

L'élaboration de références pour l'aide à la gestion : le cas des prairies de fauche dans les Pyrénées Centrales

Gibon A., Duru M., Balent G.

in

Gibon J. (ed.), Lasseur J. (ed.), Manrique E. (ed.), Masson P. (ed.), Pluvinage J. (ed.), Revilla R. (ed.).
Systèmes d'élevage et gestion de l'espace en montagnes et collines méditerranéennes

Zaragoza : CIHEAM

Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches; n. 27

1999

pages 173-196

Article available on line / Article disponible en ligne à l'adresse :

<http://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=99600308>

To cite this article / Pour citer cet article

Gibon A., Duru M., Balent G. **L'élaboration de références pour l'aide à la gestion : le cas des prairies de fauche dans les Pyrénées Centrales.** In : Gibon J. (ed.), Lasseur J. (ed.), Manrique E. (ed.), Masson P. (ed.), Pluvinage J. (ed.), Revilla R. (ed.). *Systèmes d'élevage et gestion de l'espace en montagnes et collines méditerranéennes*. Zaragoza : CIHEAM, 1999. p. 173-196 (Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches; n. 27)



<http://www.ciheam.org/>
<http://om.ciheam.org/>

L'élaboration de références pour l'aide à la gestion : le cas des prairies de fauche dans les Pyrénées Centrales

A. Gibon*, M. Duru*/** et G. Balent*

*Unité de Recherche Systèmes Agraires et Développement (URSA),
INRA-Centre de Recherche de Toulouse
BP 27, 31326 Castanet Tolosan Cedex, France

**Unité d'Agronomie, INRA-Centre de Recherche de Toulouse
BP 27, 31326 Castanet Tolosan Cedex, France

RESUME – Nous présentons dans cet article les travaux effectués en vue d'aider les agriculteurs des Pyrénées Centrales à maîtriser la gestion de leurs prairies de fauche et à atteindre leurs objectifs d'amélioration de leurs stocks fourragers hivernaux. Les travaux ont été conduits à deux niveaux. Au niveau de la parcelle, nous avons élaboré des outils de diagnostic agro-écologique des prairies et des modèles sur la dynamique de la végétation et de la production. Au niveau de l'exploitation, nous avons utilisé les références élaborées au niveau de la parcelle et un modèle des pratiques de gestion de la sole fauchée pour construire un modèle de simulation. L'objectif est de fournir aux agriculteurs et à leurs conseillers un outil d'évaluation de changements envisagés dans la sole elle-même, dans l'équipement pour les récoltes ou simplement dans la gestion de la sole. Ces outils aident à raisonner la conduite des prairies en fonction d'objectifs agricoles et agri-environnementaux, et en référence au risque climatique. La comparaison de nos travaux avec d'autres démarches d'élaboration de références régionales en France nous permettent de discuter l'évolution des bases du conseil en matière de gestion des prairies permanentes.

Mots-clés : Prairie permanente, diversité floristique, typologie de prairies, croissance de l'herbe, qualité de l'herbe, sole cultivée, diagnostic, modélisation, simulation, aide à la décision, risque climatique, montagne.

SUMMARY – "Development of references for management support: The case of the hayfields in the Central Pyrenees". We present in this paper a research undergone for providing the farmers in the Central Pyrenees with support in the management of their hayfields with regard to their winter forage stocks objectives. In this work two organisational levels have been addressed. At the field level, we have proposed agro-ecological tools for assessing the grassland diversity and models for addressing the dynamics of their vegetation and their production. At the farm level, and using the field level references, we have modelled the management practices of the whole set of hayfields in order to build a simulation tool. Our aim is to provide the farmers and their advisors with a provisional assessment of changes in the hayfields spatial structure and the harvesting equipment or again in management rules. Such tools can help to adapt hayfields management in reference to production or agri-environmental objectives, and to climatic uncertainty. A comparison of our approach with similar research in other regions point out the current changes in France in the conception of the bases for technical advice in the field of permanent grasslands management.

Key-words: Permanent meadow, botanical composition diversity, grassland typology, herbage growth, herbage quality, field management, farm management, modelling, simulation, decision support, climatic risk, mountain.

Introduction

Le changement important du contexte de l'agriculture, avec, en Europe la nouvelle Politique Agricole Commune, et plus largement la remise en cause des modèles antérieurs de production et de développement agricole, amène de nombreuses interrogations sur la fonction d'appui technique et sur les bases que l'on doit aujourd'hui lui donner (Attonaty et Soler, 1994 ; Cerf *et al.*, 1994b). Des incertitudes de tous ordres, liées en particulier aux politiques d'orientation, de structures et des prix de la PAC, et l'émergence de contraintes et d'objectifs nouveaux, comme les préoccupations environnementales, viennent s'ajouter aux incertitudes plus classiques auxquelles les agriculteurs ont eu à faire face de tout temps (aléa climatique en particulier). Le renouvellement des bases du conseil technique est une question d'actualité, qui oblige les chercheurs à bien identifier et souvent à modifier la conception des recherches finalisées. De plus en plus, il s'agit d'aider les agriculteurs à définir des stratégies de conduite des exploitations qui présentent une flexibilité importante, plutôt que de leur

proposer des "modèles à suivre" ou des outils d'optimisation de leur conduite d'exploitation (Attonaty et Soler, op. cit.).

Nos travaux sur les prairies de fauche des Pyrénées Centrales s'inscrivent dans ce nouveau courant de recherche. Notre recherche a été dès son début finalisée et orientée par des objectifs d'aide à la gestion des exploitations. Ce n'est qu'après une phase de diagnostic interdisciplinaire de la situation et du fonctionnement de l'élevage pyrénéen au niveau des vallées et des exploitations que nous avons entrepris une recherche sur les prairies de fauche (Gibon et Flamant, 1985). Cette première phase de travaux nous avait amenés à conclure à l'intérêt d'étudier les possibilités d'amélioration de la production et de maîtrise de la gestion des prairies de fauche pour renforcer ce que l'on appelle aujourd'hui la durabilité des exploitations et de l'élevage local. C'est donc par une "voie descendante", de l'exploitation à la parcelle, que nous avons entrepris l'établissement de références. Cette démarche situe d'emblée notre recherche dans le courant de renouvellement des bases du conseil. Il est bien établi aujourd'hui que la proposition de références techniques adaptées demande à l'agronome de les concevoir et de les formuler en référence aux questions de gestion telles que se les pose l'agriculteur (Cerf *et al.*, 1994b). Il est important que les références puissent répondre à ses interrogations, qui portent en tout premier lieu sur l'organisation d'ensemble de l'exploitation. La modélisation des stratégies de gestion des soles (ensemble des parcelles d'une exploitation consacrées à une même culture), longtemps négligée ou abordée de manière descriptive (Gras *et al.*, 1989), apparaît aujourd'hui comme un champ de recherche important pour les agronomes (Aubry, 1994). Tout d'abord perçue comme un support nécessaire au renouvellement du conseil en matière d'équipement et d'organisation du travail, en particulier pour la gestion des "pointes de travail" que constitue la période des labours en grande culture (Cerf *et al.*, 1994a), cette modélisation apparaît de plus en plus utile au raisonnement d'ensemble des choix techniques, en référence non seulement au travail et aux équipements, mais aussi aux performances de production (cf. nos travaux et Aubry, op. cit.). Les auteurs que nous venons de citer cherchent généralement à fonder le conseil au niveau de l'exploitation sur la construction d'outils de simulation. D'autres proposent une méthodologie plus légère, basée sur une grille de diagnostic. C'est par exemple le cas de Fleury *et al.* (1995), qui fondent le conseil sur l'identification des fonctions que les différentes parcelles peuvent remplir pour l'alimentation du troupeau en fonction des objectifs de l'éleveur et sur l'utilisation d'une typologie de prairies (Fleury *et al.*, 1994).

