

Bases et premier exemple d'application d'une démarche articulante diagnostic et simulation de systèmes fourragers pour évaluer et améliorer l'efficacité d'utilisation de l'herbe

G. Martin^{1,2}, J.-P. Theau¹, O. Therond¹, J. Carre¹, P. Cruz¹, C. Jouany¹, M.-A. Magne¹, M. Duru¹

Les systèmes fourragers herbagers se révèlent particulièrement complexes à gérer. Des outils de diagnostics de pratiques d'éleveurs conduisent à des recommandations de gestion des prairies mais sont-elles applicables par l'éleveur à l'échelle de son système ? La démarche présentée, en permettant cette évaluation systémique par simulation, ouvre des perspectives.

RÉSUMÉ

Le suivi de deux élevages bovins allaitants Pyrénéens a été combiné avec l'analyse fonctionnelle de leurs systèmes fourragers, des diagnostics de pratiques fourragères et la modélisation des deux systèmes, permettant d'effectuer des simulations. Le diagnostic à l'échelle de la parcelle laisse entrevoir d'importantes marges d'amélioration dans ces systèmes (pour l'organisation des récoltes de fourrages). La simulation révèle que ces marges d'amélioration de gestion des prairies sont très limitées par des contraintes structurelles et climatiques. La démarche proposée constitue un exemple original d'articulation de méthodes capables de contribuer à l'expertise des chercheurs, des conseillers agricoles et des éleveurs.

SUMMARY

Bases and a first example of the application of a method combining the diagnosis and the simulation of forage systems in order to assess and to improve the efficiency of grass utilization

The forage systems based on grass are particularly complex to manage. Tools for diagnosing farmers' practices lead to recommendations for the management of the pastures, but whether they may be applied on the scale of the whole system is questionable. The strategy presented here, which concerns 2 suckling cattle farms in the Pyrenees, gives a systemic evaluation by simulating the proposed improvements. It combines the functional analysis of the forage systems, diagnoses of the forage practices, and the modelisation of the 2 systems, making simulations possible. The diagnosis on the field scale gives an inkling of possible large improvements in these systems (for the organisation of harvesting operations), but the simulation shows these proposals to be limited by structural and climatic constraints. This is an original example of methods that may add to the expertise of the scientists, the agricultural advisors and the farmers.

Les systèmes fourragers situés dans les zones herbagères de montagne, pour lesquels l'alimentation du troupeau est basée sur des prairies permanentes riches en espèces, sont particulièrement complexes à gérer. Alors que les besoins alimentaires du troupeau sont continus et assez réguliers, la production d'herbe des prairies est très hétérogène dans l'espace et dans le temps. Cette hétérogénéité est le résultat de différences de types de prairies, de sols, ou de microclimats entre les parcelles. Au gré des conditions, en particulier météorologiques, les éleveurs essaient d'adapter au mieux leurs pratiques pour assurer l'alimentation du troupeau compte tenu des disponibilités escomptées et observées de

l'herbe et des stocks fourragers. Compte tenu des incertitudes entourant notamment l'évolution du climat, et afin de garantir la viabilité de ces systèmes fourragers, **il est nécessaire d'améliorer les connaissances disponibles sur les dynamiques des prairies, les pratiques des éleveurs et leurs interactions pour évaluer l'efficacité d'utilisation de l'herbe et, lorsque nécessaire et possible, identifier des pistes qui l'améliorent.**

Jusqu'à la fin du siècle dernier, les connaissances génériques destinées à améliorer l'efficacité d'utilisation de l'herbe portaient sur les prairies monospécifiques semées. Pour les prairies permanentes riches en espèces, seules des

AUTEURS

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

2 : INRA, UR 875 UBI, F-31326 Castanet Tolosan

MOTS CLÉS : Analyse fonctionnelle, diagnostic, facteur climat, gestion du pâturage, modélisation, prairie de montagne, pratiques de gestion des prairies, pratiques des agriculteurs, simulation, système fourrager.

KEY-WORDS : Climatic factor, diagnosis, farmers' practices, forage system, functional analysis, modelling, pasture management, pasture management practices, simulation, upland pasture.

RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE : Martin G., Theau J.-P., Therond O., Carre J., Cruz P., Jouany C., Magne M.-A., Duru M. (2010) : Bases et premier exemple d'application d'une démarche articulante diagnostic et simulation de systèmes fourragers pour évaluer et améliorer l'efficacité d'utilisation de l'herbe, *Fourrages*, 201, 47-56.

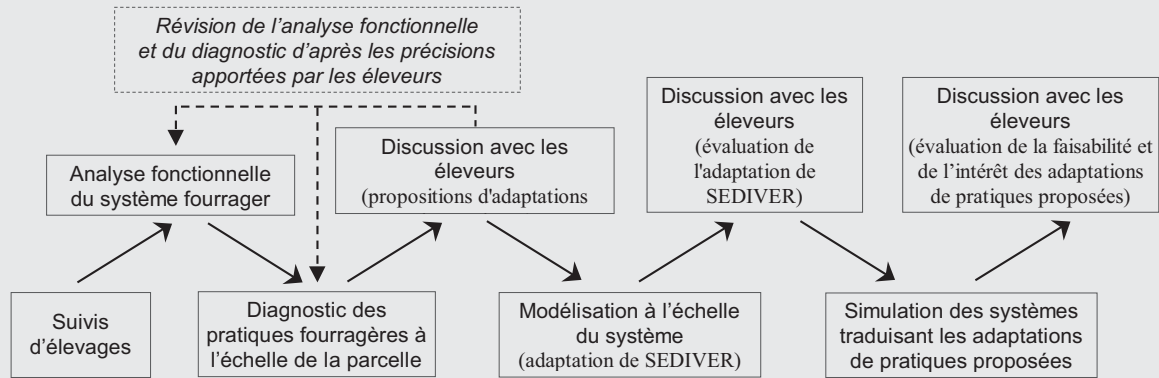


FIGURE 1 : Les différentes étapes de la démarche proposée.

FIGURE 1 : The different stages of the proposed method.

connaissances empiriques étaient disponibles (DAGET et POISSONET, 1971 ; PLANTUREUX *et al.*, 1992). Leur domaine de validité hors de leur région de définition faisait débat. Depuis une dizaine d'années, une nouvelle génération d'outils pour la gestion des systèmes fourragers herbagers a vu le jour. Leur particularité est qu'ils dépassent les limites entrevues avec la précédente génération d'outils. Les indices de nutrition minérale appliqués aux prairies riches en espèces (DURU *et al.*, 1997 ; JOUANY *et al.*, 2004) en sont un exemple. La caractérisation fonctionnelle de la végétation des prairies, qui fournit les éléments clés de détermination de ses caractéristiques agronomiques (CRUZ *et al.*, 2002), en est un autre. Elle a abouti à l'identification de types fonctionnels de graminées (ANSQUER *et al.*, 2004), à partir desquels il est possible de connaître la phénologie des espèces végétales et d'en déduire la dynamique de l'état quantitatif et qualitatif de la communauté végétale correspondante (ANSQUER *et al.*, 2008 ; DURU *et al.*, 2007).

La nouvelle génération d'outils pour la gestion des systèmes fourragers herbagers permet d'établir des diagnostics très intégrés qui conduisent à des recommandations de gestion des prairies (CHAZELAS et THEAU, 2008 ; DURU et DELABY, 2003 ; THEAU *et al.*, 1998). Si ces outils s'avèrent particulièrement intéressants pour identifier des marges d'amélioration sur l'efficacité d'utilisation de l'herbe, l'une de leurs principales limites est qu'ils ont été conçus pour être appliqués **à l'échelle de la parcelle**. Se posent alors les questions suivantes : quelle part de ces recommandations peut-on appliquer ?, et quelles marges d'amélioration peut-on réellement atteindre si l'on intègre les contraintes rencontrées par l'éleveur au quotidien à l'échelle de la sole pâturée ou fauchée, ou du système ? Il s'agit par exemple de contraintes sur la coordination dans l'espace et le temps de l'utilisation des ressources (main d'œuvre et matériel agricole) ou des prairies. **La simulation dynamique à l'échelle de l'exploitation agricole permet d'intégrer ces contraintes et de conduire cette évaluation systémique.**

Cet article présente donc les bases d'une démarche destinée à évaluer et améliorer si besoin l'efficacité d'utilisation de l'herbe dans les élevages herbagers. Elle combine suivi d'élevages, analyse fonctionnelle du système fourrager, diagnostic de pratiques d'éleveurs, modélisation systémique et simulation dynamique. Cette démarche a été appliquée sur deux systèmes bovins allaitants orientés vers la production de bœufs dans les Pyrénées. Une précédente étude sur ces deux élevages (THEAU *et al.*, 1998) avait conduit ses auteurs à avancer que des marges de progrès sur l'utilisation de l'herbe

étaient envisageables en modifiant les dates des récoltes, mais que seules des simulations tenant compte des conditions météorologiques et de la charge de travail pourraient confirmer leur faisabilité.

