

Quelles stratégies de recherche pour favoriser l'émergence de systèmes fourragers innovants ?

P. Carrère¹, R. Delagarde², J.-C. Emile³, M. Lherm^{4a, b}, R. Martin-Clouaire⁵, M. Tichit⁶, S. Plantureux^{7a, b}

L'innovation est souvent mise en avant comme une réponse attendue aux grandes questions sociétales. Dans les faits, le processus est plus complexe. Il mobilise un réseau d'acteurs qui, à partir d'un élément de créativité, élabore une réponse dans un contexte donné, réponse destinée à une population bien ciblée. Qu'en est-il lorsqu'il s'agit de l'appliquer aux systèmes fourragers ?

RÉSUMÉ

A partir de l'analyse i) des enjeux technico-économiques et environnementaux et ii) de l'évolution du contexte global (climatique, socio-économique), un exercice de réflexion ciblé sur les systèmes fourragers a permis de dégager quelques pistes en rupture avec l'existant. Une meilleure compréhension du fonctionnement des écosystèmes naturels ouvre des pistes d'innovation. Par exemple, la diversification des services rendus par les systèmes fourragers permet d'aborder sous un angle nouveau les questions d'autonomie fourragère, d'utilisation plus parcimonieuse des ressources ou de réduction de la vulnérabilité aux aléas (climatiques ou économiques). Les démarches à privilégier pour conduire et évaluer l'innovation dans ce domaine doivent reposer sur des références scientifiques solides et intégrer une co-construction précoce avec les acteurs concernés.

SUMMARY

What research strategy for promoting the emergence of innovative forage systems?

The emergence of innovative solutions for forage systems (FS) must take into account the evolution of the global context. This article introduces the results of a concertation aimed at making new solutions emerge as alternatives to existing systems in connection with technical, economic, social and environmental challenges. We will be examining how a better understanding of the functioning of natural ecosystems contributes to opening the way to new alternatives for FS. For example, the diversification of services rendered by FS sheds new light on issues such as forage self-sufficiency, the parsimonious use of resources, and ways of reducing the vulnerability of FS in the face of climatic and economic challenges. Reliable strategies for conducting and assessing innovation in this field must be based on solid scientific evidence and integrate early co-construction with target players.

AUTEURS

1 : INRA, UR874 Ecosystèmes Prairiaux, 5, chemin de Beaulieu, F-63039 Clermont-Ferrand ; pascal.carrere@clermont.inra.fr

2 : INRA, UMR1348 Physiologie, Environnement et Génétique pour l'Animal et les Systèmes d'Élevage, F-35590 Saint-Gilles

3 : INRA, UE1373 Fourrages Environnement Ruminants, Lusignan, route de Saintes, BP 6, F-86600 Lusignan

4a : INRA, UMR1213 Herbivores, Theix, F-63122 Saint-Genès-Champanelle,

4b : Clermont Université, VetAgro Sup Lyon, UMR Herbivores, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand

5 : INRA, UR0875 Mathématiques et Informatique Appliquées, Toulouse, F-31326 Castanet-Tolosan cedex

6 : INRA, UMR1048 SADAPT Sciences pour l'Action et le Développement : Activités, Produits, Territoires, AgroParisTech, 16, rue Claude Bernard, F-75231 Paris cedex 05

7a : Université de Lorraine, Laboratoire Agronomie et Environnement, UMR 1121, F-54500 Vandoeuvre

7b : INRA, Laboratoire Agronomie et Environnement, UMR 1121, F-54500 Vandoeuvre

MOTS CLÉS : Agriculture durable, évolution, fourrage, innovation, prairie, recherche scientifique, services écosystémiques, système fourrager.

KEY-WORDS : Change in time, ecosystem services, forage, forage system, grassland, innovation, scientific research, sustainable agriculture.

RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE : Carrère P., Delagarde R., Emile J.C., Lherm M., Martin-Clouaire R., Tichit M., Plantureux S. (2014) : "Quelles stratégies de recherche pour favoriser l'émergence de systèmes fourragers innovants ?", *Fourrages*, 217, 57-68.

Au sein d'une ferme dédiée à l'élevage, le système fourrager (SF) peut être défini comme l'ensemble organisé des moyens de production (surfaces, espèces et variétés végétales, etc.), des processus biologiques, des processus décisionnels et des actes techniques destinés à produire de la biomasse végétale pour l'alimentation des herbivores (MARTIN, 2009, adapté de DURU *et al.*, 1988). Au-delà de cette définition première du SF, il convient également de tenir compte de la dimension multifonctionnelle de ces systèmes, notamment *via* leur capacité à produire des biens et services environnementaux et sociaux (CARRÈRE *et al.*, 2012a). MEYNARD *et al.* (2006) considèrent que, dans le contexte actuel, accoler le terme « innovant » à système fourrager implique de se rendre capable de **concevoir et d'évaluer des systèmes en rupture forte avec l'existant**. Il s'agirait, par exemple, d'imaginer des systèmes fourragers sans irrigation et/ou sans pesticide, adaptés à des événements climatiques extrêmes, ou permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'énergie fossile par unité de produit animal. La prise en compte de l'échelle à laquelle s'élabore cette innovation constitue un élément important de la réflexion. Si la conception de SF est classiquement envisagée au niveau de l'exploitation, **le niveau du territoire apparaît désormais incontournable**, car il permet de définir les enjeux justifiant la rupture (approche *ex ante*) mais également d'évaluer les nouveaux SF développés (approche *ex post*).

Cet article est une **synthèse de la réflexion conduite par un groupe pluridisciplinaire** (les auteurs ; S. PLANTUREUX, coordinateur) sur les systèmes fourragers innovants. L'objectif de l'article est de porter à la connaissance d'un large public (éleveurs, techniciens, scientifiques, porteurs d'enjeux) les éléments qui ont guidé ce travail et les sorties qui en ont résulté. La définition du cadre de développement des innovations étant essentielle pour en saisir la portée, nous débiterons notre propos par une analyse du contexte et des enjeux, qui constitue également un support à l'identification de scénarios d'évolution possibles des SF. Nous présenterons ensuite quelques pistes novatrices autour des thèmes de la diversification et de la sécurisation des SF, de l'utilisation parcimonieuse des ressources, de la place des SF dans un continuum plus large allant de la parcelle au territoire. Cela nous amènera à nous interroger sur les besoins en outils de gestion des SF et d'accompagnement de la profession. La dernière partie de l'article argumentera sur la nécessité de renforcer les bases scientifiques et l'acquisition de références pour porter un processus d'innovation en rupture avec les pratiques actuelles et source de plus-value pour les publics bénéficiaires (en l'occurrence les éleveurs, les consommateurs ou les citoyens).

1. Enjeux et contextes

Des **enjeux technico-économiques** : Le contexte de production se définit à l'échelle nationale et internationale, dans un environnement économique et législatif incertain prônant une réduction de la dépendance vis-à-

vis des aides publiques et dans un contexte de demande mondiale de produits alimentaires en hausse susceptible de créer une tension sur le marché. Le renchérissement du coût des intrants (fertilisation, alimentation animale, énergie) conduit également à s'interroger sur des SF plus parcimonieux, voire même autonomes. Dans ce contexte, les SF doivent contribuer à la rentabilité et à la compétitivité des exploitations agricoles et des filières agroalimentaires. La rentabilité des systèmes de production dépendra de leur capacité à produire un fourrage adapté (qualité, disponibilité, accessibilité) aux besoins des élevages, mais également de la production d'autres services. Dans un contexte de changement climatique, les SF devront par ailleurs s'adapter aux évolutions tendancielles, mieux résister aux variations extrêmes du climat et maîtriser les risques épidémiologiques. Deux grandes options non exclusives sont envisageables pour inventer les SF du futur. La première est de concevoir des SF capables de produire à un coût faible (tout en respectant des seuils environnementaux et sanitaires) des ressources fourragères permettant une production animale répondant aux normes technologiques de l'industrie agroalimentaire. La seconde s'oriente sur des SF aptes à fournir des produits dont les qualités perçues par le consommateur (santé, goût) permettront un prix de vente plus élevé, en y intégrant des dimensions environnementales ou sociales. Les innovations technologiques attendues concerneront d'une part le mode de production et de traitement des ressources fourragères (nouvelles cultures, création variétale, nouvelles pratiques) et d'autre part le mode de production animale (autonomie fourragère complète, sélection animale). Dans une perspective de sécurisation à long terme de la disponibilité des ressources fourragères et en accord avec les principes de l'agroécologie déclinés aux productions animales (DUMONT *et al.* 2013), il semblerait indispensable d'accompagner les éleveurs dans la conception et le pilotage de systèmes fourragers innovants.

