

Quels idéotypes de plantes fourragères pour des prairies adaptées au changement climatique ?

F. Volaire¹, P. Barre², V. Béguier³, T. Bourgoïn⁴, J.-L. Durand², M. Ghesquière²,
J.-P. Jaubertie⁴, I. Litrico², D. Noël⁵

1 : INRA-CEFE-CNRS, 1919, route de Mende, F-34293 Montpellier ; florence.volaire@cefe.cnrs.fr

2 : INRA- URP3F, F-86000 Lusignan

3 : Jouffray-Drillaud, 1, allée de la Sapinière, La litière, F-86600 St Sauvant

4 : Agri-Obtentions, chemin de la Petite Minière, F-78820 Guyancourt

5 : Barenbrug Tourneur Recherches, Negadis, route de Bourret, F-82600 Mas-Grenier

Résumé

Le changement climatique se traduit en France par une augmentation des températures et de la fréquence des sécheresses intenses qui devraient favoriser la production fourragère des zones 'nord' gagnantes et réduire celle des zones 'sud' perdantes, avec une limite entre ces deux zones se déplaçant rapidement en latitude vers le nord. Alors que les cultivars d'espèces fourragères pérennes d'origine méditerranéenne et adaptés à la sécheresse représentent moins de 2 % des cultivars disponibles, cette revue donne la vision des sélectionneurs et des chercheurs français sur les idéotypes à envisager et le travail de sélection nécessaire pour obtenir des cultivars fourragers assurant des prairies pérennes sous contraintes croissantes. Dans les zones à faible risque de sécheresse sévère, une meilleure valorisation de saisons de croissance plus longues, notamment au printemps et sous sécheresse estivale, ainsi qu'un remplacement possible d'espèces plus adaptées et la constitution de mélanges aux caractéristiques complémentaires sont les principales voies d'amélioration envisagées. Pour les zones à fort risque de sécheresse sévère, la création d'une gamme de graminées à niveau élevé de dormance estivale combinée à une productivité améliorée aux saisons pluvieuses, ainsi que l'exploration de matériel original dans des zones semi-arides, sont des objectifs en cours. L'amélioration végétale doit continuer à être raisonnée pour la qualité fourragère et la résistance aux pathogènes et en fonction des impératifs techniques et socio-économiques, en recherchant une bonne compétitivité pour la production de semences.

1. Introduction

Les prairies et cultures fourragères, qui couvrent environ 50 % de la surface agricole utile en France, sont à la base de l'alimentation des troupeaux et fournissent de nombreux services écosystémiques comme l'amélioration des sols, la protection contre l'érosion, la limitation des pollutions par lessivage et le maintien d'une biodiversité végétale élevée. Dans le contexte du changement climatique et selon les scénarios considérés, les températures annuelles moyennes devraient s'accroître de 2,5°C à 4,3°C dans la plupart des régions agricoles du monde d'ici à la fin du siècle (IPCC, 2007). Des résultats récents suggèrent même que les modèles prévoyant les augmentations de température les plus fortes seraient les plus probables (FASULLO et TRENBERTH, 2012). Pour la plupart des zones non irriguées en Europe, les risques climatiques vont se traduire par des sécheresses croissantes (TRNKA *et al.*, 2011). Il importe donc de s'interroger sur l'impact de ces changements globaux sur les prairies et leurs fonctions agro-environnementales ainsi que sur les moyens de contribuer à maintenir et renforcer la durabilité de ces couverts sur le long-terme. Pour les cultures fourragères majoritairement non irriguées, l'adaptation peut se traduire par des changements de choix d'espèces et de cultivars (MINGUEZ *et al.*, 2007 ; OLESEN *et al.*, 2007). Nous allons ainsi présenter les grandes tendances des prévisions d'évolution climatique au niveau de la France, pour ensuite analyser les stratégies adaptatives des principales espèces fourragères ainsi que les bénéfices attendus de mélanges. Nous tenterons enfin de définir des idéotypes fourragers adaptés aux évolutions drastiques de climat prévues en ce XXI^e siècle.

2. Les grandes évolutions climatiques en France

2.1. Températures, canicules et sécheresses augmentent

Plusieurs projets récents de recherche (CLIMSEC, 2012 ; IMFREX, 2012 ; METEO-FRANCE, 2012) donnent des projections sur les impacts du changement climatique. Selon les scénarios (Tableau 1), une augmentation moyenne globale des températures maximales en été et en hiver d'ici 2050 (+1,7 à +3,8°C) et encore plus forte d'ici la fin du siècle (jusqu'à +9,5°C en été) n'est pas à exclure. Ce réchauffement se traduirait aussi par une augmentation des températures minimales hivernales. La fréquence de températures minimales inférieures à -5°C deviendrait négligeable et les vagues de froid disparaîtraient pratiquement à la fin du XXI^e siècle, tandis que la fréquence de températures maximales supérieures à 35°C serait multipliée par un facteur de 5 à 10 (IMFREX) conduisant à une augmentation très nette du nombre de canicules estivales (fréquence et intensité) en France.

TABLEAU 1 – Augmentation moyenne de températures projetées pour la France entière, selon deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre (moyen, intensif). Simulations Météo France (2012).