1. Présentation de la démarche

■ Vue d'ensemble

La démarche a été mise en place afin d'évaluer les marges d'amélioration sur l'efficacité d'utilisation de l'herbe. Une analyse fonctionnelle a été appliquée à deux systèmes fourragers. Elle s'appuie sur l'appréciation des pratiques fourragères selon la méthode proposée par GUÉRIN et BELLON (1990) et BELLON *et al.* (1999), enrichie par une caractérisation des végétations basée sur la typologie fonctionnelle des graminées proposée par ANSQUER *et al.* (2004). Cette analyse, discutée et validée par les deux éleveurs concernés, a servi de support à l'identification des marges d'amélioration supposées envisageables au travers d'un diagnostic à l'échelle de la parcelle (THEAU *et al.*, 1998), et des marges réellement envisageables dans des simulations à l'échelle du système (selon MARTIN *et al.*, 2009) (figure 1). Les marges d'amélioration issues des deux approches ont ensuite été comparées.

■ Dispositif de suivi des deux systèmes

Les deux systèmes étudiés, situés entre 615 et 1 200 m d'altitude dans la commune d'Ercé (Ariège), **se rapprochent du cas type (CT) « Naisseur de bœufs en montagne Pyrénées »** (Institut de l'Élevage, 2006 ; tableau 1). Ils ont fait l'objet d'un **suivi pluriannuel** (1997-2000), déjà partiellement présenté dans THEAU *et al.* (1998), au cours duquel les informations suivantes ont été collectées :

- un cadrage général du projet de production de l'éleveur : types et saisonnalité des produits, stocks réalisés, autonomie fourragère ;

- une description des prairies utilisées : surface, altitude, exposition, pente, profondeur de sol, indice de nutrition minérale (selon DURU *et al.*, 1997, et JOUANY *et al.*, 2004), caractérisation fonctionnelle de la végétation (selon ANSQUER *et al.*, 2004) ;

- une description du troupeau : effectifs, renouvellement, vèlages, allotement, conduite de l'alimentation ;

- un calendrier d'utilisation des prairies prévisionnel et réalisé, avec les modes d'exploitation correspondants (pâturage, fauche, fertilisation), éventuellement complétés de mesures (par ex. des hauteurs d'herbe résiduelles au pâturage, des rendements à la fauche) et la justification des ajustements réalisés par rapport au calendrier prévisionnel ;

- une évaluation de l'état des stocks fourragers en grange, en entrée et en sortie d'hiver, et des achats de stocks effectués chaque année ;

- des données météorologiques journalières (températures, précipitations, rayonnement incident, etc.).

Les deux systèmes ont été choisis en raison de leurs différences d'autonomie fourragère, illustrées par le contraste entre récolte et besoins en fourrages (tableau 1). Toutefois, un niveau d'autonomie fourragère supérieur ne signifie pas pour autant que le système concerné dispose d'une marge d'amélioration sur l'efficacité d'utilisation de l'herbe plus faible. En effet, cette marge est fortement dépendante du poids des contraintes parcellaires (pente, altitude, distance de la parcelle à l'étable, etc.) et de la disponibilité des ressources (main d'œuvre et matériel agricole), qui influent sur la nature et la date d'utilisation des prairies. Or, ces deux systèmes **se différencient par la proportion des surfaces de fond de vallée** qui sont les plus facilement mécanisables et les plus productives (tableau 1).

■ Analyse fonctionnelle des deux systèmes

L'analyse fonctionnelle a conduit, en premier lieu, à identifier les ruptures dans la gestion du système au cours d'une année, provoquées par exemple par la prise en compte d'objectifs différents, ou par une modification de l'affouragement. C'est à partir de ces éléments que **l'année a été découpée en saisons-pratiques**, c'est-à-dire en périodes durant lesquelles les fourrages mobilisés pour alimenter les herbivores sont de nature comparable (BELLON *et al.*, 1999). Alors que ces auteurs s'appuyaient sur des connaissances empiriques, dans ce travail, l'identification des différents types de fourrages mobilisés entre saisons-pratiques est basée sur une caractérisation fonctionnelle de la végétation (ANSQUER *et al.*, 2004). La définition des saisons-pratiques a également été déduite des objectifs qui leurs sont assignés. Cette analyse a permis de mieux comprendre leur enchaînement et d'identifier les sécurités mises en œuvre (BELLON *et al.*, 1999). Ces sécurités permettent aux éleveurs d'adapter la réalisation planifiée des pratiques en tenant compte de leurs effets escomptés et observés et des états du système. En effet, s'appuyant sur une analyse réflexive de leurs échecs et réussites passés, les éleveurs planifient leurs pratiques dans le temps et l'espace puis coordonnent dynamiquement leur réalisation, en anticipant les évolutions possibles, ou en réagissant à un état présent (CROS *et al.*, 2004). Cette analyse a donc également

conduit à formaliser les relations entre les différentes pratiques de l'éleveur au sein ou entre saisons-pratiques. Ces relations peuvent être des successions (A avant B), des concurrences (A ou B), ou des conjonctions (A avec B). Enfin, l'analyse fonctionnelle a permis de caractériser un "plan flexible", c'est-à-dire une représentation logique et ordonnée dans le temps et l'espace des pratiques de l'éleveur incluant les principes à respecter pour leur exécution compte tenu de contraintes diverses. **Le "plan flexible"** prend la forme d'une arborescence d'activités qui spécifie comment ces pratiques sont agencées dans le temps et l'espace, et comment des segments de l'arborescence doivent être remplacés lorsque nécessaire. Il **intègre la diversité des conditions de production**, météorologiques en particulier, **et les processus décisionnels inducteurs de ces pratiques**.

■ Diagnostic des pratiques fourragères des éleveurs

Un diagnostic des pratiques a pour vocation de **déterminer leur adéquation avec le potentiel productif des prairies utilisées ou la fonction qui leur est assignée**. La caractérisation fonctionnelle des prairies permet de déduire entre autres la vitesse de croissance de l'herbe, la quantité de biomasse accumulée et sa valeur nutritive à partir des connaissances qu'elle fournit sur la phénologie des espèces végétales d'une communauté (CRUZ *et al.*, 2002). Les pratiques de l'éleveur peuvent donc être ré-analysées à la lumière de ces connaissances, afin d'évaluer dans quelle mesure de meilleurs compromis entre quantité et qualité ou une efficacité d'utilisation de l'herbe supérieure pourraient être atteints. Par exemple, la caractérisation fonctionnelle des prairies permet de connaître la date (en sommes de températures) du stade "épi à 10 cm", et ainsi de repenser l'intérêt, en fonction des objectifs de production, du déprimage et de l'étêtage dans la gestion du pâturage et de la fauche (GILLET, 1980 ; CHAZELAS et THEAU, 2008). En effet, au contraire du déprimage, l'étêtage permet de contrôler la flambée de la croissance reproductrice de printemps mais il pénalise les quantités de biomasse récoltables ultérieurement. Sur la base d'un diagnostic, des recommandations sur la manière de modifier les pratiques de l'éleveur peuvent donc être proposées pour améliorer l'efficacité d'utilisation de l'herbe.