Des **enjeux sociaux** : les attentes des différents acteurs de la société (éleveurs, consommateurs, citoyens...) sont souvent diverses, diffuses et pas forcément compatibles entre elles. En ce qui concerne les SF, elles s'expriment au travers de leur acceptabilité par les producteurs et la société, et de la production de services qui leur sont utiles. Le lien entre les attentes et les services peut être assez indirect. En ce qui concerne l'élevage, c'est un acteur essentiel des territoires ruraux au sein desquels il contribue à la production de multiples biens et services (alimentation, santé humaine, qualité des produits, entretien des paysages, emploi, dynamisme de la vie rurale), même s'ils sont encore peu reconnus (RYSCHAWY *et al.* 2013). Par ailleurs, certains modes d'élevage, tels que l'élevage industriel, font l'objet de fortes critiques ; celles-ci concernent les impacts sur le climat (émission de GES), sur les ressources naturelles (pression et pollution), ainsi que sur le bien-être animal ou la traçabilité des produits. Les SF constituent l'un des éléments contribuant à ces enjeux sociaux des productions animales. De plus, les évolutions démographiques des éleveurs et leurs aspirations (pénibilité du travail,

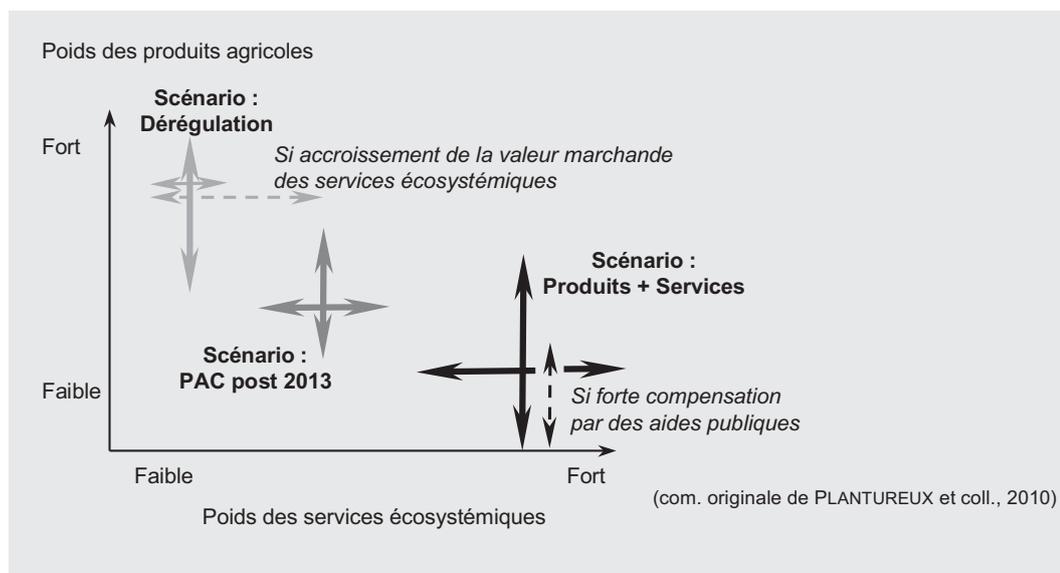


FIGURE 1 : Scénarios de positionnement des systèmes de production agricole. Pour chaque scénario, les flèches représentent l'amplitude possible du poids des produits agricoles vs celui des services écosystémiques dans le revenu agricole.

FIGURE 1 : Positioning scenarios of agricultural systems. Arrows for each scenario materialize the possible amplitude of the weight of agricultural products vs ecosystem services in farming income.

charge mentale, conditions de travail) impacteront les SF de demain. Par exemple, si l'introduction des robots de traite réduit l'astreinte, elle modifie profondément la conduite du pâturage. Les SF doivent donc répondre à cet enjeu de vivabilité pour les éleveurs. L'émergence, encore timide, de circuits courts pour les produits animaux invite également à reconsidérer la localisation des SF.

Des enjeux environnementaux : En matière d'environnement, il s'agit en premier lieu de limiter les impacts négatifs des activités d'élevage, c'est-à-dire l'ensemble des pollutions diffuses de l'eau, de l'air ou des sols, mais également les pertes de biodiversité imputables aux SF (par exemple suite à un retournement de prairies ou un arrachage de haies). La problématique de durabilité implique également une meilleure valorisation des ressources, ce qui correspond à une gestion efficace et plus parcimonieuse des ressources abiotiques (eau, énergie, minéraux et ressources non renouvelables) et à une valorisation des ressources biotiques (potentiel d'adaptation génétique, synergie et facilitation entre espèces, lutte intégrée), voire foncière (équilibre à l'échelle d'un territoire entre les différentes utilisations des terres : usage urbain, agricole, forestier, etc.). Cela nécessite aussi d'assurer, dans la mesure du possible, le renouvellement des ressources, par exemple en développant des pratiques vertueuses sur la gestion de la fertilité du sol. Une perspective plus récente intègre la production des services écosystémiques fournis par les agroécosystèmes à la société. Ces services recouvrent, par exemple, la préservation ou la création de biodiversité, la séquestration du carbone, le recyclage d'éléments polluants, notamment organiques, mais également la gestion et la conservation de paysages. Dans toutes ces situations les SF devront faire face à des changements climatiques, dont on ne prévoit pas totalement les modalités, mais qui se traduiront probablement par une forte variabilité et un caractère très aléatoire.

L'analyse de ces enjeux a servi de base à la construction de scénarios d'évolution des systèmes de production agricole raisonnés notamment en fonction du poids relatif entre production agricole et services écosys-

témiques (figure 1). Il est probable que ces scénarios coexisteront à l'échelle nationale, mais leur proportion et leur répartition territoriale restent encore incertaines. Ils se traduiront par des objectifs différenciés des SF, dont la recherche d'innovation doit tenir compte.

2. Un besoin d'idées nouvelles

Depuis quelques années l'innovation est mise en avant comme source potentielle de réponse aux grandes questions sociétales : compétitivité des filières, réponse au changement climatique, durabilité des activités. Pourtant, il s'agit d'un processus complexe (LE MASSON *et al.*, 2006), qui nécessite la mise en convergence d'un élément générateur, le plus souvent novateur, d'un milieu ou d'un réseau innovateur (MAILLAT *et al.*, 1993) et d'un public cible. Si la créativité est du domaine personnel et intimement liée à la personnalité de celui qui émet l'idée, l'innovation reste un travail collectif d'appropriation des idées, de reconstruction et de concrétisation. Dans cet article, nous nous limitons à brosser des « idées nouvelles », en rupture avec l'existant, et qui peuvent être le terreau de pistes d'innovation applicables aux SF.

■ Diversifier les caractéristiques et les objectifs des systèmes fourragers

L'intensification fourragère s'est faite grâce à un recours croissant aux intrants et en s'appuyant sur une simplification des espèces fourragères utilisées. Bien que d'une grande diversité, les surfaces fourragères sont aujourd'hui exploitées essentiellement dans l'objectif d'alimenter le troupeau. Leurs performances posent cependant les problèmes de leur durabilité environnementale et de leurs limites en matière technique et économique (procédés de récolte et de conservation, coût des intrants). Cependant, ces surfaces assurent aussi des services écosystémiques reconnus (MEA, 2005 ; AMAUD et CARRÈRE, 2012) tels que la séquestration du carbone (KLUMPP *et al.*, 2011), la protection anti-érosive (OUVRY *et*

al., 2010), le maintien de la biodiversité (voir la revue de TICHIT *et al.*, 2012), sans que ces services constituent actuellement des objectifs de pilotage explicites. Sur la base de notre connaissance des processus impliqués dans le fonctionnement et la stabilité des écosystèmes (WALLACE, 2007), il est envisageable de promouvoir des modalités de gestion qui favoriseraient les processus écologiques à même de réduire partiellement ou totalement les intrants chimiques, énergétiques et l'irrigation. Cette **stratégie consistant à valoriser au mieux les processus écologiques est au cœur des réflexions en agroécologie** (voir WEZEL *et al.*, 2009, pour l'évolution de ce concept depuis 1930). Des travaux récents ayant décliné les principes de l'agroécologie aux productions animales montrent que de tels systèmes seraient de nature à augmenter la marge nette des éleveurs et à diminuer les impacts environnementaux négatifs (DUMONT *et al.*, 2013). Par ailleurs, en s'appuyant sur les propriétés de régulation interne des écosystèmes, on pourrait imaginer réduire leur vulnérabilité aux aléas et favoriser leur résilience (TILMAN *et al.*, 2006). Ceci implique d'explorer les possibilités de substitution entre intrants et processus écologiques, d'évaluer le rôle de la diversité biologique dans les services rendus (ISBELL *et al.*, 2011) et d'examiner les conséquences de cette diversité en matière de gestion par l'éleveur (TICHIT *et al.*, 2013).

