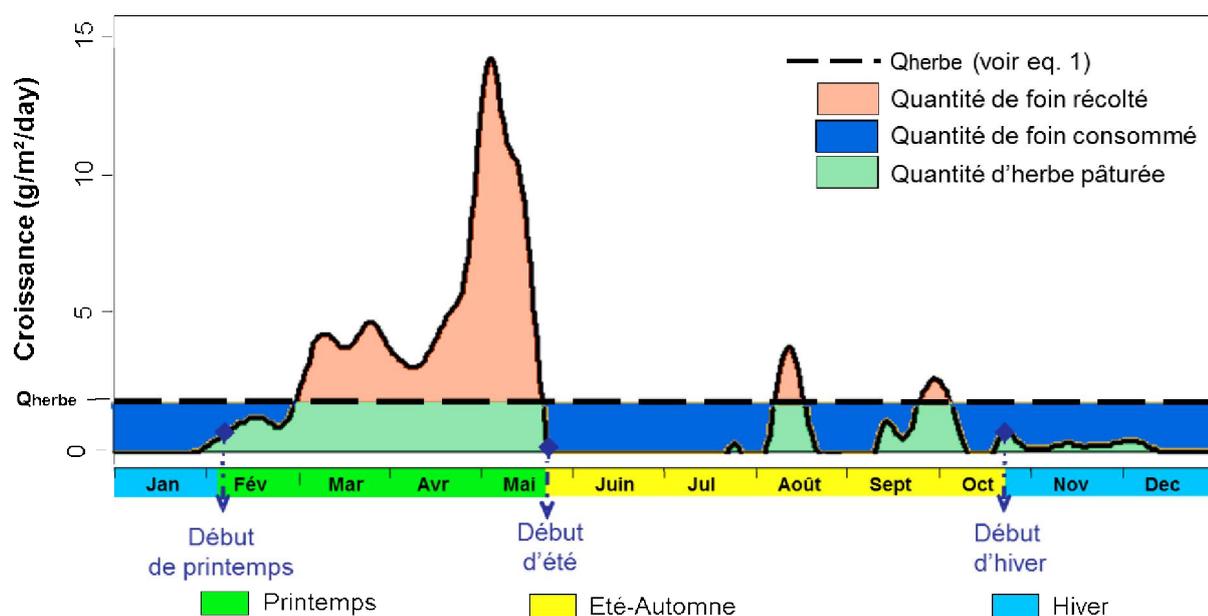
$$Q_{\text{herbe}} = \frac{\sum_{an=1}^n \sum_{jour=1}^{\text{durée}(an)} V_j(\text{jour})}{\sum_{an=1}^n \text{durée}(an)} \quad (1)$$

avec  $n$  les nombre d'années de la période entière et *jour* le jour julien.

**Une année se compose de trois saisons fourragères** appelées printemps, été-automne et hiver (Figure 1). Le début de printemps ( $D_{\text{print}}$ ) correspond à la mise à l'herbe. Etant donné que la croissance de l'herbe en automne est très variable d'une année à l'autre, il n'est pas possible d'établir une règle générique de détermination du début d'automne à partir de la croissance journalière. L'été et l'automne sont donc agrégés dans la saison été-automne. Le début d'été-automne ( $D_{\text{été-aut}}$ ) est le premier jour pour lequel le plein pâturage n'est plus possible après le pic de printemps. L'hiver débute lorsque le pâturage s'arrête ( $D_{\text{hiv}}$ ) et finit lorsque le printemps suivant commence. Les dates de début et d'arrêt de pâturage ont été calculées à partir de la vitesse de croissance de l'herbe, des seuils étant définis à dire d'expert (SAUTIER *et al.*, 2012).

Le **solde** ( $S_{\text{sais}}$ ) **entre l'herbe disponible au pâturage et les besoins** du lot est la somme des différences entre  $V_j$  et  $Q_{\text{herbe}}$  sur toute la durée de la saison.  $S_{\text{sais}}$  est soit positif dans le cas d'un excédent d'herbe, soit négatif dans le cas d'un déficit d'herbe. L'excédent ou le déficit au pâturage peut être exprimé en « nombre de jours d'alimentation », ce qui permet de comparer facilement l'exposition climatique en différentes localités. Un jour d'alimentation correspond à la quantité de fourrages nécessaire à l'alimentation du troupeau sur une journée par unité de surface, ce qui est égal à  $Q_{\text{herbe}}$  dans un système où ressources et besoins sont équivalents sur plusieurs années (30 ans ici).

**FIGURE 1 – Détermination des dates de début de saison et de l'excédent ou déficit au pâturage à partir du profil de croissance de l'herbe.**



## 1.2. Indicateurs pour typer les années fourragères au grain de la saison

Pour donner une vue d'ensemble de la variabilité interannuelle des deux types d'indicateurs d'exposition (quantité et date), nous avons représenté simultanément la limite des saisons et le bilan fourrager (déficit ou excédent par rapport à une alimentation au pâturage). Ensuite, deux méthodes ont été utilisées pour « typer » les années.

Le plus souvent, l'analyse de la variabilité des conditions saisonnières pour la croissance de l'herbe se fait de manière empirique, en regroupant et en analysant la répartition (fréquence) des années ou des saisons ayant des profils similaires, par exemple « printemps précoce vs tardif ; année bonne vs mauvaise » (CHAPMAN *et al.*, 2008). Dans cet article, nous avons défini des **types d'années** en regroupant les années à partir d'une classification ascendante hiérarchique sur la base des critères d'exposition les plus variables. Un nombre identique de classes (8) a été retenu quelle que soit la localisation, en considérant simultanément les années passées et futures, de façon à examiner les changements de fréquences entre types d'années pour les deux périodes (passé et futur).