L'articulation de références à la parcelle et d'outils d'aide à la gestion de la sole constitue un enjeu important. Mais quels types de références parcellaires et quels types d'outils d'aide à la gestion de la sole convient-il de rechercher ?

La gestion des prairies de fauche de montagne, de par sa complexité, constitue un support particulièrement riche pour aborder la question dans ses différentes dimensions. En effet, la récolte des fourrages dans une exploitation de montagne constitue une pointe de travail importante et pose des questions difficiles en matière d'équipement et d'organisation du travail en raison de contraintes fortes de mécanisation de parcelles généralement morcelés (Viviani *et al.*, 1992). La diversité des prairies permanentes et de leur production pose à l'agronome de difficiles problèmes de caractérisation et de diagnostic (Balent et Duru, 1984 ; Laissus, 1984 ; Jeannin *et al.*, 1991). Les éleveurs jouent de leur hétérogénéité dans leurs stratégies de gestion (Gibon *et al.*, 1989 ; Bossis, 1994). Enfin l'élaboration des stocks fourragers est très sensible à l'aléa climatique, aussi bien dans la phase d'élaboration du rendement des prairies, que dans celle de réalisation des stocks (Duru et Charpentreau, 1983).

Nous rendons compte dans cet article de la démarche d'ensemble que nous avons suivie pour traiter cette question. Dans une première partie nous présentons nos travaux de modélisation de la diversité des prairies et de leur production en fonction de leurs modes d'utilisation, ainsi que leurs résultats en termes de références pour le conseil. Dans une seconde partie, nous présentons l'approche des stratégies de gestion de la sole fauchée par les agriculteurs, que nous avons développée pour évaluer l'intérêt d'ensemble, au niveau de l'exploitation, de modifications dans la conduite des prairies. Enfin, dans une troisième partie, nous discutons la question générale de l'élaboration de références techniques en vue du conseil.

Modélisation des caractéristiques et de la dynamique des prairies

En préalable à l'exposé de nos travaux sur les prairies de fauche pyrénéennes, il nous paraît utile d'en présenter brièvement les motivations. Le choix de ce thème de recherche peut en effet

surprendre dans une recherche finalisée par l'aide à la maîtrise de la gestion de l'espace, et pourrait paraître a priori assez éloigné des priorités actuelles de conseil technique en région de montagne.

Dans les milieux européens d'élevage extensif, où la préservation des paysages et la conservation de formations végétales pastorales à forte richesse écologique sont devenues un enjeu important pour l'avenir, l'élevage est perçu aujourd'hui comme l'activité la mieux à même d'assurer l'entretien de l'espace (Benoît, 1994 ; Brossier, 1995). L'accent est généralement mis sur le pâturage, dont l'importance directe sur l'évolution des couverts pastoraux est bien reconnue (Balent *et al.*, 1998). Nous considérons que cet objectif demande aussi de s'attacher à la constitution des stocks fourragers hivernaux. La maîtrise technique de la gestion des prairies de fauche et celle des coûts de constitution des stocks nous semblent en effet importants à considérer, si l'on souhaite maintenir en nombre suffisant des exploitations économiquement viables qui assurent efficacement la fonction environnementale que l'on en attend. Pour que l'élevage soit capable de bien entretenir et valoriser les surfaces pastorales à la belle saison, il est nécessaire de pouvoir assurer l'hivernage d'animaux suffisamment nombreux. Si la constitution de stocks fourragers est une des difficultés classiques et bien connues de l'élevage en zone de montagne, l'évolution récente de l'agriculture contribue à renouveler le questionnement à son sujet. Les exploitations se sont souvent agrandies, et on observe par ailleurs un mouvement général d'abandon de la fauche des parcelles les plus difficiles (de par leur pente ou leur éloignement), et des prairies les moins productives. Cet abandon d'une partie non négligeable des surfaces vouées à la fauche renforce le déséquilibre classique de ces milieux entre des disponibilités en herbe très importantes à la belle saison et des capacités limitées d'entretien hivernal des animaux (Revilla, 1987). C'est particulièrement vrai dans les Pyrénées Centrales, où la structuration du milieu en vallées étroites conduit à un rapport très défavorable entre surfaces cultivables et surfaces uniquement pâturables (Gibon, 1981). Cet abandon contribue aussi à l'apparition de problèmes environnementaux, tels que la dégradation des paysages et l'enfrichement des versants (cf. Balent et Gibon dans cet ouvrage).

La prairie permanente : Un système complexe dont la représentation demande d'articuler plusieurs points de vue

L'étude des relations entre pratiques (fertilisation, modes et dates de récolte) et performances d'un ensemble de parcelles à l'échelle régionale est généralement complexe du fait de la diversité des prairies et des multiples interactions entre facteurs susceptibles d'en modifier les performances. Nous avons cherché à appuyer la proposition de références sur l'établissement de modèles construits en référence la plus étroite possible au fonctionnement agro-écologique des prairies. La démarche que nous avons suivie comporte trois volets. L'un vise à identifier l'effet des caractéristiques du milieu et des pratiques sur l'état de la végétation et sur la capacité de production de la prairie, et à caractériser des types de prairies sur cette base. Le second consiste à relier les composantes de la production de la prairie (biomasse et qualité nutritive de l'herbe) à la biodisponibilité en éléments minéraux en référence aux conditions climatiques. Le troisième vise à caractériser le niveau de biodisponibilité en éléments minéraux de la façon la plus précise possible pour utiliser au mieux les modèles de la production.

Les résultats dont nous rendons compte ici ont été obtenus à partir de nombreuses observations de terrain et expérimentations en ferme, effectuées depuis une dizaine d'années selon différents protocoles. Ils ont fait récemment l'objet d'un important travail de synthèse en vue d'offrir aux agents de terrain un guide pour le diagnostic et l'utilisation des prairies (Balent *et al.*, 1997). Dans cet article nous résumons les principaux modèles mis au point, et leur utilisation pour la proposition de références. Pour leur détail, nous renvoyons le lecteur aux diverses publications faites sur ces travaux¹.

¹ Les principales références figurent dans le guide à l'usage des conseillers de terrain. Le lecteur pourra également consulter utilement à cette fin l'article effectué à partir de cette synthèse qui a été publié tout récemment dans la revue *Fourrages* (Duru *et al.*, 1998).

Modélisation de la diversité de la composition botanique des prairies en fonction du milieu et des pratiques

Le modèle de dynamique de végétation proposé par Balent (1986) permet de rendre compte des liens entre la composition botanique de la végétation prairiale et les pratiques agricoles dans les conditions de milieu courantes² (Fig. 1). Dans un milieu sans contrainte extrême de sol ou de climat, la composition botanique apparaît étroitement liée à la "fertilité" de la parcelle, c'est à dire au niveau de nutrition de la végétation en éléments minéraux permis par le sol (axe vertical de la Fig. 1) et au "niveau des prélèvements", c'est à dire à la quantité totale de biomasse récoltée annuellement par fauche ou pâturage (axe horizontal). Ce modèle permet également de caractériser les pratiques d'utilisation qui permettent de conserver une végétation de composition stable, ainsi que celles qui vont la transformer. L'observation des dynamiques d'évolution de la composition botanique en fonction du niveau des prélèvements et de la fertilisation a en effet permis de modéliser les trajectoires de changement des communautés végétales sous l'incidence des pratiques (Balent *et al.*, 1993). Ces travaux permettent en outre de définir les limites de la surexploitation des prairies, avec l'envahissement par des espèces nitrophiles pour les intensités très élevées d'exploitation. Parallèlement la caractérisation des trajectoires d'évolution vers la friche des prairies très faiblement utilisées permet de définir la sous-exploitation. On peut ainsi porter un diagnostic sur les compositions botaniques acceptables du point de vue de la production agronomique ou de la qualité écologique du milieu. La gamme de dynamiques de végétation contrôlables par les pratiques et acceptables en référence à ces objectifs peut être délimitée par deux courbes enveloppe, et référée aux pratiques de fertilisation et intensités d'utilisation (Fig.1).