■ Modélisation systémique et simulation dynamique

Le modèle SEDIVER (MARTIN *et al.*, 2009) **reproduit par simulation les variations quotidiennes de la disponibilité en fourrages sur pied ou conservés, des effectifs d'animaux et de leurs résultats de production** (lait et viande). Il s'applique à différentes conditions de production, par exemple climatiques,

Elevage	Nombre de vaches	Nombre d'UGB	Surface totale hors estive (ha)	Chargement (UGB/ha SFP corrigé de l'estive)	Surfaces de fond de vallée (%)	Surface fauchée (%)	Récolte de fourrages (t MS/UGB)	Besoins en fourrages (t MS/UGB)	Récolte / Besoins
CT	50	58	60	0,73	42	42	1,93	1,82	1,06
CC	38	42	70	0,59	23	51	2,25	2,27	0,99
MF	30	34	41,5	0,78	41	51	1,67	1,90	0,88

TABLEAU 1 : **Principales caractéristiques du cas type** (CT : "Naisseur de broutards en montagne Pyrénées" ; Institut de l'Elevage, 2006) **et des deux systèmes suivis** (CC, MF).

TABLE 1 : **Main characteristics of the typical case** (CT : "A breeder of store cattle in the Pyrenees" ; Institut de l'Elevage, 2006) **and of the two cases studied** (CC, MF).

et différentes structures d'exploitation et/ou comportements gestionnaires d'éleveurs représentés par des plans flexibles. Ces "plans" représentent la façon qu'a l'éleveur d'organiser les activités dans le temps et l'espace, les adaptations mises en œuvre lorsque certains événements se produisent, et les principes à respecter pour exécuter ces activités. Ces "plans" définissent aussi le rythme auquel l'éleveur surveille l'occurrence d'événements et inspecte son système pour, le cas échéant, mettre à jour les activités à réaliser en fonction de l'avancée du temps, des changements survenus, des ressources disponibles et des préférences énoncées. Les informations issues de l'analyse fonctionnelle ont permis d'**adapter SEDIVER**, modèle applicable aux systèmes herbagers de bovins allaitants, à chacun des deux systèmes étudiés. **Le modèle de simulation adapté a ensuite été utilisé pour l'analyse par simulation dynamique du comportement de ces systèmes pour différentes séries climatiques.**

Le comportement simulé de chacun des deux systèmes a été confronté au fonctionnement observé sur la période de suivi. Il est impossible d'évaluer de manière exhaustive le comportement simulé d'un système à l'échelle de l'exploitation agricole à un niveau de détail aussi fin que celui de SEDIVER. Les mesures et observations à comparer aux données simulées sont toujours insuffisantes. Une évaluation par l'usage, basée sur l'expertise et le bon sens agronomique, a permis de vérifier que le modèle adapté conduisait à un comportement simulé réaliste et cohérent par rapport au système observé, et ce, pour les séries climatiques du suivi exploitables (1998, 1999 et 2000, car les données météorologiques étaient incomplètes pour l'année 1997) et les années suivantes. Pour ce faire, il a été nécessaire d'examiner plusieurs types de données produites par les simulations : des descripteurs biophysiques d'intérêt (par ex. biomasse d'herbe), des indicateurs dérivés de ces descripteurs utilisés dans la gestion (par ex. hauteur d'herbe dérivée de la biomasse), les dates de réalisation des actes techniques (par ex. déplacement des lots d'animaux au pâturage) et des événements clés (par ex. mise à l'herbe, arrêt des distributions fourragères au printemps) et des indicateurs agrégés à l'échelle du système

et d'une année (par ex. part de la pâture dans l'alimentation du troupeau).

Après avoir évalué que l'adaptation de SEDIVER aux deux cas suivis conduisait à des comportements simulés réalistes et cohérents, **des systèmes modifiés traduisant les recommandations issues du diagnostic ont été conçus, au cours d'une nouvelle phase de modélisation systémique, puis évalués par simulation dynamique.** L'évaluation a alors porté sur la faisabilité des recommandations issues du diagnostic, et leurs incidences sur les performances agronomiques et zootechniques, en particulier l'efficacité d'utilisation de l'herbe.

2. Résultats

■ Analyse fonctionnelle des deux systèmes

Dans chacun des deux systèmes étudiés, trois types de surfaces peuvent être distingués : les prairies de fond de vallée, les prairies de versants et les estives. Le **circuit de pâturage** est organisé dans l'espace selon cette structure du parcellaire (figure 2). Cinq saisons-pratiques bornées par les déplacements d'un type de surface à un autre peuvent être distinguées en plus de la période d'hivernage (figure 2). L'analyse détaillée du déroulement de chaque saison-pratique ne sera pas présentée dans cet article.

Les enchaînements entre saisons-pratiques se matérialisent par du pâturage de prairies très différentes. En effet, les prairies de fond de vallée, situées entre 615 et 700 m d'altitude, se composent de types fonctionnels de graminées A et B (figure 3). Les prairies de versants, situées entre 700 et 1 200 m d'altitude, sont plus diversifiées (figure 3 : types A à D). Par conséquent, les prairies de versants, qui conjuguent ces différences de types de prairies et une altitude moyenne supérieure, ont une phénologie, laquelle détermine les dates des stades reproducteurs des graminées, beaucoup plus tardive. Par exemple, chez l'exploitant CC, le stade

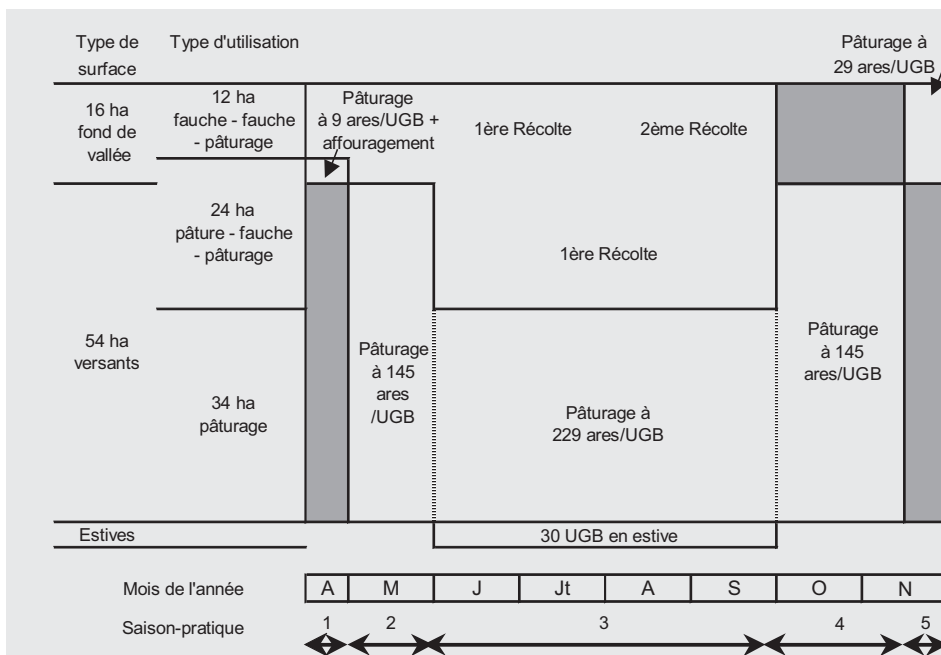


FIGURE 2 : Représentation schématique du calendrier fourrager et des saisons-pratiques de l'exploitation CC.

FIGURE 2 : Schematic representation of the forage schedule and of the 'seasons-practices' on the CC farm.

Les saisons-pratiques sont déterminées selon le type de surface et le type d'utilisation des prairies. Elles correspondent au début de printemps (1), au plein printemps (2), à l'été (3), l'automne (4), et à la fin de l'automne (5). Les zones foncées représentent des surfaces non ouvertes au pâturage pour la période concernée. Le calendrier fourrager de MF est proche de celui de CC.

Les saisons-pratiques sont déterminées selon le type de surface et le type d'utilisation des prairies. Elles correspondent au début de printemps (1), au plein printemps (2), à l'été (3), l'automne (4), et à la fin de l'automne (5). Les zones foncées représentent des surfaces non ouvertes au pâturage pour la période concernée. Le calendrier fourrager de MF est proche de celui de CC.