Les études sur le changement climatique utilisent souvent l'écart type ( $\sigma$ ) comme métrique pour caractériser la variabilité interannuelle et détecter des années exceptionnelles sur la base d'une comparaison à une distribution normale (HANSEN *et al.*, 2012). Dans le cas présent, la **moyenne et l'écart type des valeurs de l'indicateur d'exposition** sur la période passée nous servent de référence pour caractériser chaque année, du passé comme du futur. Pour chacun des indicateurs de bilan fourrager saisonnier, on calcule le nombre d'écarts types entre la valeur de l'année  $i$  et la moyenne calculée pour le passé. Pour le futur, le même calcul est fait en considérant la valeur moyenne et l'écart type du passé. Ainsi, pour chaque saison, 7 classes sont définies :

- $]-\sigma, \sigma[$  : la valeur de l'année  $i$  se situe dans l'intervalle de la valeur du passé ;
- $]-4\sigma, -3\sigma[$  ;  $]-3\sigma, -2\sigma[$  ;  $]-2\sigma, -\sigma[$  : la valeur de l'année est comprise dans un intervalle correspondant à -2, -3 ou -4 fois l'intervalle de la moyenne du passé ;
- $[\sigma, 2\sigma[$  ;  $[2\sigma, 3\sigma[$  ;  $[3\sigma, 4\sigma[$  : la valeur de l'année est comprise dans un intervalle correspondant à +2, +3 ou +4 fois l'intervalle de la moyenne du passé.

Les valeurs sont négatives ou positives selon que le bilan fourrager saisonnier est supérieur ou inférieur à la moyenne.

### 1.3. Cas d'étude

Les indicateurs ont été calculés pour **trois sites de la région Midi-Pyrénées**, qui présentent de fortes différences climatiques sur une faible distance, et en conséquence des potentiels herbagers contrastés (Tableau 1) :

- Aulus, situé dans les montagnes des Pyrénées (Ariège). Les exploitations agricoles sont des systèmes de production de bovins viande sur la base de prairies semi-naturelles et pratiquent la transhumance en été.

- Saint-Girons, situé dans le piémont pyrénéen (Ariège). Il s'agit d'élevages allaitants et laitiers basés sur les prairies (par exemple des mélanges graminées-légumineuses) et des cultures fourragères (maïs ensilage, par exemple).

- Toulouse (Haute-Garonne), situé dans la vallée de la Garonne, a été utilisé comme référence pour comparer son climat actuel à celui de Saint-Girons entre 2035 et 2065 (*i. e.* en 2050 en moyenne).

**TABLEAU 1 – Localisation des 3 sites d'étude et indice d'aridité** de DE MARTONNE (mm/°C).

Site	Altitude (m)	Latitude	Longitude	Zone biogéographique*	Indice d'aridité pour la période :	
					1980-2010 (année 2003)	2035-2065
Aulus	733	42° 47N	1° 20E	Montagne méditerranéenne	82 (80)	55
Saint-Girons	414	44° 49N	1° 23E	Méditerranée Nord	43 (37)	26
Toulouse	150	43° 36N	1° 26E	Océanique/ Méditerranée Nord	27 (21)	19

\* d'après METZGER *et al.*, 2005

Les données climatiques sont les données mesurées pour la période du passé (1980-2010) et les données simulées pour la période future (2035-2065) en ayant pris soin d'apparier une maille de 8 x 8 km à une station météorologique. Dans le Tableau 1 sont indiquées les coordonnées et la zone biogéographiques, ainsi que l'indice d'aridité de DE MARTONNE (1926). L'indice d'aridité est calculé sur les périodes 1980-2011 et 2035-2065

Sur la base des indices de DE MARTONNE, nous pouvons :

- comparer le climat futur prévu sur un site d'altitude au climat passé d'un site situé plus bas : par exemple, nous avons observé que le climat futur de Saint-Girons est très proche de celui du passé à Toulouse, et en partie le climat prévu pour le futur à Aulus est proche de celui du passé à Saint-Girons ;

- considérer qu'une année du passé exceptionnelle (par exemple 2003) correspond à la moyenne prévue pour le futur : nous avons ainsi observé que l'année 2003, classée comme extrême à Toulouse selon l'indice de DE MARTONNE, est proche de ce qui est attendu en moyenne pour le climat futur.

## 2. Résultats

### 2.1. Variabilité interannuelle des indicateurs saisonniers d'exposition pour les périodes passées et futures

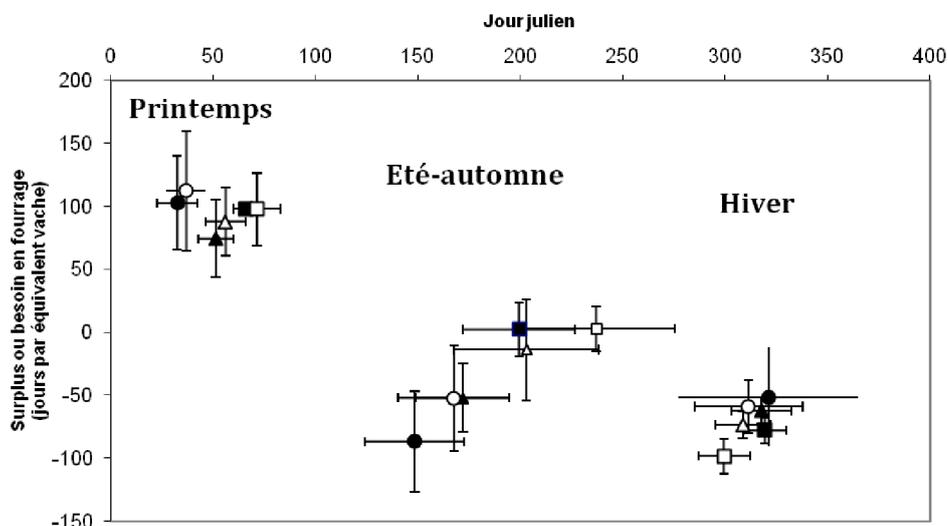
Le même profil de données (date de début de saison fourragères et bilan fourrager au niveau saison) est observé pour les trois sites (Figure 2).