Cinq grands types de prairies ont été définis à partir de ce modèle (Fig. 1 ; Balent *et al.*, 1993). Les principales caractéristiques de la composition botanique de chaque type sont indiquées dans la légende de la figure. Le type auquel se rattache une prairie donnée peut être identifié en projetant la parcelle dans le modèle au moyen de l'information relative à sa composition floristique. Comme développé dans la partie suivante du texte, les modèles de production agronomique sont établis en référence à ces types. On peut ainsi disposer d'éléments sur les caractéristiques de sa production agronomique en fonction des pratiques qui lui seront appliquées.

Diagnostic de l'état nutritionnel du couvert végétal et relation avec les pratiques culturales

Dans cette partie du texte, nous nous référerons le plus souvent aux prairies de type 2 et de type 4 pour illustrer l'importance des différences de comportement productif des prairies³.

La prédiction de la biomasse récoltable, de même que le raisonnement de la fertilisation à l'échelle de la parcelle requièrent un diagnostic fiable que ne permettent pas toujours les analyses de terre (Duru et Thélier-Huché, 1997). A partir des connaissances récentes sur l'utilisation des minéraux par les couverts prairiaux (Lemaire, 1991), nous avons mis au point des indicateurs d'état nutritionnel pour les éléments minéraux majeurs (N, P, K). Les indices de nutrition ont été définis comme le rapport entre la teneur observée dans la végétation et la teneur optimale en l'élément considéré, cette dernière correspondant à la croissance maximale des parties aériennes sans surconsommation d'éléments minéraux par la plante. La teneur optimale diminue avec la biomasse aérienne (Lemaire *et al.*, 1989). La méthode est basée sur l'établissement de courbes générales de relations entre les teneurs de la végétation en éléments minéraux et sa biomasse (poids en matière sèche, MS) et sur la définition d'une courbe limite de référence (%N et MS pour l'azote, %P ou %K et %N pour le phosphore et le potassium). Pour un couple de données situé au dessus de cette courbe, tout apport supplémentaire en l'élément considéré se traduit par une augmentation de teneur sans accroissement

² Etabli à partir d'un échantillon de 70 parcelles (vallée d'Oô, Pyrénées centrales, 900 à 1100 m d'altitude), ce modèle a été validé par plusieurs études complémentaires (Balent *et al.*, 1993).

³ Les dispositifs expérimentaux ayant permis la construction des modèles de production sont situés dans les Pyrénées centrales (Portet de Luchon, 1300 m) et ont été décrits par ailleurs (Duru *et al.*, 1994 ; Duru et Calvière, 1996). Il s'agit de 17 communautés végétales pour les modèles de croissance, ainsi que de 9 et 5 d'entre elles respectivement pour les modèles de composition morphologique et de digestibilité au printemps.

de biomasse. En dessous de cette courbe il y a une déficience qui est d'autant plus élevée que l'écart à la courbe est grand (Fig. 2). L'estimation des paramètres de ces relations pour notre zone d'étude permet de porter un diagnostic sur une prairie quelconque sur la base d'une évaluation de la quantité d'herbe sur pied et de sa teneur en minéraux (Fig. 2).

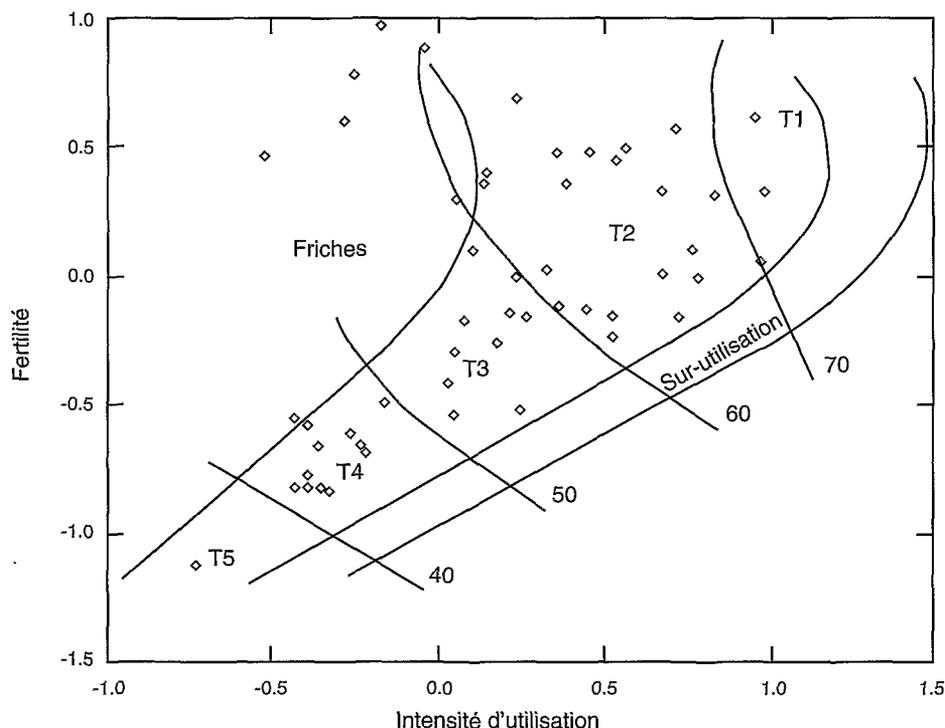


Fig. 1. Modèle de dynamique de la végétation des prairies permanentes en fonction de l'intensité d'utilisation et de la fertilité (D'après Balent, 1996). La partie centrale de la zone a été divisée en 5, chacune de ces zones correspondant à un type particulier de prairies. Les limites entre les types ont été définies sur la base des valeurs pastorales des parcelles dans le modèle de référence. Les valeurs sont données à titre indicatif et ne constituent en aucun cas des frontières étanches entre les différents types. T1 : Prairies riches, très productives et très fortement fertilisées et utilisées. Espèces dominantes : Ray-grass anglais, Trèfle blanc, Plantain lancéolé, Pâturin commun, Pissenlit. T2 : Majorité des prairies typiques ayant un bon niveau de fertilité et une valorisation normale. Espèces dominantes : Dactyle, trèfle blanc, Trèfle violet, Agrostide, Plantain lancéolé, Houlique laineuse, Pâturin des prés, Pissenlit. T3 : Prairies de niveau de fertilité moyen. Espèces dominantes : Dactyle, Agrostide, Stellaire graminée, Pissenlit, Plantain, Trèfle blanc. T4 : Prairies pauvres typiques à base de graminées peu productives et de plantes de pelouses sèches. Espèces dominantes : Fétuque rouge, Agrostide, Trèfle blanc, Pimprenelle, Flouve odorante, Brize intermédiaire. T5 : formes ultimes de dégradation de la végétation herbacée avant l'envahissement par des ligneux. Espèces dominantes : Fétuque rouge, Brachypode penné, Origan, Serpolet, Genêt des Teinturiers, Arbustes.

Etats nutritionnels des principaux types de prairies et relations avec les pratiques culturales

Pour une prairie dont les pratiques de fertilisation et de récolte sont stables d'une année à l'autre, les valeurs des états nutritionnels sont relativement constantes entre années. Elles sont en revanche bien différenciées entre types de prairies (Tableau 1). Les données de ce tableau permettent de caractériser le fonctionnement de chaque type de prairie "à l'équilibre", c'est à dire quand la stabilité des pratiques permet la stabilité de la composition de la végétation (Balent, 1991). Elles indiquent par exemple que les prairies de type 4 correspondent toujours à des situations déficientes en éléments majeurs. Dans la zone d'étude, dans le cadre des pratiques les plus courantes, le maintien des états

nutritionnels d'une prairie découle, selon son type, d'apports réguliers de fumure organique (prairies de type 2) ou d'une absence quasi totale de fertilisation autre que les déjections au pâturage (prairie de type 4).