	Scénario 'moyen'		Scénario 'intensif'	
	2050	2099	2050	2099
Températures maximales en été	+ 1,7°C	+ 5,4°C	+ 3,8°C	+ 9,5°C
Températures maximales en hiver	+ 1,8°C	+ 2,3°C	+ 2,6°C	+ 4,1°C
Températures minimales en hiver	+ 1,2°C	+ 1,6°C	+ 2,6°C	+ 3,1°C

Les dernières simulations climatiques projettent, en été, un réchauffement marqué et une diminution des précipitations sur les régions méditerranéennes et, en hiver, une augmentation des précipitations sur toute la façade atlantique. Quels que soient les modèles retenus, les sécheresses augmenteraient en nombre et en intensité, aggravées par la hausse de l'évaporation induite par l'augmentation des températures moyennes et l'augmentation de la variabilité des sécheresses. Dans ce contexte et durant le premier tiers du XXI^e siècle, les conséquences des sécheresses devraient rester peu marquées. En revanche, à partir de 2050, la France connaîtrait un assèchement durable des sols par rapport à la situation actuelle. Après 2080, le projet CLIMSEC indique des sécheresses intenses et des épisodes qui pourraient s'étaler sur plusieurs années consécutives. Ce sont les régions qui ont en moyenne les sols les plus humides aujourd'hui (Nord-Ouest et Nord Est notamment) qui pourraient connaître à la fin du siècle les évolutions relatives les plus fortes par rapport au climat actuel

2.2. Progression du climat de type "méditerranéen" vers le nord

Concernant le changement climatique avéré sur les trois régions du sud de la France, le projet PSDR CLIMFOUREL a montré qu'entre 1980 et 2009, le changement climatique s'est traduit effectivement puisque les lignes d'isothermes et d'iso-évapotranspiration ont migré de 250-300 km vers le nord et le nord-ouest (LELIEVRE *et al.*, 2010 ; LELIEVRE *et al.*, 2011). En revanche, les lignes d'isohyètes n'ont pas encore bougé significativement. Il en résulte que **les lignes de climats similaires sont remontées de 100 à 130 km vers le nord et le nord-ouest**. Alors qu'une baisse significative des pluies a été observée de janvier à août dans le bassin méditerranéen, ces évolutions sont atténuées en façade atlantique et en altitude. Il est ainsi plausible que, d'ici 2050, les frontières climatiques continueront de remonter et que le climat méditerranéen subhumide, avec de fortes sécheresses estivales, pourrait couvrir le Sud-Ouest au-delà d'Agen, la vallée du Rhône jusqu'à Lyon et le sud du Massif central à altitude < 600 m (soit 25 % du territoire) et pourrait atteindre la Loire en fin de XXI^e siècle.

2.3. Impact attendu du changement climatique

Une diminution des précipitations estivales, une augmentation de l'évapotranspiration ainsi que des canicules plus fréquentes et donc des sécheresses prononcées (LEHNER et CZISCH, 2005 ; SUPIT

et al., 2010 ; TRNKA et al., 2011) pourraient réduire les rendements de culture au-delà des effets des changements climatiques moyens (TUBIELLO et al., 2007). Par conséquent, le déclin de la production fourragère dans certaines régions et des dégradations à long terme des prairies devraient être plus fréquentes (BRISKE et al., 2003 ; CIAIS et al., 2005). Dans d'autres situations, le projet CLIMATOR a montré que l'accroissement des températures en hiver et celui de la concentration en CO₂ pourraient augmenter la production fourragère annuelle mais avec des déséquilibres saisonniers accusés et une forte variabilité interannuelle (DURAND et al., 2010).

Les résultats de modélisation (STICS) de CLIMFOUREL montrent aussi des effets conjugués. La concentration en CO₂ de l'air et les températures augmentent, ce qui tend à accroître précocité, photosynthèse et donc production de biomasse. En parallèle, le déficit climatique hydrique s'accroît. Dans les régions restant humides, aucun effet négatif n'a été observé. Dans celles où il y a déjà des déficits fréquents, la durée et l'intensité des sécheresses augmenteraient. Ces changements ont déjà modifié l'offre fourragère des prairies entre 1979 et 2009 : avec le '**Nord gagnant**' et le '**Sud perdant**', et une limite entre ces deux zones qui monte vite en latitude et en altitude.

Dans ce contexte climatique évolutif mais marqué de façon principale par l'augmentation des risques de sécheresse et leur variabilité, une évolution des objectifs de sélection des espèces fourragères est nécessaire. Plus que le potentiel de production, l'aptitude des espèces/cultivars et mélanges au maintien d'une productivité pluriannuelle acceptable sous contrainte hydrique variable devient un critère essentiel à privilégier, à la fois pour des fonctions fourragères et de protection agro-environnementales. Dans ce contexte, les espèces pérennes ont un rôle prépondérant et seront l'objet principal de cette synthèse.

Le projet INRA CLIMAGIE (www.inra.fr/climagie) se base sur une typologie de situations (Tableau 2), pour lesquelles des cultivars et des mélanges fourragers doivent être proposés en fonction des services attendus et des zones climatiques (non irriguées). Les zones tempérées (qui vont se réduire) pour lesquelles le changement climatique est pour l'instant plutôt positif, s'opposent aux zones climatiques intermédiaires et méditerranéennes (qui vont s'accroître) pour lesquelles du matériel végétal doit être sélectionné pour une résistance accrue à la sécheresse.

TABLEAU 2 – Typologie des besoins en fourrages et mélanges adaptés selon les fonctions et les zones biogéographiques caractérisées par le rapport entre Précipitation annuelle (P) et Evapotranspiration annuelle (ETP).