Au cours des 30 dernières années, on observe que :

- pour le printemps, la variabilité sur 30 ans est plus faible pour la date que pour l'excédent herbe ;  
- pour l'été et l'automne, la variabilité d'une année à l'autre de la date de début est supérieure à la variabilité du manque ou du surplus herbe ;

- la date de début d'hiver et le manque d'herbe sont significativement corrélés, ce qui signifie que la longueur de l'hiver est surtout fonction de la date de début ; en conséquence, l'une ou l'autre variable peut être utilisée pour une analyse plus approfondie.

**FIGURE 2 – Moyennes et écarts types par saison du surplus au pâturage (valeurs positives) ou du besoin en fourrages distribués (valeurs négatives) et des dates de début de saison. Symboles blancs : climat passé (1980-2011) et noirs : climat futur (2035-2065). Aulus (carré), Saint-Girons (triangle), Toulouse (rond).**



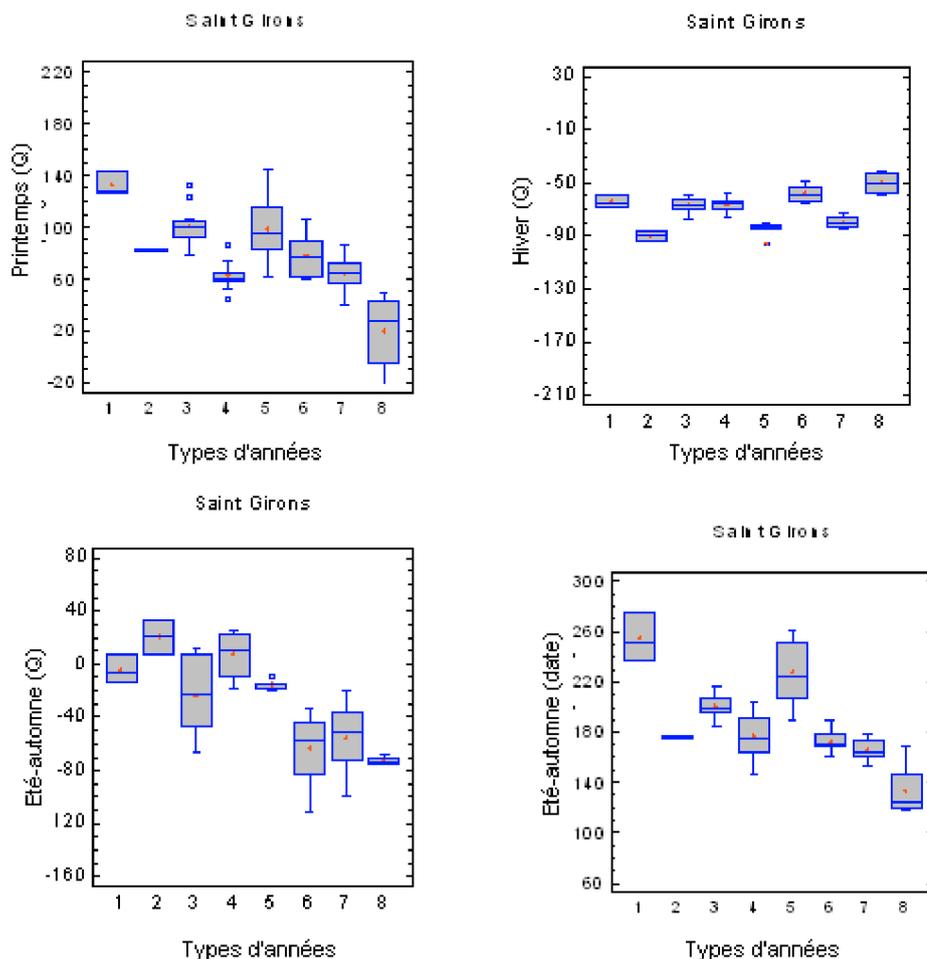
Les principales différences entre les séries climatiques passée et futures sont un été et une fin d'hiver plus précoces et, dans une moindre mesure, un moindre surplus ou un plus grand déficit en été. Les principales différences entre les sites, tant pour les climats passé que futur sont : (i) pour l'été, déficit faible à Aulus et élevé à Toulouse, (ii) contraste entre printemps et été, faible à Aulus et élevé à Toulouse, (iii) différence d'équilibre entre printemps et hiver, faible à Toulouse et élevé à Aulus.

## 2.2. Classification des années fourragères en fonction des profils de bilan fourrager par saison

Sur la base des résultats ci-dessus, le regroupement d'années a été fait par classification ascendante hiérarchique pour les 4 critères les plus variables soit le solde d'herbe aux 3 saisons et la date à laquelle a commencé l'été (*i.e.* la distribution de fourrages). Pour déterminer rapidement lequel des 4 critères pèse le plus sur la production annuelle d'herbe, nous avons classé les années fourragères de 1 à 8 selon un niveau de production annuel décroissant. L'observation visuelle (données présentées Figure 3 uniquement pour Saint-Girons) montre un lien entre la production annuelle et : (i) l'excédent d'herbe au printemps (3 sites), (ii) le début de l'été (Saint-Girons et Toulouse), (iii) le solde d'herbe en été (Saint-Girons). Cela signifie que, pour Saint-Girons, une « bonne année fourragère » a correspondu à la fois à un printemps et à un été favorables.

L'indicateur le plus variable entre les types d'années fourragères est le **contraste des niveaux de production entre le printemps et l'été-automne**, sauf à Aulus. Une grande variabilité a été observée à Toulouse en hiver en raison d'une forte variabilité dans la date de début. Une analyse de variance réalisée pour chacun des 4 critères, en considérant le type d'années comme facteur, montre que, selon le site et la saison considérés, 2 à 5 des 8 types d'années fourragères sont significativement différents (Tableau 2). En outre, 3 à 4 des 8 types d'années diffèrent significativement pour au moins 3 des 4 critères.

**FIGURE 3 – Médianes (lignes), inter-quartile (boîtes), valeurs moyennes (points intra boîte) et valeurs extrêmes (points extra boîte) du bilan fourrager saisonnier à 3 saisons et dates du début de l'été pour 8 types d'années climatiques à Saint-Girons.** Les 8 types d'années ont été ordonnés en fonction des valeurs décroissantes de production d'herbe à l'échelle de l'année. Les valeurs en ordonnée sont exprimées en jours d'alimentation (bilan aux 3 saisons) ou date de début de l'été (jour julien) avec une gamme de variation identique quel que soit le critère afin de faciliter les comparaisons.