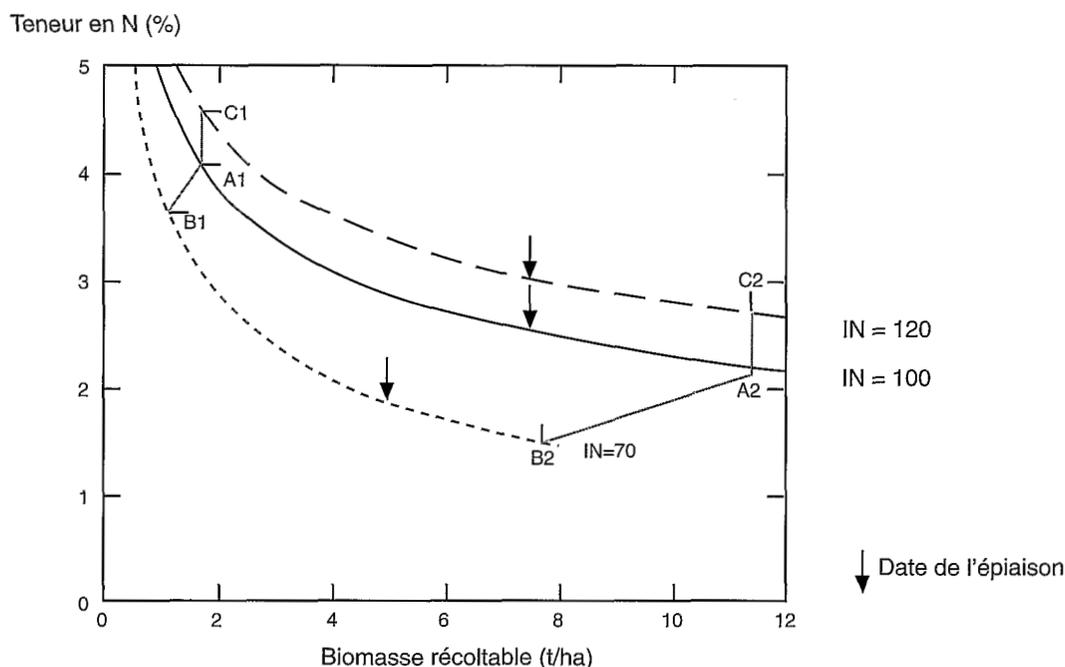


Fig. 2. Principes d'élaboration des indices de nutrition minérale sur la base de l'évolution de la teneur en azote de la biomasse en fonction de l'accumulation de biomasse et de la date de récolte. Pour 3 situations culturales A, B, C (3 doses d'apport, ou 3 parcelles différentes, ou encore une même parcelle 3 années différentes) sont illustrées les valeurs obtenues pour des prélèvements effectués à une même date, précoce (points A1, B1, C1), ou tardive (points A2, B2, C2). La comparaison de la teneur d'une végétation de biomasse aérienne donnée à une courbe de référence établie pour la région considérée permet de calculer l'indice de nutrition. Pour les Pyrénées, le niveau de nutrition (IN) est estimé à partir de la formule : $IN = \%N / (4,8 \text{ MS})^{-0,32} * 100$, où %N est la teneur en azote, et MS la biomasse en tonnes de matière sèche par ha. Pour P et K, la teneur optimale étant fonction à la fois de la biomasse aérienne et du niveau de nutrition azotée, on exprime la teneur optimale en P ou K en fonction de la teneur en azote. Pour les Pyrénées, on a obtenu : $IP = 100 * \%P / (0,15 + 0,065 * \%N)$; $IK = 100 * \%K / (1,6 + 0,525 * \%N)$. Un indice de 100 indique que la nutrition du couvert végétal n'est pas limitante en l'élément considéré. Des indices supérieurs à 100, tout particulièrement pour le potassium traduisent une consommation de luxe. Des indices de l'ordre de 50 traduisent des déficiences sévères en l'élément considéré.

Tableau 1. Valeurs des indices de nutrition minérale selon le type de prairie dans les Pyrénées Centrales (parcelles soumises aux pratiques de gestion courantes dans la région)

Indices de nutrition	Type de prairies		
	1-2	3	4
IN	80 à 100	65 à 80	50 à 65
IP	85 à 100	65 à 85	40 à 65
IK	85 à 100	65 à 85	40 à 65

Des modifications de pratiques peuvent entraîner des changements de type. L'observation des trajectoires d'un ensemble de parcelles à la suite de modifications de la fertilisation ou de l'utilisation des prairies a permis d'en caractériser la nature et la vitesse (Balent *et al.*, 1993). Par exemple, l'apport répété de phosphore minéral sur une prairie de type 4 permet d'augmenter rapidement le niveau de nutrition en P mais aussi en N, et induit à terme un changement de type (Duru et Calvière, 1996).

Dynamique de croissance et d'évolution de la digestibilité

Nous avons modélisé la production des prairies en référence aux bases de diagnostic présentés précédemment. Les variables d'entrée des modèles sont les types de prairies, les états nutritionnels de la végétation et les caractéristiques du climat. Les variables de sortie concernent la modélisation de la croissance et des composantes de la biomasse (feuille, tiges), ainsi que leur digestibilité et leur teneur en protéines⁴.

Modélisation de la croissance au printemps et des composantes de la biomasse

Le modèle statistique retenu le plus fréquemment pour modéliser la croissance aérienne met en relation la biomasse aérienne avec la quantité de rayonnement intercepté (Monteith, 1972 ; Gosse *et al.*, 1986). Pour l'utiliser, il est nécessaire de mesurer ou d'estimer l'interception du rayonnement. Mais dans le cas des prairies permanentes, les appareillages de mesure in situ tendent à sous estimer le rayonnement intercepté pour des indices foliaires faibles, car très souvent les feuilles sont plaquées au sol tant que les quantités d'herbe sont faibles. En outre, les mesures de surface foliaire sont difficiles à réaliser pour les graminées à limbes étroits et pour les dicotylédones à petites folioles. De ce fait, nous avons préféré un modèle de croissance en fonction de la température, déjà utilisé par certains auteurs pour la période de printemps, où température et rayonnement sont souvent liés (Lemaire, 1991 ; Menzi *et al.*, 1991).

Pour prendre en compte l'effet de la composition botanique des prairies, nous nous sommes appuyés sur les connaissances relatives aux populations. En situation de compétition intraspécifique, il a été montré que les espèces originaires d'habitat fertile (*Arrhenatherum elatius*, *Dactylis glomerata*, par exemple) ont une vitesse de croissance plus rapide que celles d'habitat pauvre (*Festuca rubra*, *Briza media*), que les disponibilités en éléments minéraux, azote en particulier, soient faibles ou élevées (Berendse *et al.*, 1992 ; van der Werf *et al.*, 1993). Ces résultats obtenus en monoculture expliquent pourquoi en conditions naturelles les communautés situées dans les habitats fertiles produisent plus. Les disponibilités en éléments minéraux sont élevées voire non limitantes ; les espèces qui les composent ont une vitesse de croissance intrinsèque plus élevée.

On peut distinguer trois phases au cours de la croissance de printemps (Duru *et al.*, 1994 ; Duru et Calvière, 1996) : (i) le rayonnement intercepté est limitant pour la croissance, du fait d'un indice foliaire insuffisant ; (ii) la croissance est d'allure linéaire, la quasi totalité du rayonnement incident étant interceptée ; et (iii) à partir du stade bouton floral des principales espèces, la production de nouvelles feuilles est fortement ralentie ou s'arrête, de sorte que la biomasse récoltable croît peu, voire diminue. Dans les conditions locales, cette phase commence environ 900 degrés-jours (dj) après le 1er Février.