	Zones tempérées P/ETP>0,9	Zones intermédiaires 0,65<P/ETP<0,9	Zones méditerranéennes P/ETP<0,65
Production de fourrage			
Prairies intensives	+	+	
Prairies extensives	+	+	+
Parcours		+	+
Services environnementaux			
Inter-rangs, protection sols	+	+	+
Rotation de cultures	+	+	+

3. Les stratégies d'adaptation des espèces et prairies

3.1. Espèces, cultivars et génotypes

Par rapport à la sécheresse, les espèces herbacées présentent classiquement trois principales stratégies d'adaptation (LEVITT, 1972 ; LUDLOW, 1989). Les annuelles ont une **stratégie d'échappement** en achevant leur cycle reproducteur avant le stress estival. Les questions de phénologie sont donc déterminantes pour leur adaptation. Les pérennes combinent à des degrés divers une **stratégie d'évitement de la déshydratation** (par prélèvements hydriques en profondeur et réduction des pertes en eau par réduction de croissance aérienne, contrôle stomatique,

enroulement foliaire, sénescence) et une **stratégie de tolérance à la déshydratation** assurant, à des stades de déficit hydrique avancé, le maintien de viabilité des organes de survie (méristèmes, racines). De plus, la **dormance estivale** est une stratégie de certaines graminées des milieux semi-arides (notamment dactyles et fétuques) conférant une survie exceptionnelle à la sécheresse (VOLAIRE et NORTON, 2006).

Par rapport à la température, les rythmes de croissance des pérennes, associés notamment aux indices de dormance (hivernale et estivale), déterminent le potentiel de production et la résistance au gel ou aux canicules. La luzerne a des niveaux de dormance hivernale contrastée mais n'est pas connue pour exprimer de la dormance estivale. Il existe chez les graminées une corrélation entre l'origine des génotypes, leur potentiel de production saisonnier et la survie au stress climatique (BURNER *et al.*, 1988 ; KNIGHT, 1973). Le matériel d'origine méditerranéenne valorise bien les températures hivernales élevées (pas de dormance hivernale) mais est sensible au gel alors qu'il a tendance à se mettre en dormance en été (peu ou pas de production) mais survit à des sécheresses intenses. Le matériel d'origine tempérée présente les caractéristiques inverses. Donc, lors d'une saison, plus la production d'un génotype est élevée, moins sa survie suite à un stress climatique est efficace. **Il existe une corrélation négative entre production et survie.**

Parmi les espèces disponibles, le ray-grass anglais, le trèfle blanc, la fléole sont pérennes mais sensibles à la sécheresse et probablement d'intérêt limité à moyen terme en zones sèches. La luzerne a un fort potentiel de production en conditions chaudes et irriguées mais une faible résistance à la sécheresse sur sols peu profonds car peu tolérante à la déshydratation.

Parmi les espèces largement utilisées en prairies temporaires, le dactyle et la fétuque sont les graminées en C3 les mieux adaptées à la sécheresse. Néanmoins, il existe une extrême variabilité intra-spécifique. Il est connu que le matériel d'origine tempéré a une pérennité très faible (< 10 %) en conditions de sécheresses estivales intenses et répétées alors que les génotypes méditerranéens survivent en moyenne entre 60 et 80 % (Tableau 3).

TABLEAU 3 – Pérennité après 4 ans sans irrigation à Montpellier de dactyle et fétuque élevée (15 populations minimum par espèce) - (LELIEVRE et VOLAIRE, 2009).

Espèce	Origine	Survie à la sécheresse et pérennité (% recouvrement)		
		Minimum	Moyen	Maximum
Dactyle	Tempérée	0	1	5
	Méditerranéen	40	82	95
Fétuque élevée	Tempéré	0	6	20
	Tempéré x Méditerranéen (amphiploïdes)	5	64	95
	Méditerranéen	0	62	95

Il faut rappeler qu'au Catalogue 2006 des semences fourragères en France, **sur 257 cultivars de ray-grass, fétuque élevée et dactyle, seuls 4 cultivars sont d'origine méditerranéenne** (LELIEVRE et VOLAIRE, 2009). Cette carence est un problème crucial pour les zones sud et à moyen terme pour les zones plus au nord. Pour les espèces pérennes, les types méditerranéens ont une importance accrue sous changement climatique et il est urgent qu'ils soient pris en compte en sélection végétale pour développer des cultivars mieux adaptés aux sécheresses croissantes (POIRIER *et al.*, 2012).

3.2. Mélanges pluri-spécifiques ou pluri-génotypiques

L'objectif est de mélanger des espèces et variétés ayant des caractéristiques complémentaires pour pouvoir s'adapter aux différentes contraintes pédoclimatiques, comme les stress hydriques, les excès d'eau ou les températures extrêmes. C'est le cas par exemple de mélanges de graminées à dormances hivernale et estivale qui doivent aussi être suffisamment agressifs envers les adventices. Le rôle de la biodiversité est démontré dans la réduction des risques de maladies (TOOKER et FRANK,

2012). Mais alors que certaines études (HECTOR *et al.*, 1999 ; KIRWAN *et al.*, 2007 ; TILMAN *et al.*, 1996) montrent une augmentation de la production primaire, notamment des prairies, avec la diversité du couvert, l'effet de la biodiversité sur la pérennité des peuplements reste à étudier en particulier sous stress sévère. La question centrale est d'élaborer des **règles d'assemblage du matériel végétal** dans des mélanges plus ou moins complexes. Ces règles, à élaborer à partir des concepts de l'écologie des communautés et de l'écologie fonctionnelle, doivent être basées sur la **complémentarité fonctionnelle** (dans le temps et l'espace) des composantes comme la différence de rythmes de croissance et de stratégies d'utilisation de l'eau du sol. L'objectif est de limiter la compétition et de favoriser les interactions biotiques positives pour utiliser au mieux les ressources disponibles. Ainsi, il est indispensable de bien connaître les stratégies adaptatives des espèces et cultivars pour tirer une plus-value des mélanges. Le vrai challenge reste donc l'amélioration de cultivars pour les caractères impliqués dans l'adaptation à la sécheresse, cultivars sans lesquels les mélanges ont peu de chance de fournir des solutions miracle !