**TABEAU 2 – Caractérisation des années fourragères significativement différentes pour la combinaison des critères.**

	Nombre de types d'années significativement différents pour l'indicateur				Numéro (et nombre/8*) de types d'années significativement différents pour au moins 3 des 4 critères
	début d'été	bilan au printemps	bilan en été-automne	bilan en hiver	
Aulus	3	4	4	2	4, 5, 6, 7 (4)
Saint-Girons	5	3	3	3	1, 2, 8 (3)
Toulouse	4	3	2	3	1, 2, 5 (3)

\* : les types d'années sont classés de 1 à 8 par site selon les valeurs moyennes décroissantes de production de biomasse à l'échelle de l'année

Pour les types d'années avec des productions annuelles similaires, soit deux classes consécutives (i, i + 1) sur la Figure 3, on observe des différences à l'échelle de la saison. Par exemple à Aulus (non montré), le couple « bon » printemps et « mauvais » été du type d'années 4 s'oppose au couple « mauvais » printemps et « bon » été du type d'années 5 (idem pour les types 2 et 3 à Toulouse, non montré). L'inverse a été observé à Saint-Girons pour les types d'années 4 et 5 (Figure 3).

Trois à quatre types d'années fourragères ont chacun une fréquence supérieure à 12,5 %, seuil correspondant à une situation d'équiprobabilité entre classes. Ces 3 (ou 4) types d'années fourragères les plus fréquentes représentent entre 71 et 77 % des années des séries climatiques passées et entre 65 et 80 % des années futures. Pour chacun des sites, il existe un type d'année fourragère très fréquent à la fois dans le passé et dans le futur ( $f > 16\%$ ) : type 6 à Aulus, 3 à Saint-Girons et 2 à Toulouse, Tableau 3). **Certains types fréquents dans le passé ne sont pas observés ou peu fréquents dans le futur** (par exemple types 2 et 8 à Aulus, 6 et 8 à Saint-Girons, 3 à Toulouse). **L'inverse est observé** pour les types 3 à Aulus, 5 à Saint-Girons et 6 à Toulouse (Tableau 3).

**TABLEAU 3 – Pourcentage de types d'années fourragères par site et série climatique** ; les types sont ordonnés pour chaque site en fonction d'un niveau décroissant de production de biomasse à l'échelle de l'année.

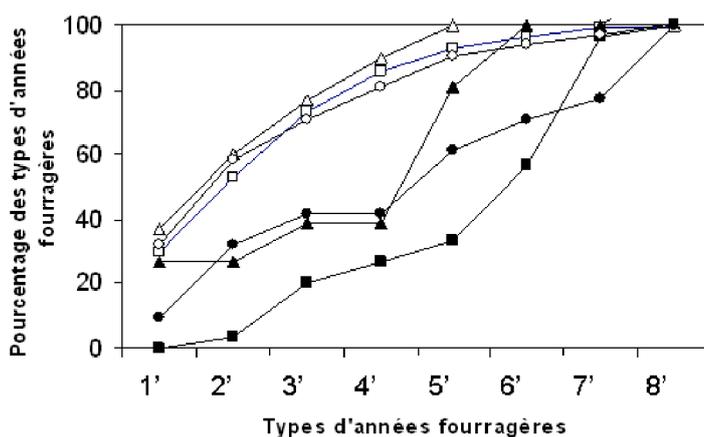
Type d'année	Aulus		Saint-Girons		Toulouse	
	Passé	Futur	Passé	Futur	Passé	Futur
1	7	7	0	10	10	0
2	23	3	0	6	<b>32</b>	<b>23</b>
3	3	23	<b>23</b>	<b>23</b>	26	0
4	13	7	10	19	3	7
5	3	40	0	23	10	20
6	<b>20</b>	<b>17</b>	37	10	13	30
7	0	3	17	10	3	17
8	30	0	13	0	3	3

En gras: valeurs  $\geq 12,5\%$  (équiprobabilité de chacun des 8 types), à la fois pour le passé et le futur

De manière schématique, la fréquence d'années à forte production annuelle de biomasse (types 1 et 2) décroît à Aulus et Toulouse, mais augmente à Saint-Girons, et celle à faible production de biomasse (types 7 et 8) décroît à Aulus et Saint-Girons mais augmente à Toulouse. Pour le passé tout autant que pour le futur, il y a au moins 2 types dont la fréquence est supérieure à 18 % (Tableau 3). Cela signifie qu'il **n'est pas possible de définir un seul type d'année « normale »**. Ainsi, 3 types d'années fourragères sont au moins observables à une fréquence de 17 % tant pour le passé que pour le futur, excepté pour le passé à Toulouse, où seulement deux types dépassent cette fréquence. L'année 2003 à Toulouse correspond au type 8 (Tableau 3), qui se caractérise simultanément par un faible excédent d'herbe au printemps, cumulé à un déficit en été plus élevé et survenant plus tôt. Seule une année du climat futur appartient à ce type.

Après ré-ordonnancement des types d'années en fonction d'une fréquence décroissante (types notés x' sur la Figure 4), on observe clairement un changement des types d'années fourragères dominants entre les climats passé et futur. Quelle que soit la localisation, **les trois types d'années les**

**FIGURE 4 – Fréquence cumulée des types d'années fourragères pour le climat passé (symboles blancs) ou futur (symboles noirs).** Les types d'années (1', 2' ....) sont classés en fonction de leur fréquence décroissante pour le climat passé pour chaque site : Aulus (carré), Saint-Girons (triangle) et Toulouse (cercle).



plus fréquents dans le passé qui représentent plus de 71 à 77 % des cas, ne représentent plus que 20 à 53 % des cas pour le futur (Tableau 3). Le plus grand changement dans le type année est observé à Aulus (plus grande différence entre les courbes correspondant aux périodes passée et future sur la Figure 4).