Pour les prairies composées principalement de plantes d'habitat fertile (type 2), et pour les deux premières phases de la croissance, l'accumulation de biomasse (MS en g/m²) en fonction du cumul de températures (T, exprimé en dj en base 0) peut être représentée par le modèle $MS = a + b \cdot T$. Dans la mesure où l'effet de la température dépend du niveau de nutrition azotée, on peut aussi la représenter sous la forme $MS = a + T \cdot (c \cdot IN + d)$. Dans nos conditions de milieu, on a (Duru et Calvière, 1996) :

$$MS = -100 + T(0,018 IN - 0,4) \quad [1]$$

⁴ Ce travail aboutit en particulier à la production d'équations dont les paramètres sont été estimés de façon à rendre compte de la gamme des situations locales. Nous ne présenterons ici que quelques unes d'entre elles à titre d'illustration. Pour les autres nous renvoyons aux nombreuses publications de M. Duru sur la question.

Pour les prairies dont la composition botanique est dominée par des espèces d'habitat peu fertile et dont le niveau de nutrition en phosphore (IP) est limitant (type 4 par exemple), nous avons mis au point et testé le modèle $MS = a + T * (b * IN + c * IP + d * G + e)$, où $G = 1$ et 2 respectivement pour les communautés comprenant des espèces d'habitat pauvre et fertile, $IP = 1$ et 2 respectivement pour des états nutritionnels en P limitants et non limitants. On obtient alors :

$$MS = T * (-0,751 + 0,0132 IN + 0,12 IP + 0,22 G) - 74 \quad [2]$$

Ce modèle nous permet de dissocier les effets de la composition botanique et du niveau de nutrition minérale, qui sont en partie liés dans le cas de communautés végétales stables (Balent *et al.*, 1993). Il permet d'établir la hiérarchie des facteurs ayant un effet sur la production de biomasse récoltable. La diminution de biomasse récoltable consécutive à une diminution du niveau de nutrition azotée (IN passant de 100 à 70) est plus élevée que celle liée à un changement de composition botanique (G passant de 2 à 1) ou bien à une diminution du niveau de nutrition en phosphore (classe d'IP passant de 2 à 1).

Ces résultats nous permettent de modéliser l'évolution de la biomasse récoltable en fonction du climat pour les différents types de prairie, compte tenu des plages de nutrition azotée observées en situation d'équilibre. Ils mettent en évidence des différences importantes dans la dynamique de production en fonction des types (Fig. 3). A partir du stade bouton floral des espèces dominantes (environ 900 dj), la biomasse récoltable augmente peu ou stagne jusqu'à 1000 à 1200 dj. Elle diminue ensuite pour les communautés de type 2, et ce d'autant plus vite que le niveau de nutrition en azote est élevé. A l'inverse, pour les prairies de type 4, l'accumulation de biomasse se fait au même rythme que durant la phase précédente, jusque vers 1200 à 1400 dj. De ce fait, les différences de biomasse entre types de prairie se réduisent au cours de cette période. Au delà de cette durée, on ne sait pas modéliser l'accumulation de biomasse qui dépend alors beaucoup de la sénescence.

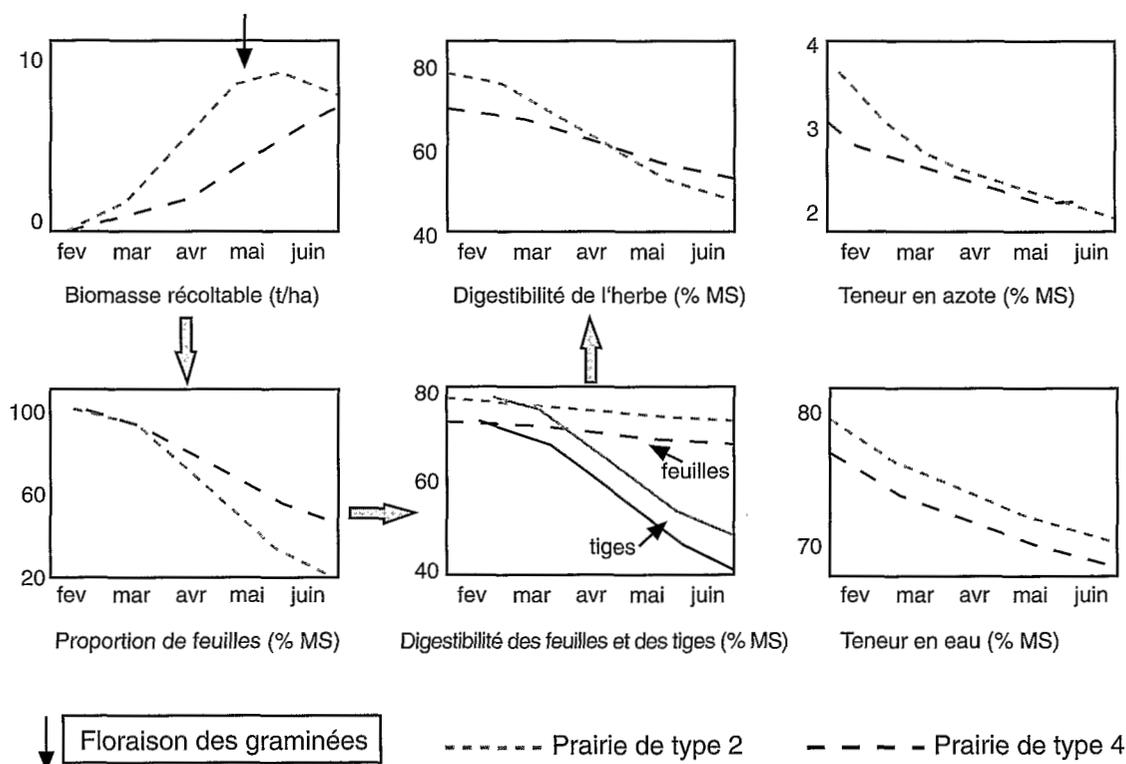


Fig. 3. Dynamique des principales composantes de la production des prairies en fonction de leur type. Cas des prairies de type 2 et 4. Valeurs observées à 1000 m d'altitude.

Digestibilité et teneur en protéines de la biomasse récoltable

Leur modélisation est faite en référence aux composants anatomiques de la végétation (feuilles et tiges en particulier) et aux types d'espèces prairiales, dont le rôle sur la valeur nutritive de l'herbe

est bien connu (Hacker et Minson, 1981 ; Poorter and Bergkotte, 1992 ; van Arendonk et Poorter, 1994).

Dans tous les types de prairie, la proportion de feuilles dans la biomasse aérienne décroît en fonction du temps (Fig. 3). La diminution est généralement plus importante en début qu'en fin de repousse. Mais la proportion moyenne de feuilles varie en fonction du type de prairie, les prairies de type 4 présentant des valeurs plus élevées que celles de type 2. Les différences entre ces deux types de communautés sont observées dès 500 dj, et elles se maintiennent tout au long de la repousse. Au stade floraison des espèces dominantes (1400 dj), l'écart est d'environ 50% entre les deux types de prairies (0.42% et 0.29% pour les prairies de type 4 et de type 2 respectivement).

La digestibilité a été estimée par spectroscopie dans le proche infra-rouge (Biston et Dardenne, 1985), sur des échantillons prélevés sur une période allant de 5 semaines avant la floraison des graminées à 3 semaines après (Duru, 1997). Nos résultats sont conformes à la littérature (Fig. 3). La digestibilité des feuilles vertes diminue peu au cours de la pousse, contrairement à celle des feuilles sénescentes et des tiges. La digestibilité des feuilles (et tiges) des dicotylédones est toujours supérieure à celle des graminées (7 points en moyenne). De même, les feuilles et tiges de graminées ou de dicotylédones des communautés d'habitat fertile ont une digestibilité supérieure d'environ 4,5 points en moyenne à celles d'habitat peu fertile (7 points au stade végétatif). La fétuque rouge par exemple, qui fait partie de ce dernier groupe d'espèces, se singularise par une digestibilité inférieure d'environ 10 points à celle des graminées courantes de milieu fertile. Les valeurs de digestibilité sont relativement stables entre traitements et entre années pour un même type de communauté.