4. Amélioration génétique et idéotypes par zones climatiques

4.1. Raisonner l'amélioration végétale

Le changement climatique renforce la nécessité d'approfondir les connaissances sur les relations entre les caractères d'intérêt des espèces fourragères. Comme indiqué ci-dessus, certains caractères peuvent être antagonistes et donc impossibles à associer dans un unique idéotype qui serait par exemple productif en toutes saisons, résistant à tout niveau de stress et indéfiniment pérenne.

Ces relations négatives entre caractères résultent de 'compromis' (*trade-off*) au niveau du fonctionnement de la plante mais le déterminisme génétique de ces 'compromis' est peu connu. En effet, l'évolution naturelle tend à fixer préférentiellement une ou quelques combinaisons de caractères conférant aux plantes (espèces, écotypes) les meilleures chances de survie dans un environnement donné. Or, d'une part, l'évolution n'engage pas que des processus sélectifs et, d'autre part, la performance ou '*fitness*' en conditions naturelles correspond rarement à des idéotypes fourragers destinés à être valorisés dans des systèmes de culture artificialisés avec des objectifs de production.

Pour le sélectionneur, il convient donc d'inventorier le plus largement possible les 'solutions' trouvées par l'évolution naturelle pour s'adapter aux variations climatiques de très grande amplitude auxquelles sont soumises depuis toujours les espèces et populations fourragères dans la nature. Ensuite, le croisement artificiel entre plantes contrastées et l'étude de leurs descendances permet d'évaluer les relations génétiques entre caractères antagonistes/complémentaires et, *in fine*, la faisabilité de sélectionner des variétés réalisant le ou les idéotypes préalablement défini(s).

Face à cette démarche générale, l'amélioration génétique reste très dépendante des méthodes et outils qu'il lui faut mobiliser au cours des processus de sélection (croisements, hybridation, modélisation, phénotypage, marquages moléculaires et isotopiques...). A cette dimension d'efficacité, compte tenu du temps nécessaire à la sélection des variétés fourragères, s'ajoute aussi une dimension économique et donc de marché de semences envisagé pour les idéotypes ciblés.

En France, le changement climatique nous oriente vers **deux grandes zones contrastées** qui nécessiteront des variétés adaptées ; **une zone nord-ouest** avec une augmentation des températures et un risque de sécheresse estivale modéré ; **une zone sud en progression vers le nord**, avec des risques plus grands de sécheresse estivale marquée. Cela conduit dans les deux cas à maximiser le potentiel de croissance sur la période la plus favorable, de septembre à mai, avec, pour la zone nord-ouest, la possibilité de produire aussi en été et, pour la zone sud, la possibilité d'une bonne croissance en hiver ainsi qu'une survie et pérennité optimales des couverts par dormance estivale.

4.2. Les zones à faible risque de sécheresse sévère

– Valoriser la croissance sous sécheresse estivale modérée

L'amélioration de la production des graminées en été est un objectif de longue date pour les sélectionneurs. Pour la **fétuque élevée**, une sélection est envisagée sur un enracinement rapide

avec capacité d'aller chercher l'eau en profondeur afin de produire du fourrage en été dans les sols profonds avec disponibilité en eau. Par ailleurs, les variétés tempérées actuelles de **dactyle** répondent assez bien aux manques d'eau de courte durée. Elles sont capables de redémarrer et de produire du fourrage rapidement après réhydratation. Une étude rétrospective sur les quarante dernières années chez le **ray-grass anglais** montre que, même chez cette espèce, un progrès significatif de la productivité en été, et surtout en automne, a été obtenu (SAMPOUX *et al.*, 2011). Cette amélioration confirme l'efficacité sur le long terme de la sélection récurrente pour retenir les combinaisons génétiques les plus favorables. L'exemple du ray-grass anglais est d'autant plus intéressant qu'il ne fait pas intervenir la précocité d'épiaison mais une amélioration indirecte de la pérennité par réduction de caractères négatifs liés à la reproduction sexuée comme l'alternativité et la remontaison en été. De plus, le contraste avec la productivité au printemps, qui elle n'a pas enregistré de progrès significatif sur la même période, montre bien également que les perspectives d'amélioration quantitative de la productivité ne se situent pas nécessairement aux périodes les plus favorables à la pousse de l'herbe mais plus en conditions sub-optimales. Cette possibilité de moduler l'effort de la sélection dans une direction particulière pour un plus grand impact se traduit lors de l'inscription variétale par le calcul d'un index de performance dont les coefficients de pondération de la répartition saisonnière de la production constituent un levier pour orienter la filière semences vers de nouveaux objectifs d'amélioration comme l'adaptation au changement climatique.

– Valoriser des saisons de croissance plus longues

Il y aurait avantage à décaler le cycle de production plus tôt au printemps pour mieux valoriser les températures clémentes hivernales et la pluviométrie tout en limitant les risques de gels tardifs et en conservant la possibilité de réaliser de chantiers de récoltes à des périodes favorables.

La gamme de variabilité pour les graminées pérennes utilisées actuellement (ray-grass, dactyle, fétuque élevée) et les légumineuses également (luzerne, trèfle violet, trèfle blanc, lotier) est toujours d'actualité, d'autant que les critères de sélection comme la souplesse d'exploitation (se traduisant par un démarrage plus précoce à date d'épiaison maintenue) et la résistance aux maladies foliaires qui se développent en conditions chaudes et humides (rouilles et anthracnose notamment) sont au cœur du travail des sélectionneurs.