Diversifier et valoriser les sorties de ces systèmes constitue un enjeu fort. Il s'agirait de concevoir des **productions fourragères susceptibles soit d'associer plusieurs produits** (par exemple associer à la production de fourrage une production de biomasse énergétique ; voir BENKE et ELSASSER, 2009 ; GHYSEL *et al.*, 2010), **soit de valoriser des services particuliers du système** (par exemple stockage de carbone, capacité d'accueil d'auxiliaires des cultures). Dans le premier cas - entendu que la priorité restera l'alimentation des troupeaux - selon les contextes économiques ou climatiques, l'une ou l'autre des utilisations pourrait être privilégiée, offrant des opportunités et des marges de manœuvre aux éleveurs. Il

convient également d'explorer la complémentarité entre des cultures de vente et des cultures fourragères pratiquées sur une même parcelle, sur des périodes décalées ou non au sein de la même année. Cette approche permettrait de faire émerger des propriétés positives nouvelles, telles que limiter l'utilisation d'intrants chimiques destinés à la culture (pesticides, fertilisants), ou ouvrir la voie à de nouvelles valorisations des plantes (par exemple, dans le cas de céréales pâturées, le grain est destiné à la vente ou à l'autoconsommation, le reste de la plante est valorisé en fourrage par la fauche ou la pâture, figure 2a). La coexistence des productions fourragères avec l'arboriculture ou la viticulture (sur le mode de l'agroforesterie) constitue une autre facette de cette piste d'innovation. Dans le second cas, la reconnaissance de la multifonctionnalité des surfaces fourragères (CARRÈRE *et al.*, 2012a) par les filières ou les décideurs reste un élément incontournable pour pouvoir conduire à une rémunération spécifique des services rendus et en faire un objectif de pilotage (voir KINZIG *et al.*, 2011). Dans ce cadre, la multifonctionnalité devient une stratégie de minimisation du risque économique lié à la monoproduction. L'innovation associée à cette vision peut mettre en jeu de nouvelles espèces végétales, une gestion différente d'espèces actuellement utilisées, ou jouer sur les associations ou les communautés d'espèces - qu'elles soient créées artificiellement (HOBBS *et al.*, 2006) ou qu'elles valorisent des associations existantes.

■ Autonomie, sécurisation et parcimonie d'utilisation des ressources

Assurer la durabilité des systèmes d'élevage ou la pérennité de l'exploitation sur le territoire passe par une sécurisation de la ressource herbagère et une recherche d'autonomie fourragère. Il s'agit pour l'éleveur de parvenir à nourrir le troupeau et produire du lait ou de la viande avec des fourrages de l'exploitation ou de la zone de production mais également de valoriser et d'entretenir une ressource locale. Dans de nombreux cas, les SF mis en

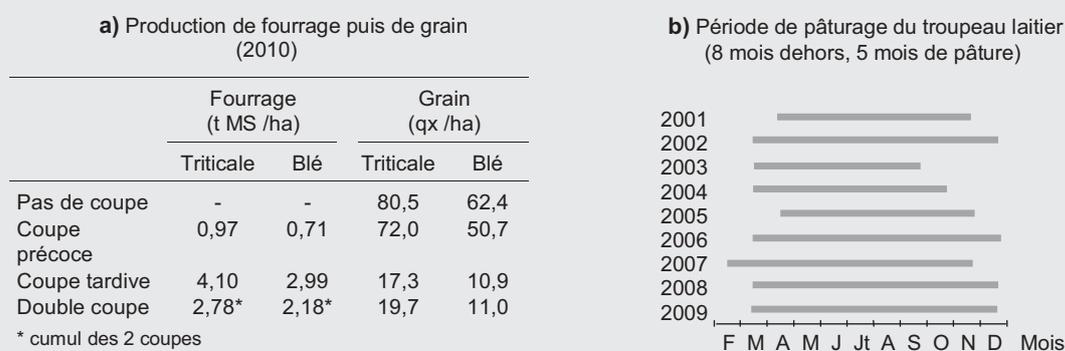


FIGURE 2 : Observations de l'Unité expérimentale Fourrages Environnement Ruminants de l'INRA Lusignan : a) production de fourrage puis de grain, selon la modalité d'exploitation et selon l'espèce en 2010, b) calendrier de pâturage du troupeau laitier (65 vaches laitières) sur les 10 dernières années (source : EMILE, 2010).

FIGURE 2 : Data collected by the Forage Environment Ruminant Experimental Unit of the INRA in Lusignan: a) production of forage and grain, based on conditions of use and plant species in 2010, b) grazing calendar of the dairy herd (65 dairy cows) over the last 10 years (source : EMILE, 2010).

œuvre dans les systèmes intensifs (notamment laitiers) présentent une faible durabilité environnementale (cf. LE GALL *et al.*, 2009). Ils s'appuient principalement sur des productions fourragères très productives, mais annuelles ou de faible durée (PEYRAUD *et al.*, 2009). **Augmenter la pérennité des fourrages tout en maintenant leur productivité et leur qualité serait un moyen d'assurer une meilleure durabilité des SF.** En limitant le travail du sol, l'éleveur réaliserait des économies en matériel et en énergie (GERMON *et al.*, 2007) et contribuerait également à rendre des services importants : stockage du C (ARROUAYS *et al.*, 2002), lessivage et érosion moindres (BALESDENT *et al.*, 2000) ou sécurisation des systèmes fourragers vis-à-vis des variations climatiques (MOSNIER *et al.*, 2013). En outre, une occupation plus pérenne des sols limiterait les pertes en eaux et les émissions de gaz à effet de serre (SOUSSANA *et al.*, 2010b). Cette voie d'innovation nécessite de développer des idéotypes (d'espèces fourragères ou de races animales adaptées) ou des successions d'espèces annuelles auto-ressémées, voire des associations ou mélanges d'espèces productifs avec plusieurs coupes. Toutefois, il faudra tenir compte des pressions évolutives qui ont contribué aux bonnes performances des individus, car ce ne sont pas les mêmes génotypes qui optimiseront les services à l'échelle individuelle ou à celle de la population (voir WEINER, 2003). Une rupture forte serait la mise au point de céréales pérennes (voir WAGONER, 1990), en s'intéressant aux caractéristiques génétiques des ancêtres des céréales annuelles actuelles.

Les évolutions prédites du climat (PIGEON *et al.*, 2013) permettent d'envisager de **faire pâturer les animaux toute l'année** (POTTIER *et al.*, 2001) **dans de nombreuses régions d'élevage.** L'augmentation du temps de séjour des animaux en extérieur (voir figure 2b) peut s'envisager du fait d'une augmentation de la durée de la saison de croissance de l'herbe et/ou d'une moindre rigueur des hivers. Même si cela nécessite une adaptation des pratiques (AGABRIEL *et al.*, 2012), pâturer toute l'année limiterait les impacts environnementaux des systèmes d'élevage. En effet, cela se traduirait par une réduction des besoins en bâtiments d'élevage, ce qui serait à même d'améliorer l'impact environnemental de nombreux systèmes d'élevage (KOELLNER *et al.*, 2013), ne serait-ce qu'en diminuant le stockage des déjections. La réduction des besoins en stocks fourragers entraînerait une réduction de la charge de travail et du coût énergétique lié à la récolte. Les revenus seraient consolidés par une diminution des coûts de production en augmentant l'autonomie du système par une exploitation directe de l'herbe par l'animal. Cependant, un verrou actuel fort réside dans la production limitée de ressources fourragères pendant la période hivernale. Cette innovation peut s'envisager soit par l'utilisation de nouvelles espèces fourragères ou l'amélioration d'espèces existantes, soit par la conception d'espèces ou de systèmes permettant la gestion de stocks « sur pied » conservant une qualité fourragère répondant aux besoins des animaux et aux enjeux de biodiversité (JOUVEN *et al.*, 2010). L'utilisation du pâturage de ressources herbacées forestières ou de

petits ligneux (AGREIL *et al.*, 2005), en période estivale comme en période hivernale, est également à considérer. Il faudra cependant veiller à l'impact de la présence permanente des animaux sur les pâtures, notamment sur la biodiversité végétale et la capacité d'accueil de la faune, insectes pollinisateurs notamment (FARRUGGIA *et al.*, 2012a), et sur l'impact des rejets en période hivernale.

Par ailleurs, l'augmentation de l'occurrence d'années à bilans hydriques déficitaires (DURAND *et al.*, 2010) fait peser un risque déjà perceptible sur la sécurité des systèmes fourragers. Au-delà de ce risque, l'utilisation de l'eau pose la question de la compétition avec d'autres utilisations non agricoles, sources de tensions sociales (GEMENNE, 2013). Dans ce cas, il s'agira, afin de pallier les effets des sécheresses estivales sur la ressource fourragère, de **concevoir des systèmes fourragers durablement adaptés à des conditions sèches et/ou pouvant traverser des épisodes de sécheresse assez longs et fréquents.** Le système bioclimatique OasYs (NOVAK *et al.*, 2013, 2014) est l'une des premières tentatives pour répondre à ce défi en grandeur nature. Basé sur une approche agroécologique, il s'appuie sur une diversification des fourrages en termes d'espèces (VOLAIRE *et al.*, 2013) et d'associations (mise en place d'alternatives au maïs irrigué comme le sorgho), de périodes de production (cultures d'hiver de méteils qui esquivent le risque de sécheresse estival) et de modes d'exploitation (maximisation du pâturage par le pâturage hivernal ou les reports sur pieds, EMILE *et al.*, 2007), en interaction avec les systèmes de culture (figure 2a), afin de favoriser la résilience du système et de valoriser au mieux les différentes ressources. Ainsi, les systèmes à concevoir doivent i) supporter des périodes sèches et pouvoir rester viables sans eau supplémentaire afin de permettre une économie de la ressource en eau et en énergie (principe de parcimonie), ii) permettre la sécurisation du SF (large utilisation des légumineuses, recyclage des nutriments, dimensionnement des surfaces, gestions des stocks fourragers sur un pas de temps pluri-annuel) et iii) intégrer les trois piliers de la durabilité (économique, environnemental et social) susceptibles de légitimer l'image d'une agriculture responsable.