En conséquence, la digestibilité d'une prairie de type 2, d'abord supérieure à celle d'une prairie de type 4, baisse plus rapidement par la suite (Duru, 1994 ; Fig. 3). En effet, une communauté de type 2 contient au stade feuillu des espèces en moyenne plus digestibles que celle d'une prairie de type 4. Mais par la suite sa digestibilité diminue rapidement du fait d'une baisse plus rapide du pourcentage de feuilles et d'une augmentation plus rapide de la quantité de matériel sénescent.

A partir de cette analyse des principales composantes en jeu dans l'évolution de la digestibilité de l'herbe (D), nous avons élaboré un modèle prenant en compte la digestibilité au stade feuillu (Df), qui est fonction de la composition botanique⁵, le temps de pousse (Tp) et l'accumulation de biomasse (MS) qui influe sur la vitesse de diminution en fonction du temps de pousse ($D = Df - a*Tp - b*MS$).

L'équation ci-dessous est en cours de validation :

$$D = Df - 0,0048*T - 0,0289*MS \quad (n = 25, r^2 = 0,998)$$

La teneur en protéines quant à elle diminue au cours de la pousse, rapidement au départ, puis elle tend à se stabiliser à une valeur plancher (Fig. 3), en relation avec la réduction du rapport surface éclairée / biomasse aérienne (Lemaire et Gastal, 1997). En début de pousse elle est plus élevée pour les prairies de type 2, du fait des plus grandes disponibilités en azote. Progressivement, les écarts de teneur entre types de prairie diminuent. Ils sont faibles à partir du stade bouton floral des principales espèces. La diminution plus forte de la teneur en azote dans une prairie de type 2 résulte d'une augmentation plus rapide du poids de tiges, compartiment de la plante à faible teneur en azote. Pour une prairie de type 4, la dilution de l'azote est plus lente du fait d'une faible croissance des tiges. Le modèle suivant est en cours de calibration :

$$\%N = Nf - a*T - b*MS$$

où Nf est la teneur au stade feuillu, sachant que $Nf = f(N \text{ apporté})$.

Teneur en eau de la biomasse récoltable et aptitude au séchage

La teneur en eau de la biomasse récoltable est importante à identifier dans le cas des prés de fauche. Cette caractéristique, jointe à la quantité d'herbe à sécher, détermine en effet le "besoin en

⁵ Pour une composition équilibrée entre graminées et dicotylédones, on peut retenir les valeurs suivantes : 80 (prairie de type 2), 73 (prairie de type 4).

séchage" pour les récoltes en sec (Duru et Colombani, 1992). De même que la digestibilité et la teneur en protéines, la teneur en eau de la végétation diminue au cours de la pousse (Fig. 3). A une date donnée, elle est toutefois d'autant plus élevée que le niveau de nutrition minérale est proche d'une valeur non limitante. Les effets combinés de la biomasse à sécher et de la teneur en eau sur les possibilités de récolte en sec sont indiqués dans le Tableau 2. Pour d'autres modalités de récolte, comme l'enrubannage, le besoin en séchage est réduit puisqu'il ne s'agit plus d'atteindre un taux de 80% de matière sèche avant récolte, mais d'environ 45% (Corrot et Pfimlin, 1994). Les besoins en séchage peuvent alors être estimés à environ la moitié des précédents.

Tableau 2. Estimation des besoins en séchage (déficit de saturation de l'air en g/m^3) pour atteindre une teneur en matière sèche de 80% selon la quantité de biomasse à sécher, sa teneur en matière sèche et la phénologie (cas d'un séchage au sol avec retournements fréquents)

Teneur en matière sèche (%)	Avant la floraison du dactyle biomasse (t/ha)				Après la floraison du dactyle biomasse (t/ha)			
	3	4,5	6	7,5	3	4,5	6	7,5
15	220	260						
20	180	220	260	300		220	230	
25	120	160	200	240		160	170	
30		130	150	160	120	130	140	150
35					105	110	130	130

La comparaison des besoins en séchage d'un type de prairie donné et les conditions météorologiques aux périodes considérées ("l'offre en séchage", Tableau 3) permet de déterminer si un objectif de date de récolte peut être atteint, et avec quel risque. L'utilisation des modèles de production permet de prévoir parallèlement les conséquences de son report à une date ultérieure. Par exemple, une prairie de type 2 qui nécessite un temps de séchage au sol long (déficit de saturation de l'air $>300 \text{ g/m}^3$) a environ une chance sur trois d'être récoltée dans de bonnes conditions entre les troisièmes décades de juin et de juillet à 1250 m d'altitude. Toutefois une fauche tardive entraînera non seulement un retard pour la période de croissance de la pousse suivante, mais aussi une forte baisse de la qualité du produit récolté. Ce type de prairie, productif mais coûteux en intrants, du fait du niveau élevé de fertilisation qu'il exige, n'est donc pas adapté à un mode de récolte traditionnel en sec. Le besoin en séchage est élevé au moment où le déficit de saturation de l'air est faible et aléatoire.

Tableau 3. Exemple de calcul du nombre d'opportunités de récolte, à partir de 2 hypothèses de besoin en déficit de saturation de l'air (DSA), en fonction des caractéristiques de la prairie et des caractéristiques climatiques décennales[†] (moyenne sur 10 ans ; Pyrénées, 1250 m)

Périodes (décades)	Déficit de saturation de l'air par décade (g/m^3)	
	DSA > 200	DSA > 300
Juin 1 au 10	2,4	1,7
Juin 10 au 20	2,0	1,5
Juin 20 au 30	4,7	3,3
Juillet 1 au 10	4,9	4,1
Juillet 10 au 20	4,1	3,1
Juillet 20 au 31	4,5	3,7

[†]Une valeur de 2 signifie qu'il y a 2 chances sur 10 de pouvoir disposer d'au moins 200 g/m^3 la deuxième décade de juin.

Conséquences pour l'aide à la gestion de la fertilisation et des récoltes au niveau de la parcelle

L'ensemble des éléments que nous venons de présenter permet de caractériser la production (biomasse et valeur nutritive) et l'évolution de la composition botanique d'une prairie quelconque de la zone des Pyrénées Centrales, en fonction des modes d'exploitation et de la fertilisation que l'on envisage de lui appliquer. Il est ainsi possible de proposer aux éleveurs et conseillers de terrain des recommandations pour mieux gérer les parcelles en fonction d'objectifs agricoles et environnementaux, qu'il s'agisse d'assurer la durabilité d'un équilibre entre pratiques et production, ou encore de mettre en œuvre des objectifs d'intensification ou d'extensification. Nous rappelons ci-dessous les grandes lignes des propositions que nous avons élaborées (Balent *et al.*, 1997).

Raisonnement conjointement la fertilisation et le mode d'exploitation en fonction d'objectifs agricoles et environnementaux

Un premier type de diagnostic consiste à évaluer conjointement l'état de la communauté végétale (diagnostic floristique) et l'état nutritionnel de la prairie (indices de nutrition) en vue de déterminer si les pratiques permettent de maintenir le type de prairie en l'état, de vérifier la cohérence de projets de changements de pratique, ou encore de fournir des bases pour passer d'un type à un autre, par extensification ou intensification. Les indicateurs de nutrition minérale, comparés à des valeurs de référence (Tableau 1), permettent de proposer une conduite de fertilisation adaptée aux objectifs.