Pour le **dactyle**, l'introduction d'écotypes de Galice, région douce et arrosée au printemps, a permis de progresser de façon substantielle pour le démarrage en sortie d'hiver (MOUSSET, 2000). Il en a été de même en Nouvelle-Zélande pour le ray-grass anglais, où des écotypes de Galice ont permis d'augmenter la souplesse d'exploitation des variétés constituées à l'origine à partir d'écotypes de Grande-Bretagne. Pour la **fétuque élevée**, la tâche est plus compliquée du fait de l'incompatibilité des croisements directs avec les écotypes du sud du bassin méditerranéen, ce qui a nécessité de recourir à des hybrides amphiploïdes (JADAS-HECART et GILLET, 1978). Il existe en revanche une gamme de variabilité génétique pour la précocité dans le matériel cultivé tempéré qui permet d'envisager d'améliorer la souplesse d'exploitation.

Concernant les **légumineuses**, il existe déjà une gamme de variabilité en trèfle blanc importante suivant l'origine du matériel. Certaines variétés néo-zélandaises ou les types Ladino ont un démarrage très précoce. Il s'agit d'adapter la variabilité de ce matériel à la phénologie des graminées associées. Le trèfle violet est plus compliqué à envisager car la base génétique des variétés est étroite et les écotypes ont une pérennité et une productivité très limitées par rapport au matériel cultivé.

La **luzerne** en peuplement monospécifique a été très travaillée en France pour la productivité, la résistance aux maladies et la sensibilité à la verse. Une sélection est engagée pour obtenir de nouvelles variétés avec des indices de dormance hivernale plus élevés (6-7) permettant de bénéficier de l'augmentation de température et d'une saison de croissance plus longue avec une meilleure répartition des productions tout au long de l'année. Plus l'indice de dormance est élevé, mieux ce type de matériel résiste à des défoliations fréquentes (voire à des pâtures précoces ou tardives) sans risque pour la pérennité puisque les plantes ont moins besoin de remobiliser des réserves importantes au niveau de leur système racinaire. Cette notion de répartition et de fréquence d'utilisation apporte une meilleure souplesse d'utilisation aux agriculteurs dans la gestion de leurs parcelles et de leur production fourragère. Néanmoins, dans un système de récolte en fauche, le recours à du matériel moins dormant pourrait avoir un intérêt limité dans la mesure où il faut avant tout assurer une production de gros volume et de qualité avec peu d'interventions.

– Valoriser des mélanges

Il convient de **raisonner la succession des espèces** permettant d'optimiser la productivité de la prairie en périodes favorables. **Jouer sur la gamme de précocité** au sein d'une espèce ou introduire du matériel à croissance hivernale est un levier non négligeable. Peu de variétés précoces sont disponibles aujourd'hui car ces créneaux de précocités représentent de faibles volumes du marché des semences. Envisagées dans un mélange et non plus dans un couvert monovariétal, ces variétés précoces regagnent en intérêt. Du matériel méditerranéen pourrait être introduit dans ces mélanges en s'assurant de sa compétitivité à long terme par rapport au matériel tempéré. Un sursemis régulier de ce type de matériel en fin d'été ou bien d'espèces annuelles comme le ray-grass d'Italie alternatif pourrait être envisagé pour assurer un minimum de productivité en hiver ou sortie d'hiver. Le matériel de semis actuellement disponible le permet et l'agressivité de cette espèce doit favoriser une bonne installation sans compromettre la pérennité des espèces installées. Dans ce type de mélanges, des luzernes moins dormantes et à repousse plus rapide seraient plus à même de supporter la compétition des graminées associées. On pourrait également envisager le sursemis de légumineuses annuelles comme le trèfle incarnat et les vesces velues, ou bien encore le sursemis d'annuelles en C4 dans des couverts de pérennes en C3.

– Valoriser la variabilité interspécifique

Le grand nombre d'espèces fourragères disponibles permet une diversité de l'offre génétique déjà adaptée à une large gamme de conditions de milieu. Ainsi, dans le Sud-Ouest, l'adaptation au changement climatique peut être envisagée par **remplacement progressif des espèces actuelles**, à savoir schématiquement le remplacement des ray-grass par le dactyle ou la féтуque élevée. Cette évolution pourrait se faire sans bouleversement des objectifs d'amélioration mais avec une occasion de réviser les priorités : appétence et digestibilité plus élevées chez de nouvelles variétés de féтуque élevée qui viendraient remplacer du ray-grass anglais au pâturage, vitesse d'installation plus rapide et productivité plus importante à la première coupe qui pourraient devenir des critères plus importants dans le futur au travers de leur contribution renforcée dans le calcul de l'index à l'inscription des variétés.

Le **croisement interspécifique** est une voie qui est explorée depuis longtemps pour compléter des caractères adaptatifs dispersés entre espèces. Les exemples les plus aboutis en termes de variétés concernent les hybrides amphiploïdes entre féтуque élevée européenne et méditerranéenne ou les hybrides *Festulolium* entre ray-grass et féтуque élevée soit directement, soit *via* des espèces apparentées non cultivées comme *Festuca glaucescens* (GHESQUIERE et MOUSSET, 2004). Ces variétés montrent qu'il est possible de déplacer l'équilibre entre productivité et pérennité présenté par les espèces parentales, souvent de façon non additive ; la pérennité des hybrides amphiploïdes est ainsi généralement plus proche du parent le plus tolérant au stress hydrique que du parent le plus sensible (Tableau 3 ; GHESQUIERE, 2007). Ces variétés 'prototypes' soulèvent des questions en termes de production de semences à grande échelle, en relation avec leur niveau interspécifique. Leur développement futur passe par l'utilisation d'une information génétique au niveau chromosomique et moléculaire, qui s'intensifie actuellement, et permettra de concilier adaptation et fertilité par une sélection plus précise des meilleures combinaisons hybrides (GHESQUIERE *et al.*, 2010).