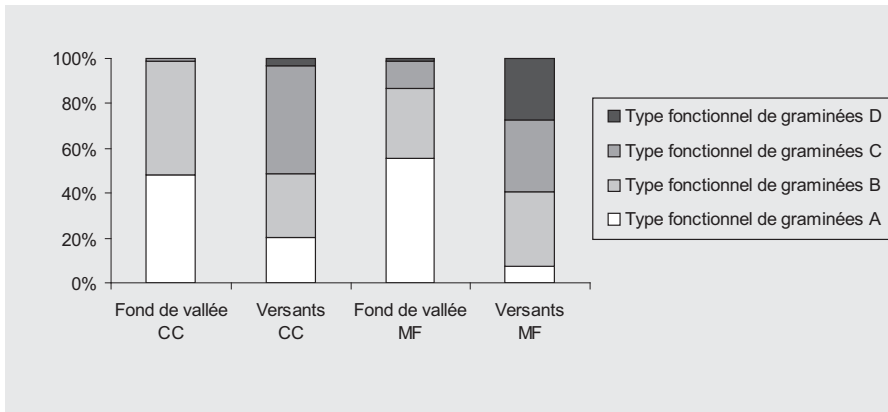


FIGURE 3 : Répartition des types fonctionnels de graminées A, B, C et D dans les prairies de fonds de vallées et les prairies de versants chez les deux exploitants suivis, CC et MF.

FIGURE 3 : Distribution of the functional types of grasses (A, B, C, D) in the valley-bottom pastures and the slope pastures on the two farms studied, CC and MF.

montaison, qui détermine l'entrée en phase reproductrice des graminées (GILLET, 1980), y survient en moyenne à 867°.j contre 627°.j dans les prairies de fond de vallée. De même, **les durées de vie des feuilles**, qui déterminent, pour une repousse végétative, le moment auquel le pic de production de biomasse est atteint, et ainsi la capacité de la prairie à être récoltée plus ou moins fréquemment (LEMAIRE, 1999), **sont supérieures dans les prairies de versants**. Considérant une valeur de durée de vie de feuilles fixe pour chaque type fonctionnel de graminées, et compte tenu de la composition des prairies en types fonctionnels, elle est en moyenne chez CC de 787°.j sur les versants contre 657°.j dans le fond de vallée. Enfin, les estives, situées au-dessus de 1 500 m d'altitude, sont composées de types fonctionnels de graminées C et surtout D.

■ Diagnostic des pratiques des éleveurs et recommandations

● Début de printemps et plein printemps

Au printemps, durant la phase reproductrice des graminées, la croissance de l'herbe s'accélère nettement. S'il a lieu avant le stade "épi à 10 cm", le pâturage de début et de plein printemps ne fait que retarder la récolte et ne supprime

pas les épis des graminées. Il s'agit d'un déprimage. Dans le cas contraire, il s'agit d'un étêtage qui, en arrêtant la phase reproductrice des graminées, diminue fortement la récolte mais améliore sa qualité (GILLET, 1980). Dans le cas des deux systèmes étudiés, la première récolte sert à assurer les quantités stockées. Les éleveurs ne devraient donc avoir recours qu'à du déprimage. Or, sur les prairies qui sont pâturées puis récoltées, **près de la moitié des pâturages de début et de plein printemps sont en fait des étêtages** (figure 4). Selon les éleveurs, une mise à l'herbe plus précoce n'est pas envisageable à cause des risques de gelées ou de chutes de neige. Un départ anticipé sur les prairies de versants ne l'est pas non plus compte tenu des capacités de déplacement limitées des jeunes veaux à la mise à l'herbe. Il serait donc **intéressant d'évaluer l'opportunité d'un pâturage de début et de plein printemps** sur une surface plus importante, mais **avec des hauteurs résiduelles en sortie de prairie plus élevées** qui ne conduisent pas à un étêtage.

● Période estivale

Au-delà d'une période correspondant à une durée de vie de feuille, une partie de la biomasse d'herbe pâturable entre en sénescence. La production d'herbe est alors contrebalancée par ces pertes par sénescence, et la digestibilité de l'herbe

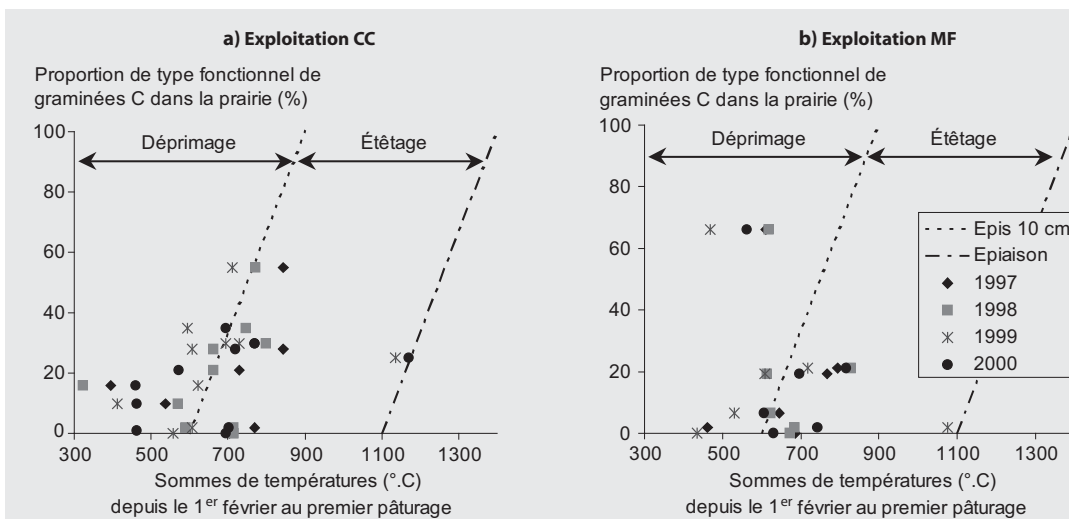


FIGURE 4 : Distinction entre parcelles déprimées et étêtées pour le 1^{er} pâturage de printemps selon sa date de début (en somme de températures) et la proportion de type fonctionnel de graminées C dans la végétation prairiale chez CC (a) et MF (b) pour la période 1997-2000.

FIGURE 4 : Distinction between early-topped and late-topped for the first spring graze, according to the beginning of topping (in cumulated temperatures) and to the proportion of grasses of the C functional type in the sward (a: farm CC; b: farm MF) during the period 1997-2000.

Plus la proportion de type fonctionnel de graminées C augmente (et donc la proportion des types fonctionnels A et B diminue), plus la végétation est tardive au regard des stades phénologiques. Les points correspondent chacun au pâturage d'une parcelle une année, et sont situés par rapport aux droites "épi à 10 cm" et "épiaison" ce qui permet de distinguer les déprimages des étêtages.

pâturable s'en trouve diminuée. Chez CC, le **pâturage** du lot d'animaux sédentarisés durant l'été est peu intensif, avec un chargement très faible et des hauteurs résiduelles en sortie de pâturage élevées. Ce système **présente des temps de retour sur chaque prairie** élevés, **en moyenne de 1 144°.j, soit 1,45 durée de vie de feuilles** compte tenu de la composition des prairies en types fonctionnels de graminées. Certaines parcelles sont même utilisées à l'issue de la phase reproductrice jusqu'à 2 500°.j. Aussi, il serait **intéressant d'évaluer l'opportunité d'un pâturage d'été rythmé par la succession des cohortes de feuilles** en profitant de la souplesse d'utilisation qu'offrent les parcelles de versants, *i.e.* de l'étalement des stades phénologiques et du risque retardé de pertes de biomasse par sénescence pour les pousses végétatives d'herbe.