■ Une vision territorialisée des systèmes fourragers

Le modèle dominant des systèmes fourragers est celui de la gestion des ressources à l'échelle de l'exploitation, contrairement à d'autres moyens de production (aliments du bétail, fertilisants) où les solutions vont de l'autonomie complète à la dépendance extérieure totale. Pourtant, si on élargit la réflexion à l'ensemble des services potentiellement produits par les systèmes fourragers, cela impose de se positionner à une échelle plus large (INGRAM *et al.*, 2008). Il existe un enjeu à imaginer des formes d'organisation du territoire qui optimiseraient la production fourragère et les services marchands et non marchands rendus par ces surfaces

(HERVIEU, 2002). **Deux approches** sont actuellement envisagées pour réconcilier la production de biens et services : i) l'une considère **une spécialisation des territoires (land sparing) combinant des zones homogènes gérées pour maximiser les rendements et d'autres destinées à la conservation de la biodiversité ou à la production de services écosystémiques** ; ii) l'autre envisage **la coexistence sur un même espace (land sharing) de la production et de la conservation de la biodiversité** (FISCHER *et al.*, 2008). Des travaux récents montrent que, sur le territoire national, les stratégies optimisant la conciliation entre production et biodiversité sont beaucoup plus complexes que la dichotomie *sparing / sharing* (TEILLARD, 2012). Les importances relatives du *sparing* et du *sharing* diffèrent selon les contextes locaux, et le *sharing* reste la stratégie la plus étendue spatialement. Cette mutualisation du territoire, au cœur des deux stratégies, nécessite à la fois d'en réfléchir les bénéfices collectifs et individuels (MARIS, 2010), *via* l'optimisation et la sécurisation de fonctions fourragères et environnementales, mais également en considérant les modalités d'organisation. On peut ainsi imaginer que la production de fourrage par des céréaliers à destination d'éleveurs du même territoire constitue un levier pour allonger les rotations céréalières (bénéfiques environnementaux), en allégeant la charge de travail des éleveurs. Par ailleurs, de tels systèmes permettraient de valoriser les complémentarités entre types d'exploitations et d'augmenter les degrés de liberté pour concilier production fourragère et biodiversité. Il s'agirait de jouer sur l'organisation spatio-temporelle des modes de gestion pour améliorer les niveaux de biodiversité sans modifier la production (SABATIER *et al.*, 2011). Ceci nécessite de comprendre comment les variations spatio-temporelles d'intensité des modes de gestion jouent sur la forme des arbitrages production / biodiversité, et de jouer sur les coordinations entre exploitations (dimension collective des SF, voir SABATIER *et al.*, 2013).

Outre les aspects d'une coordination durable, il faut également prendre en compte les coûts induits de transports générés à l'échelle du territoire, car ces fourrages dits « grossiers » ont une valeur alimentaire peu concentrée qui nécessite de transporter de gros volumes (ce qui constitue souvent une limite opérationnelle à cette gestion collective des ressources). Si dans certaines régions (est du Bassin Parisien, nord de la France) on commence à remettre de l'élevage dans les zones de cultures, il pourrait également être envisageable de réintroduire un peu de culture dans les zones herbagères. Cela permettrait l'élaboration locale d'aliments concentrés bien que cela soit souvent difficile sur le plan agronomique. Ces systèmes de polyculture - élevage présentent un intérêt à l'échelle territoriale (voir *Innovations Agronomiques*, 22, octobre 2012) et peuvent constituer une voie pour atteindre une meilleure autonomie alimentaire. Il ne faut toutefois pas négliger que, sur un même territoire, les conditions pédoclimatiques sont souvent homogènes ce qui limiterait les capacités de compensation possibles en cas d'aléas (la dispersion du parcellaire pouvant dans ce cas précis représenter un atout pour l'exploitation en

répartissant les risques). Cette **relocalisation des productions** (fourrages/cultures de vente) pose bien entendu la **question de l'implantation des filières** qui doivent assurer des débouchés aux agriculteurs, dès lors qu'ils n'utilisent pas ces productions sur leur propre exploitation (voir MEYNARD *et al.*, 2013).

Une déclinaison particulière de cette approche territoriale concerne les zones périurbaines, dans lesquelles l'activité d'élevage soulève de nombreuses questions, compte tenu des nuisances potentielles pour les habitants et des contraintes notamment foncières pour les éleveurs. Dans l'idée de rapprocher le producteur du consommateur (filières courtes) et de valoriser les synergies entre ville et milieu rural, l'enjeu est ici de concevoir des systèmes fourragers périurbains qui se contenteraient d'une surface limitée mais en assurant une qualité paysagère à ces environnements. Ces systèmes agricoles de proximité intégreraient dans leur processus de production le recyclage de produits issus de l'activité urbaine (par ex. des déchets verts), tout en constituant des instruments de lien social entre agriculture et ville. Cette innovation conduit à repenser les schémas actuels de systèmes fourragers conçus pour un environnement rural où le jeu de contraintes et d'atouts est différent. Cette solution pourrait s'envisager en complémentarité avec du maraîchage en raison du foncier limité, et aussi pour élargir l'offre de produits pouvant être vendus directement en circuit court.

■ Quels outils de gestion des systèmes fourragers ?

La gestion des SF par les éleveurs deviendra de plus en plus exigeante, en raison de la multiplicité des enjeux et des objectifs à atteindre, d'une relative imprévisibilité de l'environnement physique, économique ou politique des systèmes fourragers et du niveau de complexité des SF. Les outils actuels d'aide au pilotage des SF, qui sont la plupart du temps trop partiels, ne suffiront pas pour répondre à cette attente. Le développement de nouveaux outils passe par un ensemble de solutions qui incluent :

- **des outils pour analyser les potentiels et les valeurs des surfaces prairiales** (CARRÈRE *et al.*, 2012b ; LAUNAY *et al.*, 2011 ; PLANTUREUX *et al.*, 2012 ; GRAUX *et al.*, 2013), diagnostiquer et optimiser la gestion de ressources (DELABY *et al.*, 2001 et 2012 ; MARTIN *et al.*, 2011b ; FARRUGGIA *et al.*, 2012b ; THEAU *et al.*, 2012) mais également considérer l'importance de la main d'œuvre, du foncier, des équipements et des intrants dans le processus de production ;

- **des outils qui s'intéressent aux processus de décision du gestionnaire** de production (MARTIN *et al.*, 2011a), en intégrant les considérations de court terme et de moyen terme (DURU, 2013), des attitudes réactives et anticipatoires, l'exploitation des opportunités et la maîtrise des risques, la gestion des moyens de production, l'existence d'objectifs plus ou moins antagonistes et des niveaux variés de connaissances et de maîtrise chez les éleveurs ;

- **la conception** (MARTIN *et al.*, 2013), en particulier, la co-construction **avec les éleveurs de modèles de systèmes fourragers** adaptés à de nouvelles conditions (MARTIN *et al.*, 2011c) et comportant une diversité de ressources fourragères. Sur ce dernier point, l'adaptation des systèmes fourragers - c'est-à-dire leur capacité à faire face aux fluctuations climatiques interannuelles comme aux évolutions plus conséquentes liées au changement climatique - repose sur la capacité des systèmes biologiques (prairies, cultures, herbivores) à évoluer, et sur celle des éleveurs à anticiper et/ou compenser les conséquences négatives du changement climatique et notamment des aléas, en exploitant au mieux les potentialités de leur système et en combinant les divers éléments (parcellaire, lots...). Toutefois, les adaptations actuellement proposées restent spécifiques des systèmes fourragers étudiés (par ex. ANDRIEU *et al.*, 2004 ; DEDIEU *et al.*, 2008). La modélisation offre une approche plus générale et devient incontournable lorsqu'il s'agit d'aider les éleveurs à comprendre les phénomènes interactifs complexes qui sont en jeu (DURU et MARTIN-CLOUAIRE, 2011) et d'étudier sur des pas de temps longs les impacts du changement climatique sur les systèmes d'élevage (SOUS-SANA *et al.*, 2010a ; SAUTIER *et al.*, 2013). GRAUX *et al.* (2013) soulignent que le co-développement d'indicateurs ou de pistes d'évolution apparaît comme une voie complémentaire intéressante pour compléter l'information délivrée par les modèles. A titre d'exemple, en partant des calendriers de production simulés par modélisation pour la prairie, la luzerne et le maïs, une concertation avec des experts des réseaux d'élevage a identifié des pistes d'évolution des calendriers d'alimentation pour des systèmes bovins lait, bovins viande, ovins viande dans plusieurs régions d'élevage françaises (voir RUGET *et al.*, 2012).