### 2.3. Caractérisation des années fourragères par l'ampleur de l'écart à la moyenne au grain de la saison

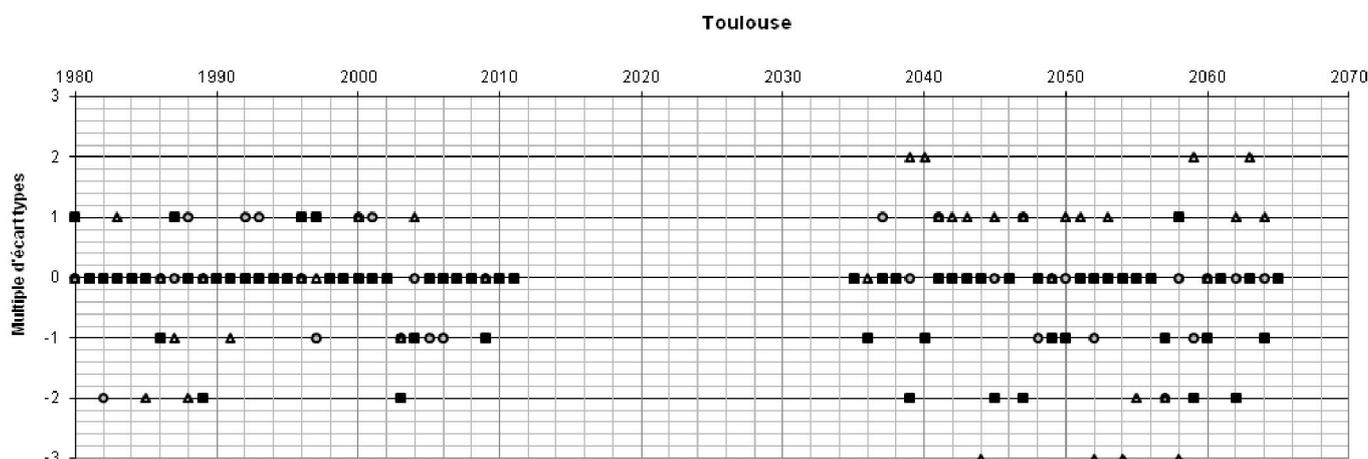
La comparaison du nombre d'écart types entre la valeur de l'indicateur une année donnée et sa valeur moyenne du passé montre une augmentation des événements dits « extrêmes » pour le climat futur par rapport au passé (voir Figure 5 à Toulouse à titre d'exemple). La fréquence des années à plus de 2 écart types passe de 7 % dans le passé à 18 % dans le futur pour Aulus, de 12 à 17 % pour Saint-Girons et de 3 à 11 % pour Toulouse (Tableau 4). Les années avec des valeurs supérieures à  $3\sigma$  sont rares dans le passé (3 % à Saint-Girons), à la différence du futur où elles représentent 4, 6 et 8 % des années à Aulus, Saint-Girons et Toulouse respectivement.

Un décalage entre les séries climatiques du passé et du futur apparaît clairement en comparant la distribution des années selon les différentes classes d'écart types. Entre les données passées et les simulations futures, la fréquence des années fourragères correspondant à plus de  $\pm 1\sigma$  augmente (i.e. éloignées de la moyenne) (Tableau 4). En outre, la fréquence des années fourragères où l'amplitude de variation atteint  $]-4\sigma, -2\sigma[$  ou  $[2\sigma, 4\sigma[$  augmente de près de 50 % (Saint-Girons) ou triple (Toulouse) entre le passé et le futur. Les données de la Figure 5 montrent pour le futur des écarts types en général positifs pour l'hiver et négatifs pour l'été-automne.

**TABLEAU 4 – Fréquence des types d'années (%) selon le nombre d'écart types séparant la valeur de l'indicateur d'une année de la moyenne ; pour chaque année, sont considérés simultanément les indicateurs des 3 saisons.**

Multiple d'écart types ( $\sigma$ )	Passé			Futur		
	Aulus	Saint-Girons	Toulouse	Aulus	Saint-Girons	Toulouse
$]-1\sigma, 1\sigma[$	72	69	80	50	52	69
$]-4\sigma, -2\sigma]$	1	6	3	6	9	7
$[2\sigma, 4\sigma[$	6	6	0	12	8	4

**FIGURE 5 – Nombre d'écart types ( $\sigma$ ) à l'échelle de la saison (printemps : cercle, été-automne : carré, hiver : triangle) pour les climats passé et futur à Toulouse. Pour le climat futur, le nombre d'écart-types est déterminé en considérant la valeur moyenne du passé. En ordonnée, les nombres signifient : 0 :  $]-\sigma, \sigma[$  ; 1 :  $[\sigma, 2\sigma[$  ; 2 :  $[2\sigma, 3\sigma[$  ; 3 :  $[3\sigma, 4\sigma[$  ; -1 :  $]-2\sigma, -\sigma]$  ; -2 :  $]-3\sigma, -2\sigma]$  ; -3 :  $]-4\sigma, -3\sigma]$**



L'examen ciblé d'années critiques dans le passé (2003) et dans le futur (2057) identifiées d'après la Figure 5 montre que ces années correspondent en fait à plusieurs saisons critiques consécutives, contrairement aux autres années, où les situations favorables et défavorables s'enchaînent de manière plus aléatoire (cf. Figure 5). Ainsi, à Toulouse en 2057, le solde saisonnier est inférieur à la moyenne pour trois saisons consécutives (en particulier pour l'été-automne qui a été dans la classe  $-2\sigma$ ), encadrées par deux saisons normales (appartenant à la classe 0 dans le Tableau 6). Une tendance similaire est observée à Saint-Girons, mais rien de tel n'est remarqué à Aulus. Pour le futur, le nombre de saisons successives avec des valeurs négatives de  $\sigma$  est plus grand à Toulouse que dans les autres sites. Cette représentation permet de typer les enchaînements de saisons défavorables ou favorables.