• Période d'automne et fin d'automne

Le diagnostic du pâturage d'automne conduit à la même observation que pour l'été, et ce pour deux raisons principales. D'une part, la surface pâturable est importante au regard de la taille des lots d'animaux sédentarisés. D'autre part, le retour du lot d'animaux qui estive est repoussé au maximum pour des raisons de simplification du travail. Comme les quatre années de suivi sont marquées par de faibles stress hydriques estivaux, les durées de vie de feuilles calculées correspondent à des successions de cohortes de feuilles et non à des accumulations de températures durant lesquelles la croissance de l'herbe est arrêtée. Le temps de retour après une récolte ou un pâturage sur les parcelles pâturées à l'automne et en fin d'automne est, respectivement chez CC et MF, en moyenne de 1 202°.j et 1 239°.j soit, compte tenu de la composition des prairies en types fonctionnels de graminées, 1,8 et 2,0 durées de vie de feuilles sur les prairies de fond de vallée. Or, plus le

pâturage d'automne est prolongé, et réalisé sur de l'herbe de qualité, meilleur est son impact sur l'état des animaux à l'entrée à l'étable et le niveau des stocks. Il serait donc intéressant, pour ce cas également, d'**envisager une date de retour sur ces prairies proche d'une durée de vie de feuilles**, éventuellement en élargissant la surface de fond de vallée pâturée pour couvrir les besoins des animaux sur une période plus longue, voire pour finir quelques animaux au pâturage et ainsi augmenter la demande en pacage. Cette suggestion est confortée par le fait que les éleveurs constatent beaucoup de gaspillage d'herbe entre la redescende de l'estive et le retour à l'étable des animaux.

• Les fourrages récoltés

Toutes les parcelles fauchées sont à dominante de types fonctionnels de graminées A et B. La première récolte d'herbe, éventuellement déprimée, est destinée à assurer les stocks fourragers pour l'alimentation d'un troupeau allaitant (la quantité est privilégiée par rapport à la qualité). Elle doit survenir au pic de production, peu de temps après la floraison des graminées, avant que la croissance ne s'arrête et que de l'herbe récoltable ne se perde par sénescence. Pour la même raison, une première récolte d'herbe préalablement étêtée ou un regain doivent être effectués après une durée de repousse d'environ une durée de vie de feuilles. Or, chez CC comme chez MF, **chaque année, plusieurs prairies** (par ex. 57% de la surface fauchée en premier cycle chez CC) **sont récoltées après la fin du pic de production d'herbe** (figure 5a). **Les prairies étêtées ou récoltées en regains le sont après une voire même plus de deux durées de vie de feuilles** compte tenu de la composition des prairies en types fonctionnels de graminées (figures 5b et 5c). Dans chacun des cas, les récoltes sont donc trop tardives pour bénéficier du maximum d'herbe

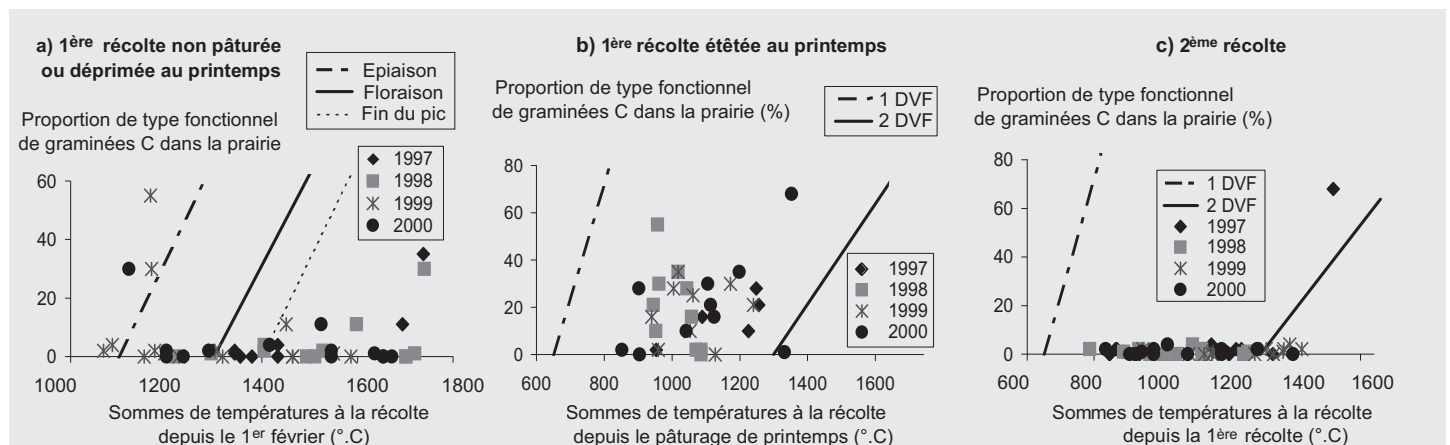


FIGURE 5 : Caractérisation du stade phénologique lors des récoltes de chaque parcelle récoltée chez l'exploitant CC pour la période 1997-2000, selon leur date (en somme de températures) et la proportion de type fonctionnel de graminées C dans la végétation prairiale.

FIGURE 5 : Characterization of the phenological stage at the harvest of each field on the CC farm during the period 1997-2000, according to the date (in cumulated temperatures) and to the proportion of grasses of the C functional type in the sward.

Plus la proportion de type fonctionnel de graminées C augmente (et donc la proportion des types fonctionnels A et B diminue), plus la végétation est tardive au regard des stades phénologiques et des durées de vie des feuilles (DVF). Les droites représentent ces différents repères. Les points correspondent chacun à la récolte d'une parcelle une année, et sont situés par rapport à ces repères pour apprécier l'adéquation de la récolte avec le potentiel productif des prairies ou la fonction qui leur est assignée. Les parcelles récoltées en première coupe ne l'ont pas nécessairement été en seconde coupe ; de ce fait, les points correspondant à certaines proportions de type fonctionnel de graminées C en première coupe ne figurent pas sur le graphe représentant les deuxièmes coupes.

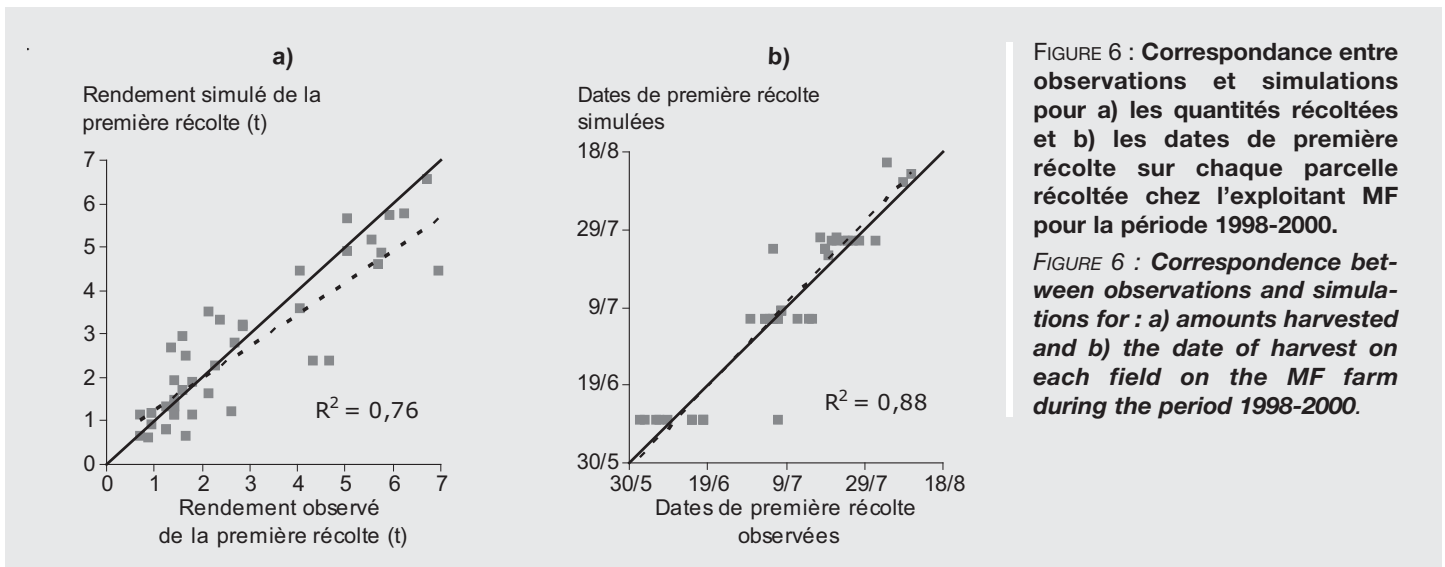


FIGURE 6 : Correspondance entre observations et simulations pour a) les quantités récoltées et b) les dates de première récolte sur chaque parcelle récoltée chez l'exploitant MF pour la période 1998-2000.