3. Renforcer les bases scientifiques comme supports de l'innovation

Les idées développées précédemment reposent sur notre compréhension actuelle des systèmes. Pour pouvoir relever les défis qui s'offrent aux SF, il sera nécessaire de renforcer les bases scientifiques nécessaires à la construction des adaptations et des innovations. Les problématiques soulevées par les nouveaux enjeux nécessitent de faire évoluer notre cadre conceptuel concernant notamment la place de l'agriculture dans la société et les relations agriculture - environnement. Dans ce contexte, la recherche devra non seulement produire des connaissances nouvelles, mais devra également porter un effort d'évaluation de ces travaux auprès de ses partenaires et auprès des porteurs d'enjeux et des acteurs des territoires (voir CARRÈRE *et al.*, 2012a ; DUMONT *et al.*, 2013). En cela, **la démarche scientifique en agroécologie constitue un cadre d'action pertinent**. Le groupe d'expert animé par l'INRA (Chantier en Agro-Ecologie, Septembre 2012) a identifié trois dimensions de travail indissociables : i) la théorisation du fonctionnement et de la dynamique des agroécosystèmes hors situation d'équilibre, ii) le développement d'expérimentations critiques et à grande échelle

sur un temps suffisant pour évaluer les concepts proposés et iii) l'essor de l'ingénierie agroécologique accompagnée de la valorisation économique et sociale des services rendus par les écosystèmes. Nous déclinerons ici ces conclusions dans le cadre spécifique des systèmes fourragers, en développant quelques problématiques qui nous apparaissent prioritaires, et qui commencent pour certaines d'entre elles à être intégrées dans des programmes de recherche.

■ Comment assurer plus de services écosystémiques avec des contraintes plus fortes ?

Qu'ils soient rémunérés par le marché ou par l'aide publique, ou encore exigés par la réglementation, les services demandés aux SF (c'est-à-dire les services explicitement identifiés et recherchés par la demande sociétale) seront à l'avenir plus nombreux qu'ils ne le sont actuellement. Cette exigence doit être atteinte dans un contexte où les ressources minérales, énergétiques, l'eau voire la terre seront contraintes par leur disponibilité ou le coût associé (en énergie, intrants...). **Une hypothèse de travail est que la diversité et la pérennité des ressources fourragères permettraient d'atteindre les objectifs multiples assignés aux SF**, tout en ayant une utilisation parcimonieuse des ressources. Cela questionne la **capacité à développer des SF polyvalents et efficaces**.

La diversification de la ressource fourragère est vue comme une solution pour mieux étaler sa disponibilité dans le temps, en jouant sur les différences de phénologies entre espèces. L'hypothèse de la diversité garante d'une stabilité et d'une productivité accrue des écosystèmes est un axe fort des travaux en écologie (voir YACHI et LOREAU, 1999). Sa déclinaison aux SF est pour le moment limitée aux effets des associations d'espèces, dans des conditions expérimentales parfois éloignées de celles rencontrées dans les SF (TILMAN *et al.*, 2006). Il serait pertinent d'étendre cette réflexion en intégrant une plus grande diversité de ressources fourragères (pérennes et temporaires, sous- ou co-produits), en y associant la diversité des animaux et des modes de gestion. Le SF bio-climatique OasYs (INRA-UE-FERLUS Lusignan) se propose de tester cette diversification des fourrages en développant des associations multi-strates d'espèces herbacées et ligneuses (*cf.* NOVAK *et al.*, 2013). L'objectif est de sécuriser l'approvisionnement fourrager en période de stress hydrique, tout en permettant de limiter le stress thermique des animaux et des couverts végétaux. La stratégie de reproduction du troupeau (double période de vêlage, printemps et automne) sera raisonnée pour être en cohérence avec la disponibilité des ressources fourragères pâturables au cours du temps.

La question de la pérennité concerne la pérennité des productions fourragères et la période de disponibilité de ces ressources au long de l'année. Il s'agit d'imaginer, au-delà des prairies permanentes, comment créer des plantes pérennes (exemples de céréales pérennes mais aussi de fourrages stockant de la biomasse sur pied, ou

d'espèces se ressemant spontanément) pour permettre une disponibilité de fourrage sur une longue période (toute l'année si possible) et assurer une couverture permanente des sols. Ceci est lié à l'idée de concevoir des systèmes permettant de pâturer toute l'année.

Traiter conjointement de la diversité et de la pérennité des ressources fourragères et de leur utilisation implique de comprendre - et modéliser - le fonctionnement de systèmes basés sur ces propriétés et de progresser sur l'intégration des concepts agronomiques, écologiques et économiques. Cela nécessite de mettre au point des cultures et des modes de gestion des animaux (alimentation notamment) et d'imaginer les modes d'organisation des SF associés.

■ A quelle échelle rechercher l'accomplissement des services ?

Pour des raisons de coût de production de l'unité fourragère et/ou de sécurisation de l'approvisionnement des troupeaux, **la quasi-totalité des ressources fourragères est produite à l'échelle de l'exploitation** qui les utilise (exception faite de certaines ressources comme la luzerne déshydratée, de certains sous-produits industriels ou des productions comme le foin de Crau). A l'échelle d'un territoire agricole, notamment occupé par des types d'exploitations différents, la très forte spécialisation des productions végétales se traduit par des impacts environnementaux défavorables. Dans les territoires dont les conditions pédoclimatiques sont diversifiées (par exemple le Massif central), la localisation des ressources fourragères peut jouer sur les compromis entre services rendus par ces surfaces. Ici se repose l'opposition des modèles d'usage des terres résumés par le « *land sparing* » et le « *land sharing* » discutés précédemment. La question de recherche liée à cet aspect réside dans la compréhension des niveaux d'échelles (spatiale, temporelle ou organisationnelle) les plus appropriés mais également dans le passage entre ces niveaux (problématique du changement d'échelle) permettant de rendre compte des services fournis par les systèmes fourragers. JACKSON *et al.* (2010) proposent de **considérer trois dimensions - le temps, l'espace et les organisations institutionnelles - et d'analyser leur pertinence pour envisager conjointement les adaptations possibles dans un avenir changeant** rapidement sous l'effet des activités humaines. Ces trois dimensions permettent de traiter des changements d'échelles qui peuvent concerner l'intégration ascendante (par la prise en compte des propriétés émergentes), descendante (effets d'intervention sur des processus se déroulant à des échelles inférieures) ou transversale en généralisant les résultats d'un endroit à un autre ou d'un groupe d'acteurs à un autre (DOUTHWAITE *et al.*, 2002). L'enjeu est de raisonner les SF comme des systèmes « socio-écologiques » et de considérer leur résilience aux changements sociaux et environnementaux (voir DURU *et al.*, 2014). Cela suppose une construction pluridisciplinaire des problématiques de recherche intégrant les disciplines biotechniques mais également les sciences humaines et sociales. A titre d'exemple, une réflexion collective menée

sur le centre INRA de Clermont-Ferrand - Theix (VEISSIER, CARRÈRE *et al.*, com. pers.) considère que le principal verrou scientifique est de concevoir des solutions systémiques ; les concepts de l'agroécologie, en mobilisant les processus de régulation interne des écosystèmes, feront émerger des voies d'adaptation des SF et des systèmes d'élevage. Combinés au développement du phénotypage systématique, il sera possible de faire émerger des lois générales s'appuyant sur l'exploration de jeux de données importants. L'essor de l'élevage de précision permettra d'ajuster rapidement les conduites lors d'aléas par la détection précoce des anomalies. En mobilisant les leviers économiques et sociologiques, ces voies d'adaptations déboucheront sur des solutions d'innovation co-construites avec les acteurs des territoires (voir également HANNACHI *et al.*, 2010, pour un exemple sur la gestion collective des cultures OGM).

■ Comment réduire la vulnérabilité des systèmes fourragers dans un contexte incertain ?

Dans la gestion de leurs systèmes fourragers, par leurs prises de décision multiples, les éleveurs cherchent à atteindre leurs objectifs en mobilisant des indicateurs fonctions de leurs contraintes présentes et de leur vision de l'avenir. Ce pilotage devient une question de recherche dès lors que l'on cherche à **comprendre la prise de décision des agriculteurs pour caractériser les facteurs d'amélioration dans les comportements décisionnels**. Il est donc important de pouvoir évaluer les performances et les conséquences liées à ces comportements, ce qui nécessite un travail d'analyse et de formalisation sous la forme de modèles (MARTIN-CLOUAIRE et RELIER, 2009). Un autre des produits de cette recherche concerne le développement d'outils destinés aux agriculteurs et à leurs conseillers, leur permettant d'anticiper certaines conséquences de leurs décisions mais aussi de faciliter les coordinations entre agriculteurs dans le but d'exploiter les complémentarités de leurs systèmes de production.