**TABLEAU 6 – Multiples d'écart types entre la moyenne de l'indicateur correspondant au climat passé et la valeur observée une année donnée.**

	2002		2003		2004	2056	2057		2058	
	Hiver	Printemps	Eté-automne	Hiver	Printemps	Hiver	Printemps	Eté-automne	Hiver	Printemps
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

\* : les nombres signifient : 0 :  $]-\sigma, \sigma[$  ; 1 :  $[\sigma, 2\sigma[$  ; 2 :  $[2\sigma, 3\sigma[$  ; 3 :  $[3\sigma, 4\sigma[$  ; -1 :  $]-2\sigma, -\sigma[$  ; -2 :  $]-3\sigma, -2\sigma[$  ; -3 :  $]-4\sigma, -3\sigma[$

### 3. Discussion

#### 3.1. Apport des méthodes pour caractériser la variabilité et le changement climatiques

**Pour le climat passé**, l'analyse limitée aux indicateurs d'exposition avait montré qu'il n'y avait pas de tendance observable au cours des trente dernières années (SAUTIER *et al.*, 2012). L'analyse réalisée ici complète ce résultat en montrant qu'il a plusieurs types d'années fourragères qui pourraient être qualifiés de normaux. Ces types d'années fourragères diffèrent alors quant à la dynamique annuelle de croissance de l'herbe, observée à l'échelle de la saison, qui peut être favorable ou défavorable à la production fourragère. Parfois, il y a des niveaux de production d'herbe supérieurs à la moyenne au printemps, suivi par un été sec, d'autres fois, ce peut être l'inverse avec au final un niveau annuel de production annuel équivalent. L'ordre dans lequel des saisons favorables ou défavorables se succèdent est fondamental à connaître dans une perspective de gestion, en particulier si survient un printemps défavorable (tardif ou peu productif), même si il est suivi d'un été pluvieux (CHARPENTEAU et DURU, 1983).

Les **types d'années fourragères les plus fréquents** (> 12,5 %) correspondent à une production élevée au printemps, suivie par un faible déficit en été-automne (ou une production élevée pour les sites ayant les indices de DE MARTONNE les plus élevés d'après Figure 3). Ces résultats montrent l'importance de considérer le climat aux différentes saisons. Certaines recherches se concentrent uniquement sur l'été (par exemple LAMARQUE *et al.*, 2012) alors que nos résultats montrent que le niveau de surplus d'herbe au printemps (fonction de la température et de la disponibilité en eau) doit aussi être considéré en plus du déficit ou du surplus en été

L'année 2003, considérée comme exceptionnelle au niveau européen (CIAIS *et al.*, 2005) a été l'année pour laquelle à Toulouse l'écart à la moyenne a été le plus élevé (> -1 pour le printemps et > -2 pour l'été). Elle constitue un type d'année à elle seule pour le climat passé à Toulouse (Figure 3). mais pas pour les deux sites situés en montagne.

**Pour le climat futur**, les résultats des modèles de simulation de cultures montrent que l'impact attendu du changement climatique sur la production des prairies est très dépendant de la zone géographique et de l'horizon temporel considérés. Pour la fin du siècle, les recherches montrent une réduction de la production fourragère au niveau Français (par ex. GRAUX *et al.*, 2012b) et européen. A l'horizon 2050, une légère augmentation de production est attendue en Europe du Nord (HÖGLIND *et al.*, 2012). Au niveau français, RUGET *et al.*, 2012 ont montré que, pour le futur proche (2020-2050), il est attendu une augmentation de la production dans quasiment toutes les régions françaises, alors que, pour la fin du siècle, les tendances sont très différentes selon les régions ; une diminution de production est notamment attendue dans le sud-ouest de la France. De manière cohérente avec ces résultats, nous avons trouvé une augmentation ou une diminution moyenne de la production de biomasse à l'horizon 2035-2065 pour les 3 sites considérés ici (SAUTIER *et al.*, 2012). Dans le présent article, nous montrons qu'au-delà de ces changements moyens, le changement de type d'année fourragère peut se manifester de deux manières :

- certains types favorables fréquents dans le passé (type 2 à Aulus, 1 à Saint-Girons et Toulouse) ne sont plus ou peu observés dans le futur ;

- certains types d'années défavorables peu fréquents dans le passé (type 7 à Toulouse) le deviennent dans le futur.

Sur la base de la comparaison des types d'années fourragères ainsi que des écarts types, nous montrons que **le changement qui est attendu pour le futur va au-delà des fluctuations inter-annuelles observées par le passé**. L'ampleur du changement (années fourragères inédites, disparition de types d'années fourragères, augmentation de la variabilité interannuelle) indique qu'**un réajustement substantiel des systèmes d'élevage sera nécessaire**, et que **des adaptations « à la marge » ne suffiront pas**. Cette analyse confirme les tendances attendues pour d'autres cultures et régions (par exemple, SHERIDAN *et al.*, 2012). Des adaptations du système pour la gestion des risques, par exemple, ou bien des transformations plus radicales passant par des changements d'utilisation des terres, seront vraisemblablement nécessaires (RICKARDS et HOWDEN, 2012).

Les modèles utilisés pour le calcul des indicateurs minimisent vraisemblablement les différences de production entre les climats passé et futur compte tenu du choix d'un seuil plafond pour tenir compte de l'effet du CO<sub>2</sub> dans le modèle de croissance de l'herbe (SAUTIER *et al.*, 2012), dont on sait l'importance sur la production de biomasse (RUGET *et al.*, 2012). En outre, les modèles de prédiction du climat sous-estiment la variabilité car ils prennent mal en compte les événements climatiques peu fréquents (CHEN *et al.*, 2010). C'est sans doute la raison pour laquelle 6 des 9 écarts types du climat futur sont inférieurs à ceux du climat passé (d'après la Figure 2), alors qu'il est admis que cette variabilité sera supérieure dans le futur (SENEVIRATNE *et al.*, 2012).