4.3. Les zones à fort risque de sécheresse sévère

– Valoriser la dormance estivale

Dans les zones à fort risque de sécheresse sévère, les espèces pérennes ont l'intérêt de démarrer rapidement quand les conditions sont à nouveau favorables et d'assurer une couverture du sol toute l'année. Ces espèces, en plus d'être résistantes aux sécheresses sévères, devront produire de la biomasse de bonne qualité aux saisons pluvieuses et avoir un niveau de production grainière suffisant pour assurer leur multiplication. Le **dactyle** et la **féтуque élevée** sont des graminées pérennes avec des populations à **dormance estivale**, ce qui leur confère une **aptitude remarquable à survivre à de fortes sécheresses** et aux températures élevées. Les populations à niveau élevé de dormance estivale sont toutefois peu productives aux autres saisons. Ce trait peut être favorable pour

des idéotypes de variétés utilisables pour la protection des sols et l'enherbement des vignes et vergers car leur pérennité est combinée avec une faible compétitivité au printemps et en été par rapport à l'espèce ligneuse cultivée (VOLAIRE et LELIEVRE, 2010). Cependant, pour des variétés à fort potentiel fourrager, l'objectif de sélection est de pouvoir travailler à la fois sur la dormance d'été, la repousse en automne et la résistance au froid, la corrélation entre ces caractères étant très élevée.

Afin d'évaluer les possibilités de créer des variétés de graminées fourragères pérennes dormantes en été et plus productives, un projet franco-marocain (PRAD) est en cours sur le dactyle. Il a pour but d'étudier les déterminismes génétiques de la dormance estivale et de la croissance foliaire dans une population issue d'un croisement entre une plante de la variété 'Kasbah', dormante l'été et peu productive, et la variété 'Medly', non dormante et productive. Les premiers résultats montrent qu'il est possible d'obtenir des descendants avec le même niveau de dormance estivale que 'Kasbah' et une productivité supérieure à celle de 'Medly'. Il est envisagé d'élargir l'étude à des populations de dactyle, dormantes l'été et plus ou moins résistantes au froid, d'origines géographiques variées. Le but est de mieux comprendre les déterminismes génétiques et éco-physiologiques des dormances estivale et hivernale ainsi que le lien avec le potentiel de production. Ces connaissances permettront de piloter la sélection de variétés combinant des caractères d'adaptation à la sécheresse sévère (gamme de dormance estivale et hivernale) et des exigences de production.

- Valoriser d'autres innovations

Du **matériel innovant** pourrait venir de la prospection de populations spontanées dans des zones à climatologie originale (par exemple des régions à découplage partiel entre température et aridité : Atlas marocain, Mitidja en Algérie, Anatolie, les zones d'altitude du Proche-Orient..) ou des populations à morphogenèse également originale (fétuque élevée rhizomateuse du sud du Portugal, luzernes « mielga » rampantes en Espagne...). Des questions spécifiques se posent pour les légumineuses à utiliser pour les zones qui deviendraient encore plus sèches qu'en zone méditerranéenne actuelle car la maîtrise de la production de semences à échelle industrielle est essentielle (exemple de l'Australie dans le cas des *Medicago* annuelles et du trèfle souterrain).

Les techniques de sursemis d'espèces et de variétés productives dans des peuplements constitués d'espèces très pérennes (à dormance estivale) pourraient être une solution pour assurer à la fois une certaine productivité et des objectifs de couverture des sols. D'une façon générale, la solution consistant à répondre à la sécheresse par mélange d'espèces ou d'écotypes très différemment adaptés pose la question du maintien à long terme du (ou des) constituants qui sont dominés à une période donnée de l'année. Des recherches sont en cours pour identifier les règles d'assemblage optimales des espèces et des cultivars en mélange.

Le réchauffement climatique pourrait augmenter les risques d'attaques de ravageurs. Dans certains pays comme l'Australie ou la Nouvelle-Zélande (régions du nord), il est impossible d'utiliser des variétés sans la présence de champignons endophytes protecteurs. Ceux-ci peuvent toutefois s'avérer toxiques pour les herbivores. Cela implique à la fois un travail de sélection sur le binôme endophyte/génotype mais aussi sur les composés secondaires (profils alcaloïdes) des endophytes.

Conclusions

La pérennité des prairies est un objectif incontournable pour fournir à la fois un service économique (compétitivité et productivité du système) et environnemental (préservation des sols, stockage du carbone). Le défi est donc d'assurer un bon niveau de production sans affecter la pérennité des couverts herbacés alors que les sécheresses deviendront plus intenses et plus fréquentes. Pour certains objectifs tels que la résistance aux maladies et ravageurs, le changement climatique ne modifie pas les programmes de sélection en cours mais devra les actualiser pour faire face à l'émergence de nouvelles maladies ou sensibilités. De même, l'amélioration de la digestibilité des fourrages et de leur appétence au pâturage reste un objectif d'amélioration à poursuivre.