L'étude du pilotage des systèmes fourragers n'est pas une question nouvelle, mais le contexte d'un environnement économique, réglementaire et naturel changeant rendent les questions plus complexes et imposent de nouvelles approches (SOUSSANA *et al.*, 2010a ; MARTIN *et al.*, 2011b). La recherche de systèmes de production et de SF moins vulnérables reste un point essentiel. Diminuer la vulnérabilité des SF vis-à-vis des aléas économiques et climatiques devient une nécessité pour assurer leur durabilité. Cette vulnérabilité peut provenir i) de leur manque de flexibilité, pour répondre aux fluctuations permanentes liées à l'environnement naturel et économique ; ii) de leur manque de résilience, pour revenir à un fonctionnement assurant leur durabilité, après avoir connu une perturbation ponctuelle majeure (par ex. : sécheresse, forte diminution des cours du lait ou de la viande) ; iii) de leur manque d'adaptabilité, pour évoluer avec les changements tendanciels de leur environnement (exemple du réchauffement climatique ou de la libéralisation des marchés mondiaux).

■ Comprendre le fonctionnement des écosystèmes naturels pour améliorer les systèmes fourragers

Un des principes de l'agroécologie est de comprendre le fonctionnement des écosystèmes naturels pour en faire émerger des propriétés mobilisables dans la conception de systèmes agricoles plus durables. Les propriétés ciblées concernent principalement des services non marchands (dont les services de régulation) tels que la stabilité et la capacité d'autorégulation, la résistance aux stress biotiques et abiotiques, le stockage de carbone, *etc.* Pourtant, en première approche, les écosystèmes naturels (par ex. les pelouses sub-alpines) et les parcelles composant les systèmes fourragers présentent de nombreuses différences (tableau 1), qui confèrent à chacun de ces systèmes des propriétés spécifiques.

Ainsi, lors d'une succession écologique, un écosystème passe d'un état initial homogène spatialement, à un état final caractérisé par une hétérogénéité spatiale maximale et souvent, mais pas systématiquement, par une forte biodiversité. Lors des phases finales d'une succession écologique, l'efficacité de l'utilisation de l'énergie lumineuse est maximale, le recyclage des nutriments est optimisé, les relations de compétition réduites, la productivité (pour un niveau de fertilité donné) et le stockage de matière organique sont élevés. En comparaison, les agro-systèmes ont une structure et un fonctionnement simplifiés, avec des relations de compétition intenses, car ils sont maintenus dans les premiers stades d'une succession écologique grâce à des actions intensives (travail du sol, « perturbation » par la récolte, *etc.*). Les travaux en écologie indiquent que, dans les premiers stades du développement d'un écosystème, l'efficacité d'utilisation de l'énergie solaire, de l'eau, des nutriments est faible. **Les stades avancés des successions écologiques pourraient présenter un intérêt pour concevoir des systèmes d'élevage basés sur une ressource complexe et hétérogène** (revisiter le pastoralisme).

Cette piste « agroécologique » propose notamment d'intégrer, pour l'étude des relations entre systèmes fourragers et biodiversité, une **échelle de temps longue** qui intègre la dynamique des communautés d'organismes vivant dans les agroécosystèmes, et met à jour les fluctuations du système (en ce sens les systèmes

d'observation type SOERE (Systèmes d'observation et d'expérimentation pour la recherche en environnement), ou zone atelier sont à même d'apporter les données des séries de temps long). Il s'agira également de valoriser les atouts internes des éléments constitutifs des SF, en jouant sur leurs complémentarités, compensations ou antagonismes (par ex. : valoriser les décalages phénologiques, jouer sur les complémentarités de milieux, valoriser la diversité des ressources fourragères...). L'utilisation de modèles construits à l'échelle du système (voir précédemment) sera un atout pour tester le jeu des interactions possibles, dont certaines pourront être approfondies dans une démarche expérimentale capable de fournir les éléments factuels préalables à la construction d'une démarche opérationnelle.

Conclusions

L'objectif de cet article n'était pas de présenter une analyse argumentée des réalisations actuelles ou en cours dans les systèmes fourragers. Notre angle d'attaque était d'identifier des voies prometteuses. A l'issue de notre réflexion, nous avons été convaincus que les éléments de succès de la construction d'une démarche de recherche sur les systèmes fourragers innovants reposaient sur la pluridisciplinarité et un **partenariat fort avec la population cible de l'innovation** (ALLÉZARD *et al.*, 2014, ce même numéro). Il apparaît également que l'innovation doit résider dans les méthodes à mobiliser pour stimuler la créativité. Il faut faire vivre la pluridisciplinarité, en développant une réflexion sur des thèmes transversaux des SF, notamment pour tester la généricité des modèles dans des gammes larges de situations (climatiques et de types de systèmes). A ce titre, les SF basés sur les parcours méditerranéens ou les estives, soumis depuis longtemps à de fortes contraintes naturelles, ont développé une large gamme d'adaptations biotechniques et organisationnelles. Ils pourraient fournir des éléments d'inspiration précieux, très utiles pour alimenter une réflexion plus générale, par exemple sur les innovations à développer pour répondre à l'évolution des conditions climatiques (températures chaudes, situations de sécheresse récurrentes et intenses, *etc.*). Par ailleurs, la frontière entre prairie et parcours est parfois peu évidente (*cf.* PLANTUREUX *et al.*, 2012).

	Ecosystèmes naturels	Systèmes fourragers
Diversité	Moyenne à forte	Très faible à forte
Succession écologique	Tous stades d'évolution	Limitée aux premiers stades
Cycles biogéochimiques	Fermés	Ouverts
Fertilité du sol	Généralement faible	Elevée (voire variable)
Relations trophiques	Complexes	Simple
Niveau de perturbation (prélèvement de biomasse)	Faible	Fort
Pérennité des couverts	Forte (sauf incendies)	Faible (fourrages annuels) à forte (prairies permanentes)
Capacité d'autorégulation	Forte	Faible
Redondance fonctionnelle	Fréquente	Rare

TABLEAU 1 : Comparaison des caractéristiques des écosystèmes naturels et des systèmes fourragers tempérés.

TABLE 1 : Comparative table of the characteristics of natural ecosystems vs forage systems in temperate areas.

Évaluer l'impact de l'innovation sur les SF pose aux chercheurs de nouvelles questions qui conduisent à s'interroger sur les méthodes : Quels critères prendre en compte ? Comment les combiner ? Quelle est leur validité ? Les travaux doivent ici porter sur la nature des outils (modèles, indicateurs, méthodes d'aide à la décision multicritère...) autant que sur la nature des critères et des contraintes à prendre en compte (critères communs de performance technique, économique ou environnementale, mais aussi propriétés des systèmes). Il semble aussi indispensable de se questionner sur les accompagnements à mettre en place pour que les résultats de ces travaux aboutissent à de véritables innovations dans le domaine des systèmes fourragers. Cela pose la question des approches à développer pour mobiliser les collectifs autour d'une telle démarche. Il s'agit de mettre en place une démarche volontaire pour faire émerger des propositions concrètes en réponse aux défis qui se posent aux SF de demain. Dans le partenariat avec les éleveurs, il est important de repérer en situation les façons d'organiser et de gérer les SF (voir NOVAK *et al.*, 2014, ce numéro) et d'identifier les indicateurs significatifs pour eux. Une approche de co-construction entre chercheurs et acteurs permettrait de rendre lisible ces modes d'organisation, de les organiser et de les référencer, et de mettre en débat ces idées (voir l'exemple du programme PSDR Climfourrel). Dans l'idéal, ce partenariat doit s'entendre aussi bien d'un point de vue national qu'international, pour identifier des idées d'innovation à partir d'expériences hors de nos frontières et dans des SF parfois très différents.

Accepté pour publication,
le 28 janvier 2014.