### 3.2. Intérêt des méthodes de caractérisation des années climatiques pour la conception d'adaptations

L'originalité des deux méthodes repose sur le concept « d'année fourragère ». Les bilans saisonniers de surplus-déficit au pâturage permettent de résumer une série d'années en un nombre limité de types, ou de classer les saisons en fonction de l'écart à la moyenne et ce pour la succession de ces écarts entre saisons et années. **Lorsqu'elles sont représentées sous forme de graphiques (par exemple les Figures 2, 3 ou 5), ces caractérisations quantitatives et synthétiques peuvent constituer des outils génériques et facilement contextualisables**. La caractérisation des années et saisons fourragères est faite de manière normalisée soit par un multiple d'écart type, soit par une expression des bilans saisonniers en « jours d'alimentation », critère facile à manipuler par les agriculteurs, comme nous l'avons déjà constaté pour la gestion du pâturage (DURU *et al.*, 2000). Ces représentations constituent donc des outils cognitifs (DURU et MARTIN-CLOUAIRE, 2011) qui peuvent être mobilisés pour la sensibilisation des acteurs du monde agricole (éleveurs, conseillers...) au changement climatique, et pour qu'ils définissent eux-mêmes ce qu'ils considèrent comme une année ou saison normale, anormale ou exceptionnelle. Les indicateurs, étant calculés à partir d'un modèle de croissance de l'herbe et non à partir d'expertises de chercheurs ou d'acteurs régionaux de l'agriculture, sont génériques. Ils peuvent ainsi être facilement calculés pour d'autres situations pédoclimatiques que celles considérées ici. Ces représentations pourraient aussi être construites à partir des observatoires de pousse de l'herbe.

En outre, ces représentations peuvent être utilisés dans le cadre d'ateliers participatifs mobilisant un jeu tel le rami fourrager (MARTIN *et al.*, 2011) pour concevoir des stratégies *ad hoc* de dimensionnement du système fourrager et d'allocation des parcelles à la récolte ou au pâturage, des ajustements annuels, afin de faire face à des situations défavorables pour en atténuer les effets ou tirer parti de conditions favorables. Il a été montré que ce sont les échanges entre agriculteurs dans le cadre d'ateliers participatifs qui sont à même de favoriser les apprentissages afin de saisir la menace que représente le changement climatique, mais aussi les opportunités qu'il peut offrir (FLEMING et VANCLAY, 2009). Sur cette base, il est possible de comparer les types d'années fourragères dans le temps et dans l'espace. La comparaison de types d'années climatiques passées aux types prévus pour le futur selon leur fréquence ou l'amplitude de variation (écart type) peut permettre aux agriculteurs de s'appuyer sur des années peu fréquentes du passé qu'ils considéreront comme des années fréquentes du futur, pour la conception d'adaptations en termes de chargement, d'équilibre fauche/pâturage. Le choix de sites situés à des altitudes différentes ou localisés dans différentes régions biogéographiques, de telle manière que le climat futur d'un site soit proche de celui du climat courant d'un autre site (comme pour Saint-Girons et Toulouse), peut faciliter la comparaison entre les climats passés et futurs. De cette manière, l'apprentissage des agriculteurs peut être stimulé car ils peuvent ainsi se référer à des conditions concrètes qui leur sont familières.

Les indicateurs sélectionnés sur la base d'un bilan fourrager équilibré n'épuisent pas toutes les données pertinentes nécessaires pour caractériser l'exposition des systèmes d'élevage à la variabilité et au changement climatique. D'autres indicateurs (MOREAU, 2009) rendant compte des contraintes pour l'accès au pâturage en relation avec la portance du sol (RIVINGTON *et al.*, 2013) ou pour la fauche (DURU et COLOMBANI, 1992) pourraient facilement être pris en compte pour compléter la caractérisation de l'exposition des systèmes d'élevage à la variabilité et au changement climatique.

## Conclusion

L'évaluation de l'exposition des systèmes d'élevage herbagers à la variabilité et au changement climatiques est un préalable à l'identification et l'évaluation d'adaptations. Cette exposition est cependant difficile à réaliser à partir des données climatiques de base (température...) compte tenu des effets conjoints de ces variables sur la dynamique de la croissance de l'herbe à l'échelle de l'année. Nous proposons ici deux méthodes complémentaires de définition et de classification d'« années fourragères » pour caractériser la variabilité et le changement climatiques de façon synthétique. Les années fourragères sont définies à partir d'indicateurs d'exposition spécifiques aux systèmes herbagers : date de début de saison et solde d'herbe au pâturage à l'échelle de la saison. La première méthode regroupe des années au profil annuel de croissance de l'herbe semblables ; elle permet de rattacher facilement une année à un référentiel et de faire réfléchir en termes de fréquence et de risque. La seconde méthode regroupe des années étant proches en termes d'écart à la moyenne du passé. Elle donne à voir les enchaînements de saisons et l'ampleur des écarts à la moyenne. Ces deux méthodes peuvent être mobilisées pour évaluer l'ampleur des adaptations nécessaires et, étant établies sur un modèle générique, peuvent être appliquées aisément pour d'autres sites et d'autres périodes que ceux considérés ici.

Un premier enseignement est qu'il est possible de définir plusieurs types d'années fourragères « normales » dans la mesure où ils sont observés à des fréquences relativement importantes bien que présentant des profils saisonniers différents. En fait, tout un continuum de types d'années fourragères peut être défini, avec des types d'années plus ou moins proches de la moyenne, pour une ou plusieurs saisons.

Dans le sud-ouest de la France et pour l'horizon 2035-2065, domaine d'application de cet article, si la production annuelle varie peu (Aulus et Toulouse) ou diminue significativement (Saint-Girons), la fréquence des types d'années fourragères change, notamment parce que les contrastes printemps/été-automne sont accentués ; autrement dit, la fréquence des printemps où la croissance de l'herbe est élevée augmente, de même que la fréquence des été-automne, voire des débuts d'hiver (Toulouse) où l'alimentation à l'auge commence plus tôt.