FIGURE 6 : Correspondance between observations and simulations for : a) amounts harvested and b) the date of harvest on each field on the MF farm during the period 1998-2000.

récoltable, et aboutissent à un foin et un enrubannage de faible digestibilité. Dans les prairies de fond de vallée, **faucher plus tôt au printemps permettrait d'avancer la date des regains et même d'envisager une troisième récolte en fin d'été, les années favorables**. Pour ce faire, les premières récoltes devraient être déclenchées avant le stade floraison, voire au stade épiaison compte tenu de la lenteur des chantiers de fenaison, en ayant recours à plus d'enrubannage lorsque la météo est défavorable. Les regains devraient avoir lieu peu après une durée de vie de feuilles.

■ Evaluation de l'adaptation du modèle de simulation aux deux systèmes

● Capacité du modèle de simulation adapté à reproduire la diversité des processus biologiques

La simulation fournit une représentation qui rend bien compte de la diversité des processus biologiques dans l'espace (ou entre entités, par ex. catégories d'animaux) et dans le temps. Par exemple, en intégrant les différences de profondeur de sols, de nutrition minérale, d'altitude et de types de végétations, les quantités récoltées simulées pour chaque parcelle sont voisines des observations en première récolte (chez MF : $R^2 = 0,76$, $P < 0,001$, figure 6a), mais le sont moins en seconde récolte (chez MF : $R^2 = 0,65$, $P < 0,001$). Cependant si, pour les années du suivi, la correspondance entre quantités récoltées observées et simulées est satisfaisante, elle l'est moins pour les années caractérisées par des stress hydriques plus marqués, par exemple l'année 2003. Ces années-là, seule une partie des premières récoltes est effectuée dans les simulations. Pourtant, les éleveurs nous ont confirmé qu'ils avaient pu procéder à des secondes récoltes, y compris pour l'année 2003. Ce problème a de nombreuses origines potentielles : une mauvaise appréciation de la réserve utile en eau du sol, une modélisation inadéquate des processus de croissance ou de sénescence en conditions de stress hydrique, etc. Par conséquent, **les résultats présentés par la suite ne portent que sur les années sans stress hydrique marqué** pour lesquelles la simulation des processus biologiques est réaliste.

Dans les simulations, les quantités de stocks fourragers ingérés par les vaches augmentent à l'approche du vêlage (mi-février) et durant la phase de lactation (mi-février - août) dans des ordres de grandeur correspondant aux références disponibles (Institut de l'Élevage, 2006). Au printemps, les temps de séjour des animaux au pâturage sont conformes aux observations à un peu plus d'un jour près en moyenne (chez MF : $R^2 = 0,67$, $P < 0,001$, figure 7a). **Les relations et leurs dynamiques introduites dans le modèle entre croissance et sénescence de l'herbe, biomasse d'herbe disponible, hauteur d'herbe, digestibilité et ingestibilité de l'herbe, capacité d'ingestion et ingestion des animaux semblent donc cohérentes.**

● Capacité du modèle de simulation adapté à reproduire le comportement gestionnaire des deux éleveurs

Les dates des événements clés (mise à l'herbe, déplacement des lots d'animaux au pâturage sur les prairies de versant, retour à l'étable, etc.) qui rythment les transitions entre saisons-pratiques sont simulées, tous lots d'animaux confondus, avec une différence moyenne, par exemple chez CC, d'un peu plus de quatre jours par rapport aux observations conduites. Entre ces événements, c'est-à-dire au sein des saisons-pratiques, les déplacements des lots d'animaux sont simulés au printemps avec une différence moyenne entre les dates simulées et observées de 2 jours chez CC et 3 jours chez MF ($R^2 = 0,87$, $P < 0,001$, figure 7b). Cette correspondance se détériore au fil de l'année mais les enchaînements de déplacements d'animaux restent relativement conformes aux observations. Chez MF, la date de réalisation des récoltes est, à 5 jours près en moyenne, conforme aux observations sur les trois années de suivi ($R^2 = 0,89$, $P < 0,001$, figure 6b). **La modélisation d'une part des processus décisionnels inducteurs des pratiques des deux éleveurs et, d'autre part, des relations entre état du système, prise de décision et réalisation, et effets des pratiques est donc assez cohérente et réaliste.**

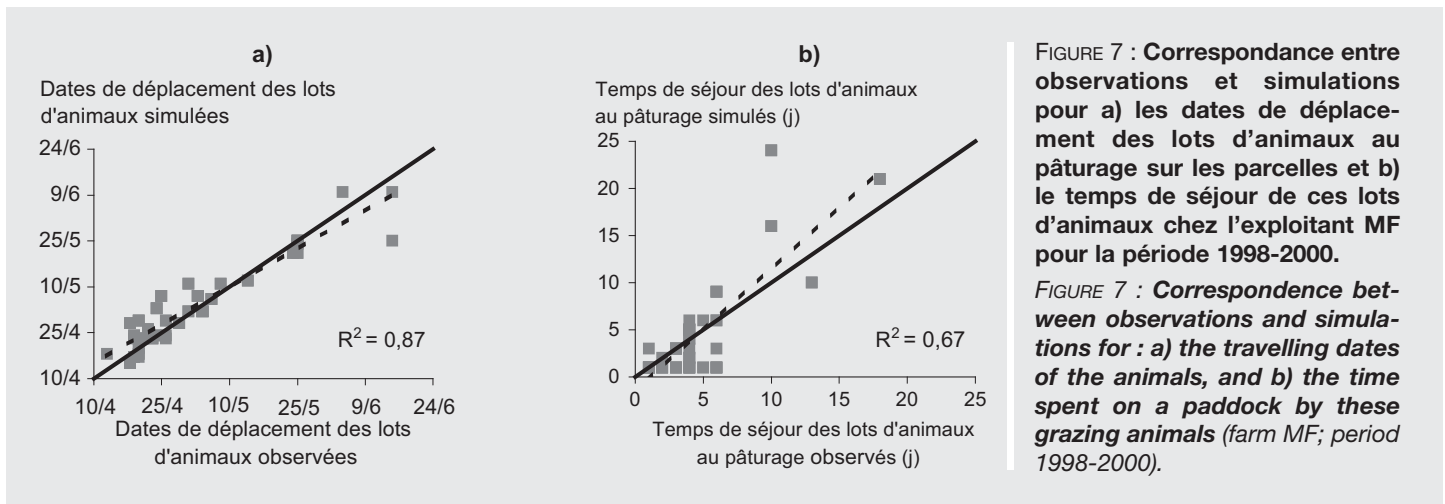


FIGURE 7 : Correspondance entre observations et simulations pour a) les dates de déplacement des lots d'animaux au pâturage sur les parcelles et b) le temps de séjour de ces lots d'animaux chez l'exploitant MF pour la période 1998-2000.

FIGURE 7 : Correspondence between observations and simulations for : a) the travelling dates of the animals, and b) the time spent on a paddock by these grazing animals (farm MF; period 1998-2000).

• Capacité du modèle de simulation adapté à reproduire les performances annuelles des deux systèmes

Les quantités simulées de fourrages récoltés annuellement sont surestimées de 7% en moyenne chez CC, et sous-estimées de 13% en moyenne chez MF (tableau 2). La simulation reproduit de manière satisfaisante la nature (augmentation vs. diminution) et l'ampleur des variations interannuelles des quantités de fourrages récoltés, *i.e.* en moyenne 19% chez CC et 9% chez MF contre 15% observés chez chacun d'entre eux. Les besoins en stocks fourragers simulés sont inférieurs de 21% en moyenne aux observations chez CC, et sont identiques aux observations chez MF (tableau 2). Les éleveurs ont souligné la nature plus appétante des fourrages issus de chez MF. Par conséquent, les refus y sont sans doute moins élevés que chez CC. La prise en compte d'un coefficient identique pour les refus, *i.e.* 10% des quantités distribuées, dans les deux systèmes pourrait donc avoir conduit à sous-estimer les besoins en stocks fourragers chez CC. La part de la pâture dans l'alimentation est, chez CC comme chez MF, inférieure à la valeur de référence issue du cas type (tableau 2). Il s'agit toutefois d'un ordre de grandeur réaliste puisque le cas type considère une mise à l'herbe plus précoce qu'observée dans les deux systèmes étudiés. Les simulations conduisent à une production brute de viande vive en moyenne de 190 kg/UGB et 173 kg/UGB chez CC et MF, contre 218 kg/UGB pour le cas type (tableau 2). Cette différence s'explique pour partie par le fait que le cas type considère des concentrés dans la ration des animaux, ce qui n'est pas le cas

des deux systèmes suivis. Par rapport aux observations et aux références disponibles, **le modèle de simulation adapté à chacun des deux systèmes fournit donc une représentation cohérente des performances de ces systèmes** pour les années sans stress hydrique marqué.