Le maintien de la prairie en l'état vise à conserver sur le long terme des caractéristiques qui satisfont aux objectifs agricoles et environnementaux qui lui sont assignés. Le régime de récolte (modalités de pâturage et de fauche) étant donné, les références proposées permettent d'adapter la fertilisation, c'est à dire évaluer son opportunité et déterminer les quantités à apporter.

S'il s'agit d'intensifier la prairie, il faut tenir compte du fait que la végétation répond en deux temps à une modification de nutrition minérale. A très court terme (1 à 2 ans), les espèces en place ont une croissance plus rapide du fait d'une augmentation de la densité de talles (notamment des talles reproductrices) et de la taille des feuilles. Des changements dans la nature et l'abondance des espèces interviennent ensuite progressivement, conduisant à augmenter l'abondance des espèces les plus productives. L'augmentation de la fertilisation doit s'accompagner de récoltes plus fréquentes, et en particulier plus précoces en ce qui concerne la première pousse, sous peine d'une part de mal valoriser le potentiel de production (pertes par litière importantes, faible digestibilité), et d'autre part de favoriser le développement d'espèces indésirables.

Les recommandations pour extensifier une prairie consistent à ne pas diminuer trop rapidement l'intensité et ou la fréquence d'utilisation de façon à limiter les risques d'enfrichement.

Raisonnement la récolte en fonction des types de prairies et des équipements

Un deuxième type de diagnostic vise à aider au choix des modalités de fauche d'une prairie, en vue de tirer le meilleur parti possible de sa production. Il permet en particulier de raisonner en fonction du type de prairie.

La pratique de l'enrubannage, a connu un essor considérable dans les Pyrénées depuis quelques années. Comme dans d'autres régions françaises, les éleveurs l'ont adoptée rapidement, en raison de son coût relativement modeste et de sa souplesse d'utilisation (Corrot et Pfmilin, 1994). La pratique de l'enrubannage limite en effet considérablement les risques de récolter dans de mauvaises conditions. Nos travaux confirment son intérêt pour bien valoriser les efforts d'intensification des prairies de fauche. Elle autorise la récolte des prairies les plus productives des exploitations (types 1 et 2) avant que l'herbe sur pied ne rentre dans une phase de détérioration. La pratique d'un déprimage peut permettre pour ce type de prairie de récolter avec moins de risques du fait d'une quantité de biomasse à sécher plus faible. L'effet du déprimage n'a cependant pas encore été complètement modélisé.

Lorsque le seul mode de récolte possible est le fanage au sol, la composition botanique de la végétation, les niveaux de production moindres et la dynamique de la qualité de l'herbe particulière des prairies de type 3 et 4 permettent de récolter des fourrages de bonne qualité aux périodes où les possibilités de séchage sont plus favorables. Ces résultats sont concordants avec ceux obtenus dans

d'autres zones de montagne humide (Fleury *et al.*, 1988). Dans ce cas, la constitution d'une même quantité de stock nécessite de plus grandes surfaces et un temps de travail plus important. Ainsi, l'hétérogénéité des prairies de fauche d'une exploitation ne présente-t-elle pas que des inconvénients pour la gestion de la sole. Chaque type de prairie et chaque parcelle est à considérer dans la fonction jouée au niveau de l'exploitation, et il est important, dans une démarche de diagnostic et de conseil, de raisonner en référence à la gestion d'ensemble de la sole (Fleury *et al.*, 1995).

La construction d'un modèle de simulation pour l'aide à la gestion d'ensemble de la sole fauchée

Nous avons indiqué précédemment que notre recherche de références sur les prairies s'inscrit dans une démarche "descendante", de l'exploitation à la parcelle. Nous présentons dans cette partie la démarche de construction d'un modèle de simulation des récoltes, qui s'inscrit dans une démarche "remontante", de la parcelle vers l'exploitation. Construire un simulateur nous est apparu être un moyen efficace de mobiliser les références parcellaires pour l'aide à la gestion des prairies de fauche au niveau de l'exploitation. Diverses tentatives déjà anciennes l'ont montré, il est bien difficile de compter sur la seule capacité des experts pour raisonner des améliorations du système fourrager à partir de simples références parcellaires, même bien construites. Il est très difficile tant pour le chercheur que pour l'éleveur ou son conseiller d'imaginer les résultats de modifications de stratégies de constitution des stocks, à cause de la complexité des interactions en jeu. C'est pourquoi nous avons entrepris un travail de simulation des résultats de la gestion de la sole fauchée (Gibon *et al.*, 1989). La particularité de ce travail par rapport à des modèles plus anciens sur la récolte des fourrages est de prendre en compte la configuration spatiale du parcellaire, et le rôle des caractéristiques du climat, non seulement sur les possibilités de gestion des récoltes, mais aussi sur l'évolution de la quantité et de la qualité de l'herbe sur pied sur les parcelles. Les variations interannuelles du climat sont prises en compte. Les modèles de production des prairies constituent un élément de base très important de la conception du simulateur. Le développement de modèles de production des prairies en fonction de leur conduite permettant de couvrir l'intégralité de la gamme des prairies locales a été la condition sine qua non de la mise en œuvre de ce projet. La possibilité de simuler non seulement le déroulement des récoltes mais aussi l'évolution de la quantité et de la qualité de l'herbe sur pied en fonction du climat sur les diverses prairies de la sole constitue en effet un préalable indispensable à l'évaluation prévisionnelle de nouvelles stratégies de conduite des prairies et des récoltes. Mais celle-ci repose également sur un travail de modélisation de l'ensemble des pratiques de gestion de la sole fauchée.

Un logiciel de même type avait été développée pour instruire un autre problème de gestion face à l'aléa climatique, celui de l'organisation d'ensemble des labours d'automne en exploitation de grande culture (logiciel OTELO, Cerf *et al.*, 1994a). Il simule les effets de la mise en œuvre d'une stratégie sur une série d'années climatiques. La particularité du travail entrepris ici, en collaboration avec des collègues d'Intelligence Artificielle, est d'accorder une place importante à la modélisation des processus biologiques en fonction du climat.

Principes de construction du simulateur "ANSYL"

Notre objectif à terme est de mettre à disposition du couple éleveur-conseiller un outil qui permette, dans toute situation d'exploitation relevant du domaine de validité du modèle (les Pyrénées Centrales) d'effectuer une évaluation prévisionnelle de modification de stratégie. Le simulateur est construit de manière à permettre d'évaluer des changements de configuration de la sole fauchée, d'équipement de récolte (changements structurels) ou encore des modifications de pratiques compte tenu par exemple d'objectifs de niveau et qualité des stocks, de contrats de gestion de parcelle, etc. (changements organisationnels). Les entrées du simulateur correspondent aux caractéristiques de la sole fauchée et des moyens de récolte de l'exploitation considérée et à celles de la stratégie de gestion de l'agriculteur. A partir des données d'une série climatique locale, le simulateur effectue une simulation par campagne. Les sorties décrivent le calendrier de réalisation des récoltes et les stocks obtenus (quantité et qualité, par coupe et par parcelle, ainsi que pour l'ensemble de la sole) pour chaque année de la série.

Nous avons choisi de construire un "modèle-cadre", dénommé ANSYL, dans lequel la représentation d'une situation particulière est vue comme une "implémentation", c'est à dire

l'attribution de caractéristiques concrètes à un ensemble d'entités informatiques préexistantes. Nous avons pour ce faire retenu une méthode de programmation "orientée objet" (Rellier et Gibon, 1996). Bâtir un cadre général de représentation des moyens mis en œuvre (sole fourragère, équipements et main d'œuvre pour la constitution des réserves, etc.) ne pose pas de difficulté majeure. En revanche, l'élaboration d'un cadre général de représentation des stratégies des agriculteurs repose sur une hypothèse forte. Nous avons postulé, sur la base de nos observations antérieures⁶, que toutes les stratégies observables et envisageables relèvent d'un même modèle général de système de décision. La représentation de la diversité des pratiques et stratégies observées devient alors un simple problème d'implémentation d'objets. Dans d'autres recherches, il a été mis en évidence que les modèles de gestion des agriculteurs ont une structure voisine entre exploitations bien que leur contenu varie fortement d'une exploitation à l'autre (Aubry, 1994 ; Cerf *et al.*, 1994a).