Le challenge posé à l'amélioration est donc de choisir la ou les quelques voies qui seront les plus efficaces à moyen terme (20 ans en moyenne pour évaluer un nouvel idéotype), plutôt en continuité qu'en rupture avec l'acquis, et en tenant compte de toutes les facettes d'une production fourragère dans des systèmes de culture encore largement en cours de définition. Cette réflexion montre la complexité de la sélection des espèces fourragères prairiales pour répondre adéquatement au

changement climatique d'autant que la production de semences devra toujours rester compétitive sur le plan économique. De plus, la définition des idéotypes du futur doit s'appuyer aussi sur les innovations techniques qui peuvent être associées/développées pour les valoriser (sursemis, semis direct, récolte - battage - triage des semences...).

L'amélioration végétale ne doit donc pas uniquement être réfléchiée en fonction du potentiel physiologique des plantes pour répondre aux évolutions climatiques mais également en fonction de l'évolution des pratiques agricoles selon l'environnement socio-économique des exploitations. Il ne s'agit pas de vouloir transposer directement des modèles déjà existants dans d'autres régions qui préfigureraient l'environnement climatique prédit en France pour les décennies à venir mais bien de raisonner les idéotypes fourragers souhaitables, adaptés à l'environnement français et européen, en liaison avec les politiques publiques agricoles associant des objectifs de production et de respect de l'environnement.

Remerciements : Cette réflexion a été menée en partie dans le projet INRA ACCAF 'Climagie' : 'Analyse et valorisation des stratégies inter- et intra-spécifiques pour adapter les prairies au changement climatique'.

Références bibliographiques

- BRISKE D.D., FUHLENDORF S.D., SMEINS F.E. (2003) : "Vegetation dynamics on rangelands: a critique of the current paradigms", *Journal of Applied Ecology*, 40:601-614.
- BURNER D.M., BALASKO J.A., OBRIEN P.M. (1988) : "Attributes of tall fescue germplasm of diverse geographic origin", *Crop Science*, 28:459-462.
- CIAIS P., REICHSTEIN M., VIOVY N., GRANIER A., OGEE J., ALLARD V., AUBINET M., BUCHMANN N., BERNHOFER C., CARRARA A., CHEVALLIER F., DE NOBLET N., FRIEND A.D., FRIEDLINGSTEIN P., GRUNWALD 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., VALENTINI R. (2005) : "Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003", *Nature*, 437:529-533.
- CLIMSEC (2012) : *Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol*, http://www.opcc-ctp.org/etudes/2_fmaif_rapport_final_v2.2_2011.pdf, pp. 72.
- DURAND J.L., BERNARD F., LARDY R., GRAUX I. (2010) : "Climate change and grassland: the main impacts", N. Brisson et F. Levrault (éds.), *Green book of the CLIMATOR project - Climate change, agriculture and forests in France: simulations of the impacts on the main species*, ADEME, Paris, 181-190.
- FASULLO J.J., TRENBERTH K.E. (2012) : "A less cloudy future: the role of subtropical subsidence in climate sensitivity", *Science*, 755-756.
- GHEQUIÈRE M. (2007) Note sur la diversité des variétés de *Festulolium*. *Fourrages*, 191: 377-379.
- GHEQUIÈRE M., MOUSSET C. (2004) *Festulolium* : définitions et perspectives. *Fourrages*, 176: 479-492.
- GHEQUIÈRE M. HUMPHREYS M.W., ZWIERZYKOWSKI Z. (2010) *Festulolium*. In: Boller B, Posselt UK, Vernonesi F (eds) *Fodder Crops and Amenity Grasses, Handbook of plant breeding*, 293-316, Springer Science+Business Media LLC. DOI: 10.1007/978-1-4419-0760-8_12
- HECTOR A., SCHMID B., BEIERKUHNLIN C., CALDEIRA M.C., DIEMER M., DIMITRAKOPOULOS P.G., FINN J.A., FREITAS H., GILLER P.S., GOOD J., HARRIS R., HOGBERG P., HUSS-DANELL K., JOSHI J., JUMPPONEN A., KORNER C., LEADLEY P.W., LOREAU M., MINNS A., MULDER C.P.H., O'DONOVAN G., OTWAY S.J., PEREIRA J.S., PRINZ A., READ D.J., SCHERER-LORENZEN M., SCHULZE E.D., SIAMANTZIOURAS A.S.D., SPEHN E.M., TERRY A.C., TROUMBIS A.Y., WOODWARD F.I., YACHI S., LAWTON J.H. (1999) : "Plant diversity and productivity experiments in European grasslands", *Science*, 286:1123-1127. DOI: 10.1126/science.286.5442.1123.
- IMFREF (2012) : *Impact des changements anthropiques sur la fréquence des phénomènes extrêmes de vent de température et de précipitations*, (http://imfref.mediasfrance.org/web/documents/downloads/rapport_final_imfref.pdf), 60 p.
- IPCC (2007) : *International Panel of Climatic changes. Fourth assessment report (AR4)*, New-York.
- JADAS-HÉCART J., GILLET M. (1978) Note on agronomic characters of hybrids between european and mediterranean tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) before and after doubling chromosome number – Effect of selection within amphiploids. *Annales de l'Amélioration des Plantes* 28 (5): 501-511.