■ Evaluation par simulation des systèmes modifiés traduisant les recommandations issues du diagnostic

La recommandation issue du diagnostic consistant en un pâturage de printemps moins intensif sur une surface plus importante ne pouvait pas être évaluée avec la version courante de SEDIVER. En effet, la représentation des conséquences d'un pâturage y est insuffisamment détaillée pour distinguer un déprimage peu intensif d'un étéage. **Les systèmes modifiés évalués par simulation incluent uniquement les recommandations pour l'été, l'automne, la fin d'automne et les récoltes.**

Les résultats de simulation montrent, pour les systèmes modifiés, **des performances annuelles très voisines**, voire identiques, aux systèmes actuels pour l'ensemble des indicateurs de performances à l'exception de la digestibilité des fourrages récoltés (tableau 3). En effet, l'impact relatif des modifications sur les autres indicateurs est inférieur à 5% et peut être considéré comme non significatif. La variabilité interannuelle simulée des indicateurs de performance est également très proche pour les systèmes actuels et modifiés. Avec le système modifié, **la digestibilité des fourrages**

Eleveur	Données	Récolte de fourrages (t MS)	Besoins en fourrages (t MS)	Part de la pâture dans l'alimentation (%)	Production brute de viande vive (kg/UGB)
CC	Observées	109,2	114,3	63*	218*
	Simulées	117,2	94,1	59	190
MF	Observées	62,9	67,3	63*	218*
	Simulées	55,6	67,3	60	173

* Les valeurs observées avec un astérisque proviennent du cas type ; les autres ont été mesurées et validées par les éleveurs

TABEAU 2 : Valeurs moyennes des principaux indicateurs agrégés de performance des systèmes herbagers étudiés pour la période 1998-2000.

TABLE 2 : Mean values of the main aggregate indicators of performance for the grassland systems studied during the 1998-2000 period.

Éleveur	Système simulé	Système simulé	Récolte de fourrages (t MS/UGB)	Besoins en fourrages (t MS/UGB)	Digestibilité des fourrages récoltés	Part de la pâture dans l'alimentation (%)	Efficiences d'utilisation de l'herbe (%)	Production brute de viande vive (kg/UGB)
CC	Actuel	Actuel	2,39	2,62	0,61	59	51	191
	Modifié	Modifié	2,30	2,58	0,67	59	53	194
MF	Actuel	Actuel	1,34	1,71	0,63	60	74	171
	Modifié	Modifié	1,40	1,77	0,72	59	74	171

TABLEAU 3 : Valeurs moyennes des principaux indicateurs agrégés de performance des systèmes herbagers étudiés pour le système actuel et le système modifié incluant les recommandations issues du diagnostic. Les simulations ont été effectuées pour les années 1998, 1999, 2000 et 2002.

TABLE 3 : Mean values of the main aggregate indicators of performance for the present system and for the modified system where the recommendations from the diagnosis were included. The simulations were made for the years 1998, 1999, 2000 and 2002.

récoltés augmente en moyenne de 0,06 et 0,10 chez CC et MF. Cette augmentation de la digestibilité pourrait se répercuter sur l'ingestibilité de ces fourrages. Or, si l'ingestibilité et donc les quantités ingérées quotidiennement par les animaux venaient à augmenter alors que les stocks fourragers sont constants, l'autonomie fourragère diminuerait probablement. Cette conclusion tendrait donc à conforter l'orientation actuelle des éleveurs vers la production de fourrages grossiers et une organisation du travail plus simple que dans les systèmes modifiés.

La première récolte sur les prairies de fond de vallée non pâturées au printemps survient chez CC entre 880°.j et 1 230°.j. Compte tenu de la surface à faucher, de la vitesse d'avancement des chantiers de récolte et du risque accru de pluies à cette période, il est nécessaire de débiter les premières récoltes dès 880°.j soit à la mi-mai, ce qui conduit à procéder aux deuxièmes et troisièmes récoltes lorsque les repousses sont âgées de 700°.j à 1 050°.j et de 660°.j à 930°.j respectivement. Les prairies de versant pâturées au printemps sont récoltées lorsque les repousses sont âgées de 770°.j à 1 220°.j. **Les fauches sont donc réalisées à un moment plus proche des repères phénologiques considérés optimaux**, c.a.d. une durée de vie de feuilles pour les deuxièmes et troisièmes récoltes. **Les contraintes sur la disponibilité des ressources** (main d'œuvre, matériel agricole) **ou d'ordre climatique ne permettent toutefois pas**, y compris en repensant l'ordre de réalisation des récoltes pour bénéficier des durées de vie de feuilles plus longues, **de s'approcher plus encore de ces repères phénologiques** pour ainsi limiter les pertes par sénescence de biomasse d'herbe récoltable. C'est l'une des raisons pour lesquelles les quantités de stocks fourragers récoltées annuellement avec les systèmes modifiés ne sont pas très différentes de celles obtenues avec les systèmes actuels.

Les modifications de la gestion du pâturage d'été et d'automne ont un effet bénéfique sur la digestibilité de l'herbe pâturée. Ces gains en digestibilité de l'herbe se répercutent sur l'ingestion des animaux, et sur leurs performances. C'est ainsi que chez CC, le lot d'animaux n'estivant pas rentre à l'étable avec une note d'état supérieure de 0,1 point en moyenne avec le système modifié. Le lot d'animaux qui estivent en bénéficie également à l'automne et rentre à l'étable avec une note d'état supérieure de 0,04 point en moyenne.

Conclusions

■ Des marges d'amélioration limitées pour les deux systèmes

Déjà en 1998, THEAU *et al.* suggéraient, à l'issue d'un diagnostic, que des marges d'amélioration sur l'utilisation de l'herbe étaient envisageables dans les deux systèmes étudiés pour améliorer leur autonomie fourragère, notamment en avançant les dates des récoltes. Ils en appelaient alors à une évaluation par simulation de la faisabilité de ces recommandations. **Il s'avère, après avoir conduit cette évaluation, que les marges d'amélioration issues d'un avancement des dates de récoltes sont très limitées.** Les contraintes structurelles (proportion de surfaces de fond de vallée, main d'œuvre disponible, etc.) et climatiques sont telles que les pratiques modifiées à l'issue du diagnostic, supposées conduire à une amélioration de la production et de l'efficacité d'utilisation de l'herbe, ne s'avèrent pas applicables dans les fenêtres temporelles pour lesquelles les pertes de quantité et de qualité de l'herbe sont limitées. Le diagnostic reste valide, mais les préconisations limitées par ces contraintes, satisfaisant ainsi le vieil adage : "les éleveurs ont de bonnes raisons de faire ce qu'ils font..." C'est d'ailleurs ces mêmes contraintes qui poussent les éleveurs à étiétrer une partie de leurs prés de fauche. C'est probablement dans l'**identification de nouveaux modes de gestion qui évitent cet étiétrement** que réside **la plus grande marge d'amélioration** des quantités de stocks fourragers récoltés annuellement. En effet, la production quotidienne d'herbe va jusqu'à tripler durant la phase reproductrice (DURU *et al.*, 2009). Chez CC par exemple, deux tiers de la surface récoltée sont pâturés au printemps, et les étiétrements sont fréquents. Une valorisation plus importante du potentiel de production des prairies de fond de vallée constitue une autre marge d'amélioration. Par exemple, chez CC, l'indice de nutrition minérale moyen pondéré par la surface est de 0,70, ce qui laisse la place à des pratiques de fertilisation plus intensives. Il est toutefois judicieux de se demander si cette augmentation de production se traduirait nécessairement par une meilleure utilisation de l'herbe. Une chaîne de récolte nécessitant des temps de séchage réduits (ensilage, séchage en grange) pourrait alors constituer une voie d'amélioration importante.