Remerciements : Cet article s'appuie sur le rapport Réflexions en vue de recherches pluridépartementales INRA sur les Systèmes Fourragers innovants (2010) dont la coordination a été assurée par S. Plantureux.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGABRIEL J., FARRIE J.P., POTTIER E., NOTE P., POMIES D. (2012) : "Conséquences zootechniques de simplifications de pratiques : exemples de la distribution des aliments et de la traite des vaches", *Production animales*, 25 (2), 141-158.
- AGREIL C., FRITZ H., MEURET M. (2005) : "Maintenance of daily intake through bite mass diversity adjustment in sheep grazing on heterogeneous and variable vegetation", *Applied Animal Behaviour Sci.*, 91, 35-56.
- ALLÉZARD V., HUYGHE C., VERTÉS F. (2014) : "Foisonnement de l'innovation agricole : quelques exemples d'initiatives en élevage herbivore", *Fourrages*, 217, ce numéro, 37-46.
- AMIAUD B., CARRÈRE P. (2012) : "La multifonctionnalité de la prairie pour la fourniture de services écosystémiques", *Fourrages*, 211, 229-238.
- ANDRIEU N., JOSIEN E., DURU M. (2004) : "Diversité du territoire d'exploitation et sensibilité aux aléas climatiques : exemples d'élevages laitiers en Auvergne", *Fourrages*, 180, 483-494.
- ARROUAYS D., BALESSENT J., GERMON J.C., JAYET P.A., SOUSSANA J.F., STENGEL P. (eds). (2002) : *Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Expertise scientifique collective.*, Synthèse du rapport INRA (France), 32 pp.
- BALESSENT J., CHENU C., BALABANE M. (2000) : "Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage", *Soil and Tillage Research*, 53, 215-230.
- BENKE M., ELSASSER M. (2009) : "Evolution des systèmes fourragers en Allemagne : compétition ou complémentarité entre le lait et le biogaz ?", *Fourrages*, 197, 3-10.
- CARRÈRE P., PLANTUREUX S., POTTIER E. (2012a) : "Concilier les services rendus par les prairies pour assurer la durabilité des systèmes d'élevage herbagers", *Fourrages*, 211, 213-218.
- CARRÈRE P., SEYTRÉ L., PIQUET M., LANDRIEUX J., RIVIÈRE J., CHABALIER C., ORTH D. (2012b) : "Une typologie multifonctionnelle des prairies des systèmes laitiers AOP du Massif central combinant des approches agronomiques et écologiques", *Fourrages*, 209, 9-21.
- DEDIEU B., LOUAULT F., TOURNADRE H., BENOIT M. (2008) : "Réponse des systèmes d'élevage innovants à la variabilité climatique : une expérimentation en production extensive ovin viande intégrant des préoccupations environnementales", *L'élevage en mouvement : Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores*, Dedieu B., Chia E., Leclerc B., Moulin C.-H., Tichit M. (ed.), éd. Quae, Versailles, 161-178.
- DELABY L., PEYRAUD J.L., FAVERDIN P. (2001) : "Pâtur' IN : le pâturage des vaches laitières assisté par ordinateur", *Fourrages*, 167, 385-398.
- DELABY L., POCHON A., JOURNET M. (2012) : "Proposition d'un nouvel indicateur global de durabilité des exploitations d'élevage", *Fourrages*, 213, 77-86.
- DOUTHWAITE B., SCHULZ S., OLANREWAJU A. (2002) : "Impact Pathway Evaluation: An Approach for Achieving and Attributing Impact in African Agriculture", *Social Science*, 11-14.
- DUMONT B., FORTUN-LAMOTHE L., JOUVEN M., THOMAS M., TICHIT M. (2013) : "Prospects from agroecology and industrial ecology for animal production in the 21st century", *Animal*, 7 (6), 1028-1043.
- DURAND J.L., BERNARD F., LARDY R., GRAUX A.I. (2010) : "Changement climatique et prairies", *Le livre vert du projet Climator*, Ademe éditions, 181-190.
- DURU M. (2013) : "Combining agroecology and management science to design field tools under high agrosystem structural or process uncertainty: Lessons from two case studies of grassland management", *Agricultural Systems*, 114, 84-94.
- 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 (9), 790-802.
- DURU M., NOCQUET J., BOURGEOIS A. (1988) : "Le système fourrager : un concept opératoire ?", *Fourrages*, 115, 251-272.
- DURU M., FARÈS M., THÉRON O. (2014) : "Un cadre conceptuel pour penser maintenant (et organiser demain) la transition agroécologique de l'agriculture dans les territoires", *Cahiers de l'Agriculture* (à paraître).
- EMILE J.C., AL RIFAÏ M., LAURENT M., BOSSIS N. (2007) : "Maximiser le pâturage pour économiser l'eau dans les systèmes fourrages laitiers de Poitou-Charentes", *Actes Journées AFPP - Productions fourragères et adaptations à la sécheresse*, 27 et 28 Mars 2007, 190-191.
- FARRUGGIA A., DUMONT B., SCOHIER A., LEROY T., PRADEL P., GAREL J.P. (2012a) : "An alternative rotational grazing management designed to favour butterflies in permanent grasslands", *Grass and Forage Science*, 67, 136-149.
- FARRUGGIA A., LACOUR C., ZAPATA J., PIQUET M., BAUMONT B., CARRÈRE P., HULIN S. (2012b) : "DIAM, un diagnostic innovant déclinant les équilibres, production, environnement et qualité des fromages au sein des systèmes fourragers des zones AOP du Massif central", *19^e Journée Rencontres Recherches Ruminants*, Paris (France).
- FISCHER J., BROSI B., DAILY G.C., EHRlich P.R., GOLDMAN R., GOLDSTEIN J.H., MANNING A.D., MOONEY H.A., L., PEJCHAR, RANGANATHAN J., TALLIS H. (2008) : "Should agricultural policies encourage land-sparing or wildlife-friendly farming?", *Frontiers in Ecology & Environment*, 6, 380-385.

- GEMENNE F. (2013) : "Impacts géopolitiques du changement climatique. L'agriculture au cœur des enjeux", *Fourrages*, 214, 87-90.
- GERMON J.C., ARROUAYS D., DESEAU S., FÉLIX I., GABRIELLE B., GANTEIL A., GALLIENNE J., LELLAHI A., LECORRE N., MARTIN M., MARY B., MÉTAY A., NICOLARDOT B., QUÉRÉ L., REAU R. (2007) : *Évaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturelles Sans Labour en France. Synthèse du groupe de travail sur le "Bilan effet de serre"*, ADEME-ARVALIS Institut du végétal-INRA-APCA-AREAS-ITB-CETION-IFVV, 400 p.
- GHYSEL F., GODIN B., FLAMIN C., DELFOSSE P., DELCARTE J., STILMANT D. (2010) : "Valorisation énergétique des fourrages : comparaison de trois filières, enjeux et opportunités", *Fourrages*, 203, 163-173.
- GRAUX A.I., MOREAU J.-C., RAYNAL H., RUGET F., CARRÈRE P., FAVERDIN P., HILL D. (2013) : "Adaptation des systèmes d'élevage bovins au changement climatique : intérêts, limites et perspectives des approches de modélisation", *Fourrages*, 215, 231-240.
- HANNACHI M., COLENO F., ASSENS C. (2010) : "La collaboration entre concurrents pour gérer le bien commun : le cas des entreprises de collecte et de stockage de céréales d'Alsace", *Gérer et comprendre*, n°101, 16-25.
- HERVIEU B. (2002) : "La multifonctionnalité : un cadre conceptuel pour une nouvelle organisation de la recherche sur les herbages et les systèmes d'élevage", *Fourrages*, 171, 219-226.
- HOBBS R.J., ARICO, S., ARONSON J., BARON J.S., BRIDGEWATER P., CRAMER V.A., EPSTEIN P.R., EWEL J.J., KLINK C.A., LUGO A.E., NORTON D., OJIMA D., RICHARDSON D.M., SANDERSON E.W., VALLADARES F., VILA M., ZAMORA R., ZOBEL M. (2006) : "Novel ecosystems: theoretical and management aspects of the new ecological world order", *Global Ecol. Biogeogr.*, 15 (1), 1-7.
- INGRAM J., GREGORY P., IZAC A. (2008) : "The role of agronomic research in climate change and food security policy", *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 126, 4-12.
- ISBELL F., CALCAGNO V., HECTOR A., CONNOLLY J., HARPOLE W.S., REICH P.B., SCHERER-LORENZEN M., SCHMID B., TILMAN D., VAN RUIJVEN J., WEIGELT A., WILSEY B.J., ZAVALA E.S., LOREAU M. (2011) : "High plant diversity is needed to maintain ecosystem services", *Nature*, 477 (7363), 199-U196.
- JACKSON L., VAN NOORDWIJK M., BENGTTSSON J., FOSTER W., LIPPER L., PULLEMAN M., SAID M., SNADDON J., VODOUHE R. (2010) : "Biodiversity and agricultural sustainability: from assessment to adaptive management", *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2, 80-87.
- JOUVEN M., LAPEYRONIE P., MOULIN C., BOCQUIER F. (2010) : "Rangeland utilization in Mediterranean farming systems", *Animal*, 4, 1746-1757.
- KINZIG A.P., PERRINGS C., CHAPIN F.S., POLASKY S., SMITH V.K., TILMAN D., TURNER B.L. (2011) : "Paying for Ecosystem Services-Promise and Peril", *Science*, 334 (6056), 603-604.
- KLUMPP K., TALLEC T., GUIX N., SOUSSANA J.F. (2011) : "Long-term impacts of agricultural practices and climatic variability on carbon storage in a permanent pasture", *Global Change Biology*, 17, 3534-3545.
- KOELLNER T., DE BAAN L., BECK T., BRANDÃO M., CIVIT B., MARGNI M., MILA I CANALS L., SAAD R., MAIA DE SOUZA D., MÜLLER-WENK R. (2013) : "UNEP-SETAC guideline on global land use impact assessment on biodiversity and ecosystem services in LCA", *Int. J. Life Cycle Assessment*, 18 (6), 1188-1202.
- LAUNAY F., BAUMONT R., PLANTUREUX S., FARRIE J.P., MICHAUD A., POTTIER E. (2011) : *Prairies permanentes - des références pour valoriser leur diversité*, éd. Institut de l'Élevage, 128 p.
- LE GALL A., BEGUIN E., DOLLÉ J.B., MANNEVILLE V., PFLIMLIN A. (2009) : "Nouveaux compromis techniques pour concilier efficacité économique et environnementale en élevage herbivore", *Fourrages*, 198, 131-151.
- LE MASSON P., WEIL B., HATCHUEL A. (2006) : *Les processus d'innovation, conception innovante et croissance des entreprises*, Paris, Hermès Lavoisier, 471 p.
- MAILLAT D., QUÉVIT M., LANFRANCO SENN (1993) : *Réseaux d'innovation et milieux innovateurs : un pari pour le développement régional*, GREMI-EDES, 388 p.
- MARIS V. (2010) : *Philosophie de la biodiversité : Petite éthique pour une nature en péril*, Buchet-Chastel éd.
- MARTIN G. (2009) : *Analyse et conception de systèmes fourragers flexibles par modélisation systémique et simulation dynamique*, thèse de doctorat, INP Toulouse (France), 180 p; <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000990/01/martin.pdf>
- MARTIN G., MARTIN-CLOUAIRE R., RELIER J.P., DURU M. (2011a) : "A simulation framework for the design of grassland-based beef-cattle farms", *Environmental Modeling & Software*, 26 (4), 371-385.
- MARTIN G., THEAU J.P., THEROND O., MARTIN-CLOUAIRE R., DURU M. (2011b) : "Diagnosis and Simulation: a suitable combination to support farming systems design", *Crop & Pasture Science*, 62 (4), 328-336.
- MARTIN G., FELTEN B., DURU M. (2011c) : "Forage rummy: A game to support the participatory design of adapted livestock systems", *Environmental Modelling and Software*, 26 (12), 1442 - 1453.
- MARTIN G., MARTIN-CLOUAIRE R., DURU M. (2013) : "Farming system design to feed the changing world. A review", *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 131-149.
- MARTIN-CLOUAIRE R., RELIER J.P. (2009) : "Modelling and simulating work practices in agriculture", *Int. J. of Metadata, Semantics and Ontologies*, 4 (1-2), 42-53.
- MEA, Millenium Ecosystem Assesment (2005) : *Ecosystems and human well-being. Synthesis. A report of the Millenium Ecosystem Assesment*, Island Press Whashington, 219 p.
- MEYNARD J.M., AGGERI F., COULON J.B., HABIB R., TILLON J.P. (2006) : *Recherches sur la conception de systèmes agricoles innovants*, Rapport pour la direction générale, INRA.
- MEYNARD J.M., MESSÉAN A., CHARLIER A., CHARRIER F., FARÈS M., LE BAIL M., MAGRINI M.B., SAVINI I. (2013) : *Freins et leviers à la diversification des cultures. Etude au niveau des exploitations agricoles et des filières*, Synthèse du rapport d'étude, INRA, 52 p.
- MOSNIER C., BUTRY A., LHERM M., DEVUN J. (2013) : "Sensibilité des élevages bovins et ovins viande aux aléas selon la place des prairies dans les systèmes fourragers", *Fourrages*, 213, 11-20.
- NOVAK S., DELAGARDE R., FIORELLI J.L. (2013) : "Conception d'un système fourrager bioclimatique : la démarche initiée à Lusignan", *Fourrages*, 215, 241-246.
- NOVAK S., EMILE J.-C. (2014) : "Associer des approches analytiques et systémiques pour concevoir un système laitier innovant : de la Fée à l'OasYs", *Fourrages*, 217, ce numéro, 47-56.
- OUVRY J.F., LE BISSONNAIS Y., MARTIN P., BRICARD O., SOUCHÈRE V. (2010) : "Les couverts herbacés comme outils de réduction des pertes en terres par érosion hydrique", *Fourrages*, 202, 103-110.
- PEYRAUD J.L., LE GALL A., DELABY L., FAVERDIN P., BRUNSCHWIG P., CAILLAUD D. (2009) : "Quels systèmes fourragers et quels types de vaches laitières demain ?", *Fourrages*, 197, 47-70.
- PIGEON G., SOUBEYROUX J.M., DÉQUÉ M. (2013) : "Observations et projections climatiques à l'échelle de la France : l'exemple de la ressource en eau", *Fourrages*, 214, 91-97.
- PLANTUREUX S., AMIAUD B., NOIRTIN B., PERNOT B. (2012) : "eFLORAsys, un outil internet pour évaluer la valeur des prairies", *Actes des journées de l'AFPF 2012*, Paris, France
- POTTIER E., D'HOOR P., HAVET A., PELLETIER P. (2001) : "Allongement de la saison de pâturage pour les troupeaux allaitants", *Fourrages*, 167, 287-310.