## Références bibliographiques

- CHAPMAN D.F., KENNY S.N., BECA D., 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., DURU M. (1983) : "Simulation of some strategies to reduce the effect on climatic variability on farming. The case of Pyrenees Mountains", *Agricultural Systems*, 11, 105-125.
- CHEN J., BRISSETTE F.P., LECONTE R. (2010) : "A daily stochastic weather generator for preserving low-frequency of climate variability", *Journal of Hydrology*, 388 (3-4), 480–490. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.05.032
- 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. *et al.* (2005) : "Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003", *Nature*, 437 (7058), 529-33. doi: 10.1038/nature03972
- CRANE T.A., RONCOLI C., HOOGENBOOM G. (2011) : "Adaptation to climate change and climate variability: The importance of understanding agriculture as performance", *NJAS - Wageningen J. of Life Sci.*, doi: 10.1016/j.njas.2010.11.002
- DE MARTONNE E. (1926) : "Une nouvelle fonction climatologique : l'indice d'aridité", *Météorologie*, 2, 449-458.
- DURU M., COLOMBANI H. (1992) : "Haymaking in risk and uncertainly situations: central Pyrenees permanent grassland case", *Agricultural Systems*, 38, 185-207.
- DURU M., 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.
- DURU M., DUCROCQ H., BOSSUET L. (2000) : "Herbage volume per animal: a tool for rotational grazing management", *Journal of Range Management*, 53, 395-402.
- DURU M., ADAM M., CRUZ P., MARTIN G., ANSQUER P., DUCOURTIEUX C., JOUANY C., THEAU J.P., VIEGAS J. (2009) : "Modelling above-ground herbage mass for a wide range of grassland community types", *Ecological Modelling*, 220, 209-225.
- DURU M., FELTEN B., THEAU J.P., MARTIN G. (2012) : "A modelling and participatory approach for enhancing learning about adaptation of grassland-based livestock systems to climate change", *Regional Environmental Change*, doi: 10.1007/s10113-012-0288-3
- FLEMING A., VANCLAY F. (2009) : "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., KLEIN R.J.T. (2006) : "Climate Change Vulnerability Assessments: An Evolution of Conceptual Thinking", *Climatic Change*, 75, 3, 301–329. doi: 10.1007/s10584-006-0329-3
- GIBBONS J., RAMSDEN S. (2008) : "Integrated modelling of farm adaptation to climate change in East Anglia, UK: Scaling and farmer decision making", *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 127, 126-134.
- GRAUX A.I., BELLOCCHI G., LARDY R., SOUSSANA J.F. (2012a) : "Ensemble modelling of climate change risks and opportunities for managed grasslands in France", *Agricultural and Forest Meteorology*. doi: 10.1016/j.agrformet.2012.06.010
- GRAUX A.I., LARDY R., BELLOCCHI G., SOUSSANA J.F. (2012b) : "Global warming potential of French grassland-based dairy livestock systems under climate change", *Regional Environmental Change*. doi: 10.1007/s10113-012-0289-2
- HANSEN J., SATO M., RUEDY R. (2012) : "Perception of climate change", *Proc. National Academy of Sciences*.
- HÖGLIND M., THORSEN S.M., SEMENOV M. (2012) : "Assessing uncertainties in impact of climate change on grass production in Northern Europe using ensembles of global climate models", *Agricultural and Forest Meteorology*. doi: 10.1016/j.agrformet.2012.02.010
- HOPKINS A., 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., 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*, thèse, Université de Grenoble.
- MARTIN G., FELTEN B., DURU M. (2011) : "Forage rummy: A game to support the participatory design of adapted livestock systems", *Environmental Modelling & Software*. doi: 10.1016/j.envsoft.2011.08.013
- MCCRUM G., BLACKSTOCK K., MATTHEWS K., RIVINGTON M., MILLER D., BUCHAN K. (2009) : "Adapting to climate change in land management: The role of deliberative workshops in enhancing social learning", *Environmental Policy and Governance*, 19, 413–426.

- MEINKE H., HOWDEN S.M., STRUIK P.C., NELSON R., RODRIGUEZ D., 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., 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
- MOREAU J.C. (2009) : "Changements climatiques, Conséquences et enseignements pour les grandes cultures et l'élevage herbivore", *Prospective à l'échelle des systèmes d'élevage herbivore, adaptations et pistes de réflexion*, 113-136
- PANNEL D.J. (2010) : "Policy for climate change adaptation in agriculture", *Proc. 54<sup>th</sup> Annual Conf. Australian Agricultural and Resource Economics Society*, Adelaide, 10–12 February 2010.
- RICKARDS L., HOWDEN S.M. (2012) : "Transformational adaptation: agriculture and climate change", *Crop and Pasture Science*, 63, 3, 240-250. doi.org/10.1071/CP11172.
- RIVINGTON M., MATTHEWS K.B., BUCHAN K., MILLER D.G., BELLOCCHI G., 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., CLASTRE P., MOREAU J.C., CLOPPET E., SOUVERAIN F., LACROIX B., LORGEOU J. (2012) : "Conséquences possibles des changements climatiques sur la production fourragère en France. I- Estimation par modélisation et analyse critique. II-Exemples de quelques systèmes d'élevage", *Fourrages*, 210, 87-98 et 211, 243-251.
- SAUTIER M., MARTIN-CLOUAIRE R., FAIVRE R., DURU M. (2012) : "Assessing climatic exposure of grassland-based livestock systems with seasonal-scale indicators", soumis à *Climatic Change*
- 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., ZHANG X. (2012) : "Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment", *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (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*, 109-230.
- SHERIDAN S.C., LEE C.C., ALLEN M.J., KALKSTEIN L.S. (2012) : "Future heat vulnerability in California, Part I: projecting future weather types and heat events", *Climatic Change*, 115, 2, 291–309. doi: 10.1007/s10584-012-0436-2
- SMIT B., WANDEL J. (2006) : "Adaptation, adaptive capacity and vulnerability", *Global Environmental Change*, 16, 3, 282–292. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2006.03.008
- ZHANG W., RICKETTS T. H., KREMEN C., CARNEY K., SWINTON S.M. (2007) : "Ecosystem services and dis-services to agriculture", *Ecological Economics*, 64, 253-260.