■ Une démarche originale pour l'analyse et la conception de systèmes fourragers herbagers

Cette étude pose les bases d'une démarche originale qui articule suivi d'élevages, analyse fonctionnelle du système fourrager, diagnostic de pratiques d'éleveurs, modélisation systémique et simulation dynamique. La plupart de ces approches s'appuient sur des bases scientifiques avérées et transposables hors du cadre de cette étude. Par exemple, la pertinence de la typologie fonctionnelle des graminées a déjà été démontrée dans plusieurs autres contextes (Limousin, Massif central, Brésil, etc.). C'est ainsi que la combinaison de deux approches fonctionnelles, pour l'analyse des pratiques fourragères (BELLON *et al.*, 1999) et des végétations (ANSQUER *et al.*, 2004), en fait une méthode non empirique et généralisable d'analyse des systèmes fourragers. De même, le modèle de simulation SEDIVER s'appuie sur un cadre générique pour la modélisation et la simulation de systèmes agricoles qui a déjà été appliquée à l'élevage, à la vigne ou aux grandes cultures. Y compris pour les cultures, la plupart des démarches existantes s'appuient sur deux des méthodes précitées, par exemple suivi et diagnostic, et ne s'appliquent qu'à l'échelle de la parcelle. Il s'agit ici de l'un des premiers exemples de démarche qui combine et articule l'ensemble de ces méthodes dans **un continuum cohérent pour l'analyse et la conception de systèmes agricoles**. Il convient désormais d'enrichir cette démarche, notamment le modèle de simulation SEDIVER, pour dépasser ses limites actuelles (fiabilité des simulations en conditions de stress hydrique marqué, distinction entre déprimage et étêtage).

Les résultats obtenus pour ces deux cas ont remis en cause des valeurs directrices qui guidaient certains de nos travaux. La simulation nous a révélé que certaines des adaptations qui nous semblaient réalistes sur la base des diagnostics réalisés à l'échelle de la parcelle ne l'étaient sans doute pas à l'échelle du système, lorsque l'on prend en compte les contraintes structurelles et climatiques rencontrées au quotidien par les éleveurs. Ainsi, **parce qu'elle est pertinente pour traiter des questions opérationnelles de gestion des systèmes fourragers, la démarche proposée doit permettre d'alimenter les discussions** avec les conseillers agricoles et les éleveurs. **Il est ainsi possible d'envisager la conception de systèmes fourragers herbagers innovants** rendue nécessaire par les nouveaux enjeux entourant l'élevage : changement climatique, volatilité des prix des produits, etc. A l'heure actuelle, si les méthodes d'analyse fonctionnelle du système fourrager et de diagnostic sont promues et diffusées dans le cadre de dispositifs de formation des conseillers agricoles, l'utilisation du modèle de simulation SEDIVER est complexe à mettre en œuvre et reste cantonnée à notre équipe de recherche. Il est toutefois envisagé que SEDIVER soit utilisé dans des ateliers de conception de systèmes fourragers herbagers innovants organisés avec des experts de différentes natures (chercheurs, conseillers agricoles, éleveurs, etc.).

Accepté pour publication,
le 26 janvier 2010.

Remerciements : Cette recherche a pu être réalisée grâce aux soutiens des projets ANR ADD TRANS (TRANSformations de l'élevage et dynamiques des espaces, ANR-05-PADD-003) et ANR VMC VALIDATE (Vulnerability Assessment of Livestock and grasslands to climate change and extreme Events, ANR-07-VULN-011). Nous souhaitons remercier tout

particulièrement les éleveurs d'Ercé ayant participé à ce travail pour leur riche collaboration. Nous remercions également Roger Martin-Clouaire et Jean-Pierre Rellier pour leur contribution au développement du modèle de simulation SEDIVER.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANSQUER P., THEAU J.P., CRUZ P., VIEGAS J., AL HAJ KHALED R., DURU M. (2004) : "Caractérisation de la diversité fonctionnelle des prairies à flore complexe: vers la construction d'outils de gestion", *Fourrages*, 179, 353-368.
- ANSQUER P., DURU M., THEAU J.P., CRUZ P. (2008) : "Functional traits as indicators of fodder provision over a short time scale in species-rich grasslands", *Annals of Botany*, 103, 117-126.
- BELLON S., GIRARD N., GUERIN G. (1999) : "Caractériser les saisons-pratiques pour comprendre l'organisation d'une campagne de pâturage", *Fourrages*, 158, 115-132.
- CHAZELAS L., THEAU J.P. (2008) : "Appréhender la diversité fonctionnelle des prairies pour mieux les gérer", Cruz P., Jouany C., Theau J.P. éd.s., *Les Cahiers d'ORPHEE 1.*, INRA-SAD, Toulouse, 289-299.
- CROS M.J., DURU M., GARCIA F., MARTIN-CLOUAIRE R. (2004) : "Simulating management strategies: the rotational grazing example", *Agricultural Systems*, 80, 23-42.
- CRUZ P., DURU M., THEROND O., THEAU J.P., DUCOURTIEUX C., JOUANY C., AL HAJ KHALED R., ANSQUER P. (2002) : "Une nouvelle approche pour caractériser les prairies naturelles et leur valeur d'usage", *Fourrages*, 172, 335-354.
- DAGET P., POISSONNET P. (1971) : "Une méthode d'analyse phytosociologique des prairies. Critères d'application", *Annales Agronomiques*, 22, 5-41.
- DURU M., DELABY L. (2003) : "The use of herbage nitrogen status to optimize herbage composition and intake and to minimize nitrogen excretion: an assessment of grazing management flexibility for dairy cows", *Grass & Forage Sci.*, 58, 350-361.
- DURU M., LEMAIRE G., CRUZ P. (1997) : "The nitrogen requirements of grasslands", Lemaire G. éd., *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*, Springer-Verlag, Berlin, 59-72.
- DURU M., CRUZ P., THEAU J.P., JOUANY C., ANSQUER P., AL HAJ KHALED R., THEROND O. (2007) : "Typologies des prairies riches en espèces en vue d'évaluer leur valeur d'usage : bases agro-écologiques et exemples d'applications", *Fourrages*, 192, 453-475.
- DURU M., ADAM M., CRUZ P., MARTIN G., ANSQUER P., DUCOURTIEUX C., JOUANY C., THEAU J.P., VIEGAS J. (2009a) : "Modelling above-ground herbage mass for a wide range of grassland community types", *Ecological Modelling*, 220, 209-225.
- GILLET M. (1980) : *Les graminées fourragères : Description, fonctionnement, application à la culture de l'herbe*, Gauthier-Villars, Paris, 306 p.
- GUERIN G., BELLON S. (1990) : "Analyse des fonctions des surfaces pastorales dans des systèmes de pâturage méditerranéens", *Études et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement*, 17, 147-158.
- Institut de l'Élevage (2006) : "Naisseur de broutards en montagne Pyrénées", http://www.inst-elevage.asso.fr/html1/IMG/pdf_101.1-Naisseur_de_broutards_en_montagne_Pyrenees.pdf
- JOUANY C., CRUZ P., PETIBON P., DURU M. (2004) : "Diagnosing phosphorus status of natural grassland in the presence of white clover", *Europ. J. of Agronomy*, 21, 273-285.
- LEMAIRE G. (1999) : "Les flux de tissus foliaires au sein des peuplements prairiaux. Éléments pour une conduite raisonnée du pâturage", *Fourrages*, 159, 203-222.
- MARTIN G., MARTIN-CLOUAIRE R., RELIER J.P., DURU M. (2009) : "A simulation model to design grassland-based beef systems", Soumis à *Environmental Modelling and Software*.
- PLANTUREUX S., BONISCHOT R., GUCKERT A. (1992) : "Utilisation d'une typologie des prairies permanentes du Plateau lorrain pour le diagnostic agronomique", *Fourrages*, 132, 381-394.
- THEAU J.P., COLENO F.C., DURU M., RAUZY Y. (1998) : "L'utilisation de l'herbe pâturée et fauchée en référence au potentiel de production des prairies", *Fourrages*, 156, 589-601.