- RUGET F., CLASTRE P. *et al.* (2012) : “Conséquences possibles des changements climatiques sur la production fourragère en France. II. Exemples de quelques systèmes d'élevage”, *Fourrages*, 211, 243-251.
- RYSCHAWY J., DISENHAUS C., BERTRAND S., ALLAIRE G., AUBERT C., AZNAR O., GUINOT C., JOSIEN E., LASSEUR J., PLANTUREUX S., TCHAKÉRIAN E., TICHIT M. (2013) : “Assessing the multiple services provided by livestock: a French case-study”, *64th Annual Meet. Europ. Fed. Animal Science*, Nantes (France), August 26-30 2013.
- SABATIER R., LÉGER F., TEILLARD F., TICHIT M. (2011) : “Une approche multi-échelles des arbitrages entre production fourragère et biodiversité dans un agroécosystème prairial”, *Fourrages*, 208, 315-328.
- SABATIER R., DOYEN L., TICHIT M. (2013) : “Heterogeneity and the trade-off between ecological and productive functions of agro-landscapes: A model of cattle-bird interactions in a grassland agroecosystem”, *Agricultural Systems*, sous presse.
- SAUTIER M., MARTIN-CLOUAIRE R., FAIVRE R., DURU M. (2013) : “Assessing climatic exposure of grassland-based livestock systems with seasonal-scale indicators”, *Climatic Change* (sous presse) ; doi:10.1007/s10584-013-0808-2.
- SOUSSANA J.F., GRAUX A.I., TUBIELLO F.N. (2010a) : “Improving the use of modelling for projections of climate change impacts on crops and pastures”, *J. Exp. Bot.*, 61, 2217-2228.
- SOUSSANA J.F., TALLEC T., BLANFORT V. (2010b) : “Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands”, *Animal*, 4, 3, 334-350.
- TEILLARD D'ÉVRY F. (2012) : *Reconciling food production and biodiversity in farmlands: the role of agricultural intensity and its spatial allocation*, Université Paris Descartes, 179 p.
- THEAU J.P., CHABALIER C., PIQUET M., CAYRE P., DELMAS B., VIOLLEAU S., FARRUGGIA A. (2012) : “Construire des outils en partenariat entre Recherche et Développement. Le diagnostic des pratiques fourragères en zone fromagère AOP du Massif central”, *Fourrages*, 209, 69-78.
- TICHIT M., MAGDA D., DURANT D., LAUVIE A., LÉCRIVAIN E., MARTEL G., ROCHE B., DE SAINTE MARIE C., SABATIER R., TEILLARD D'ÉVRY F. (2012) : “Systèmes d'élevage et biodiversité : des antagonismes aux synergies”, *19^e Rencontres Recherches Ruminants*, 8 p.
- TICHIT M., FORTUN-LAMOTHE L., GONZALEZ-GARCIA E., JOUVEN M., THOMAS M., DUMONT B. (2013) : “Enhancing diversity in livestock farming system to strengthen their resilience: a review of evidence”, *64th Annual Meet. Europ. Fed. Animal Science*, Nantes (France), 26-30 août 2013.
- TILMAN D., REICH P.D.B., KNOPS J.M.H. (2006) : “Biodiversity and ecosystems stability in a decade-long grassland experiment”, *Nature*, 441, 629-632.
- VOLAIRE F., BARRE P., BÉGUIER V., BOURGOIN T., DURAND J.L., GHESQUIÈRE M., JAUBERTE J.P., LITRICO I., NOEL D. (2013) : “Quels idéotypes de plantes fourragères pour des prairies adaptées au changement climatique ?”, *Fourrages*, 214, 119-126.
- WAGONER P. (1990) : “Perennial grain development: past efforts and potential for the future. Critical review”, *Plant Science*, 9, 381-408
- WALLACE K.J. (2007) : “Classification of ecosystem services: Problems and solutions”, *Biological Conservation*, 139, 235-246.
- WEINER J. (2003) : “Ecology - the science of agriculture in the 21st century”, *J. Agric. Sci.*, 141, 371-377.
- WEZEL A., BELLON S., DORÉ T., FRANCIS C., VALLOD D., DAVID C. (2009) : “Agroecology as a science, a movement and a practice. A review”, *Agronomy for Sustainable Development*, 29 (4), 503-515.
- YACHI S., LOREAU M. (1999) : “Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment: the insurance hypothesis”, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 96, 1463-1468.



Association Française pour la Production Fourragère

La revue *Fourrages*

est éditée par l'Association Française pour la Production Fourragère

www.afpf-asso.org



AFPF – Centre Inra – Bât 9 – RD 10 – 78026 Versailles Cedex – France

Tél. : +33.01.30.21.99.59 – Fax : +33.01.30.83.34.49 – Mail : afpf.versailles@gmail.com

Association Française pour la Production Fourragère