- KIRWAN L., LUESCHER A., SEBASTIA M.T., FINN J.A., COLLINS R.P., PORQUEDDU C., HELGADOTTIR A., BAADSHAUG O.H., BROPHY C., CORAN C., DALMANNSDOTTIR S., DELGADO I., ELGERSMA A., FOTHERGILL M., FRANKOW-LINDBERG B.E., GOLINSKI P., GRIEU P., GUSTAVSSON A.M., HOGLIND M., HUGUENIN-ELIE O., ILIADIS C., JORGENSEN M., KADZIULIENE Z., KARYOTIS T., LUNNAN T., MALENGIER M., MALTONI S., MEYER V., NYFELEL D., NYKANEN-KURKI P., PARENTE J., SMIT H.J., THUMM U., CONNOLLY J. (2007) : “Evenness drives consistent diversity effects in intensive grassland systems across 28 European sites”, *Journal of Ecology*, 95:530-539. DOI: 10.1111/j.1365-2745.2007.01225.x.
- KNIGHT R. (1973) : “Climatic adaptation of populations of cocksfoot (*Dactylis glomerata* L.) from Southern France”, *Journal of Applied Ecology*, 10:1-12. DOI: 10.2307/2404710.
- LEHNER B., G, CZISCH G. (2005) : “The impact of global change on the hydropower potential of Europe: a model-based analysis”, *Energy Policy*, 33:839-855.
- LELIÈVRE F., VOLAIRE F. (2009) : “Current and potential development of perennial grasses in rainfed Mediterranean farming systems”, *Crop Science*, 49:2371-2378.
- LELIÈVRE F., SATGER S., SALA S., VOLAIRE F. (2010) : “Climate change at the temperate-Mediterranean interface in southern France and impacts on grasslands production”, *Options Méditerranéennes*, 187-192.
- LELIÈVRE F., SALA S., RUGET F., VOLAIRE F. (2011) : “Evolution climatique du Sud de la France 1950-2009, Projet CLIMFOUREL PSDR3, Régions L-R, M-P, R-A. ”, *Série Les Focus*, PSDR3:12.
- LEVITT J.V. (1972) (Ed.) : *Responses of Plants to Environmental Stress*, Academic Press, New-York.
- LUDLOW M.M. (1989) : “Strategies of response to water stress”, K.H. Kreeb *et al.* (eds.), *Structural and functional responses to environmental stresses: water shortage*, SPB Academic Publishing BV, The Hague. 269-281.
- MÉTÉO-FRANCE (2012) : *Les changements climatiques en France*, (http://climat.meteofrance.com/chgt_climat/rechauffement), 4 p.
- MINGUEZ M.I., RUIZ-RAMOS M., DIAZ-AMBRONA C.H., QUEMADA M., SAU F. (2007) : “First-order impacts on winter and summer crops assessed with various high-resolution climate models in the Iberian Peninsula”, *Climatic Change*, 81:343-355.
- MOUSSET C. (2000) Rassemblement, utilisation et gestion des ressources génétique de dactyle à l’INRA de Lusignan. *Fourrages*, 162: 121-139.
- OLESEN J.E., CARTER T.R., DIAZ-AMBRONA C.H., FRONZEK S., HEIDMANN T., HICKLER T., HOLT T., MINGUEZ M.I., MORALES P., PALUTIKOF J.P., QUEMADA M., RUIZ-RAMOS M., RUBAEK G.H., SAU F., SMITH B., SYKES M.T. (2007) : “Uncertainties in projected impacts of climate change on European agriculture and terrestrial ecosystems based on scenarios from regional climate models”, *Climatic Change*, 81:123-143.
- POIRIER M., DURAND J.L., VOLAIRE F. (2012) : “Inter- and intra-specific variability in persistence of perennial grass production under water deficits and heat waves”, *Global Change Biology*, 18(12):3632-3646.
- SAMPOUX J.P., METRAL R., GHESQUIERE M., BAUDOUIN P., BAYLE B., BEGUIER V., BOURDON P., CHOSSO.; J.F., DE BRUIJN K., DENEUFBOURG F., GALBRUN C., PIETRASZEK W., THAREL B., VIGUIE A. (2011) : “Breeding perennial grasses for forage usage: An experimental assessment of trait changes in diploid perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) cultivars released in the last four decades”, *Field and Crop Science*, 123, 117-129.
- SUPIT I., VAN DIEPEN C.A., DE WIT A.J.W., KABAT P., BARUTH B., LUDWIG F. (2010) : “Recent changes in the climatic yield potential of various crops in Europe”, *Agricultural Systems*, 103:683-694. DOI: 10.1016/j.agsy.2010.08.009.
- TILMAN D., WEDIN D., KNOPS J. (1996) : “Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems”, *Nature*, 379:718-720.
- TOOKER J.F., FRANK S.D. (2012) : “Genotypically diverse cultivar mixtures for insect pest management and increased crop yields”, *Journal of Applied Ecology*, 49:974-985. DOI: 10.1111/j.1365-2664.2012.02173.x.
- TRNKA M., OLESEN J.E., KERSEBAUM K.C., SKJELVAG A.O., EITZINGER J., SEGUIN B., PELTONEN-SAINIO P., ROTTER R., IGLESIAS A., ORLANDINI S., DUBROVSKY M., HLAVINKA P., BALEK J., ECKERSTEN H., CLOPPET E., CALANCA P., GOBIN A., VUCETIC V., NEJEDLIK P., KUMAR S., LALIC B., MESTRE A., ROSSI F., KOZYRA J., ALEXANDROV V., SEMERADOVA D., ZALUD Z. (2011) : “Agroclimatic conditions in Europe under climate change”, *Global Change Biology*, 17:2298-2318. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2011.02396.x.
- TUBIELLO F.N., SOUSSANA J.F., HOWDEN S.M. (2007) : “Crop and pasture response to climate change”, *Proc. of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104:19686-19690.
- VOLAIRE F., NORTON M. (2006) : “Summer dormancy in perennial temperate grasses”, *Annals of Botany*, 98, 927-933.
- VOLAIRE F., LELIEVRE F. (2010) : “Role of Summer Dormant Perennial Grasses as Intercrops in Rainfed Mediterranean Vineyards”, *Crop Science*, 50:2046-2054. DOI: 10.2135/cropsci2010.01.0021.