Pour garantir la "portabilité" du simulateur nous nous sommes également imposés dès le début de sa conception de pouvoir rendre compte des conditions climatiques particulières à toute situation concrète d'exploitation dans le domaine de validité géographique retenu (Pyrénées Centrales). Nous avons choisi de nous appuyer sur les données courantes du réseau de stations météorologiques nationales, c'est à dire la pluviométrie et les températures journalières. Les processus et indicateurs faisant intervenir le climat ont donc été modélisés en référence à ces seuls paramètres. Il s'agit d'un choix souvent fait dans les travaux de simulation (cf. Châtelin *et al.*, 1994).

Démarche générale

La construction du simulateur s'appuie sur l'élaboration d'un schéma général de représentation de la gestion de la sole fauchée, qui sert de base à la représentation informatique. Il s'agit de représenter une stratégie, définie comme l'ensemble des moyens et des règles de décision dont l'agriculteur se dote pour atteindre des objectifs. Dans le cas présent, les objectifs concernent l'obtention de stocks fourragers en quantités données, et respectant certains critères de qualité, sur l'ensemble des parcelles vouées à la récolte, ainsi que, le plus souvent, la réalisation d'un pâturage au printemps, ou encore après une ou deux récoltes, sur une partie de ces parcelles. Les moyens sont constitués par les parcelles de la sole fauchée, les intrants utilisés pour leur fertilisation, les équipements et la main d'œuvre consacrés aux récoltes. Selon une approche désormais classique (Brossier *et al.*, 1990), l'ensemble est considéré comme un système piloté. En référence aux schémas théoriques relatifs à ces systèmes (Le Moigne, 1977), nous avons distingué trois sous-systèmes principaux : le système opérant, qui assure la transformation physique des flux d'entrée en sortie, le système de décision, qui guide le fonctionnement du premier en fonction d'objectifs, et le système d'information qui assure l'interface entre les deux précédents.

Pour pouvoir simuler les résultats de la mise en œuvre de stratégies, nous avons dû élaborer une représentation informatisable *intégrée et complète* de ces trois sous-systèmes. Pour la construire, nous avons utilisé les connaissances sur les pratiques des agriculteurs acquises dans des travaux antérieurs ou menés en parallèle.

Représentation du système opérant

La représentation retenue a pour premier objectif de rendre compte des caractéristiques des entités qui conditionnent les processus de transformation des flux d'entrée en sortie. Le second objectif est de pouvoir simuler les transformations d'état du système au cours de chaque campagne. La représentation de la sole fauchée s'appuie sur une identification de chaque parcelle. Chacune d'elle est caractérisée par sa superficie, ses contraintes vis à vis des opérations techniques (possibilité d'intervention avec tel ou tel matériel de récolte), le type de prairie qu'elle porte (tel que défini en première partie), sa position spatiale dans l'exploitation (appartenance à un bloc de

⁶ Un suivi d'une douzaine d'exploitations pyrénéennes sur plusieurs années avait permis d'observer les pratiques et d'étudier les stratégies des agriculteurs (Gibon, 1981 ; Gibon et Duru, 1987). Des observations complémentaires par enquête ont ensuite été effectuées dans le cadre de diverses opérations de recherche ou de recherche-développement sur environ 150 exploitations au total (Viviani Rossi, 1991 ; programme CAMAR auquel se rapporte ce numéro d'*Options Méditerranéennes*, etc.).

parcelles, distance du siège et des bâtiments de stockage). Les caractéristiques des équipements et de la main d'œuvre pour la réalisation des opérations de récolte sont représentées sous forme de spécifications des "chaînes de récolte" disponibles sur l'exploitation⁷.

C'est à ce niveau que sont utilisées les modèles de production des parcelles en référence au climat et aux pratiques⁸. Ces modèles permettent de simuler l'évolution des fourrages sur pied (quantité et qualité) en fonction des caractéristiques de la parcelle, des interventions techniques déjà effectuées au cours de la campagne (fertilisation, exploitations antérieures en pâturage ou fauche) et du climat, et ce pour tous les cycles.

Représentation du système de décision : Le modèle du pilotage

La représentation de la gestion de la sole que nous avons proposée se réfère en premier lieu au caractère adaptatif et séquentiel du processus de décision, formalisé par divers auteurs sous le terme de "modèle d'action" (Duru *et al.*, 1988 ; Sébillotte et Soler, 1988). Ce modèle ne suffisant pas à rendre compte de systèmes de décision à niveaux d'organisation multiples⁹, nous avons utilisé en complément des notions relatives à la gestion de systèmes complexes, développées en agronomie (organisation des opérations techniques à l'échelle d'une sole ; Gras *et al.*, 1989), et en recherche systémique fondamentale (théorie de la hiérarchie ; Allen et Starr, 1982). Le modèle ainsi élaboré représente les objectifs et les règles de décision de l'agriculteur en référence à trois principaux niveaux d'organisation dans l'espace et dans le temps (Fig. 4). C'est au niveau supérieur que le schéma décisionnel fait intervenir une procédure d'articulation entre les dimensions spatiales et temporelles des décisions au cours du déroulement de la campagne pour assurer la cohérence d'ensemble du pilotage. Cette procédure est représentée dans le simulateur sous forme d'un ensemble de "repères réactifs". Nous en rendons compte dans les paragraphes suivants.

Représentation du système d'information et la simulation de la gestion sur la campagne

Le processus de pilotage dans le temps

Le simulateur constitue un automate, comme d'autres modèles du même type. La simulation repose sur la gestion, tout au long de la saison, d'un agenda d'opérations à réaliser sur les prairies et sur la réaction des différents éléments du système de décision à des événements externes (événements climatiques, indisponibilité de la main d'œuvre, etc.) ou internes (comme l'atteinte d'un état particulier d'une prairie). Pour modéliser ces réactions nous avons défini la notion de *repère*

⁷ Chaque chaîne est caractérisée par le type d'opérations qu'elle permet d'effectuer (ensilage, récolte en sec, en balles rondes ou en vrac, etc.) et par des attributs relatifs aux conditions et résultats de son utilisation (nombre de jours sans pluie nécessaires à la menée à bien de l'opération de récolte, capacité journalière en hectares, etc.). Les processus de transformation des fourrages au cours de la récolte sont modélisés sous forme d'un jeu de normes en fonction des chaînes utilisées et des conditions climatiques de la récolte. Pour le détail de ces modèles et de ces normes, le lecteur se reportera à l'article de Gibon *et al.* (1989).

⁸ En raison du caractère récent de certains des modèles de production présentés en première partie, et de leur incomplétude en matière de valeur nutritive des fourrages, les modèles actuellement utilisés dans ANSYL sont pour partie des modèles mis au point antérieurement (Duru, 1987 ; Duru et Gibon, 1988). Un des développements prochains de ce projet sera d'actualiser ces modèles.

⁹ Celui-ci comporte un ou plusieurs objectifs généraux qui définissent le terme vers lequel convergent les décisions de l'agriculteur et un programme prévisionnel portant sur l'horizon de temps concerné, comportant des états-objectifs intermédiaires, points de passage à l'occasion desquels l'agriculteur fait des bilans en vue de savoir où il en est de la réalisation de ses objectifs généraux. Un corps de règles définit la nature des décisions à prendre pour atteindre les objectifs fixés. Les règles servent à déclencher les actions pour s'adapter à la gamme de variation reconnue, et pour arbitrer entre plusieurs opérations si nécessaire.

réactif, qui traduit les notions d'états objectifs intermédiaires et de règles d'ajustement auxquelles se réfère le modèle d'action¹⁰.

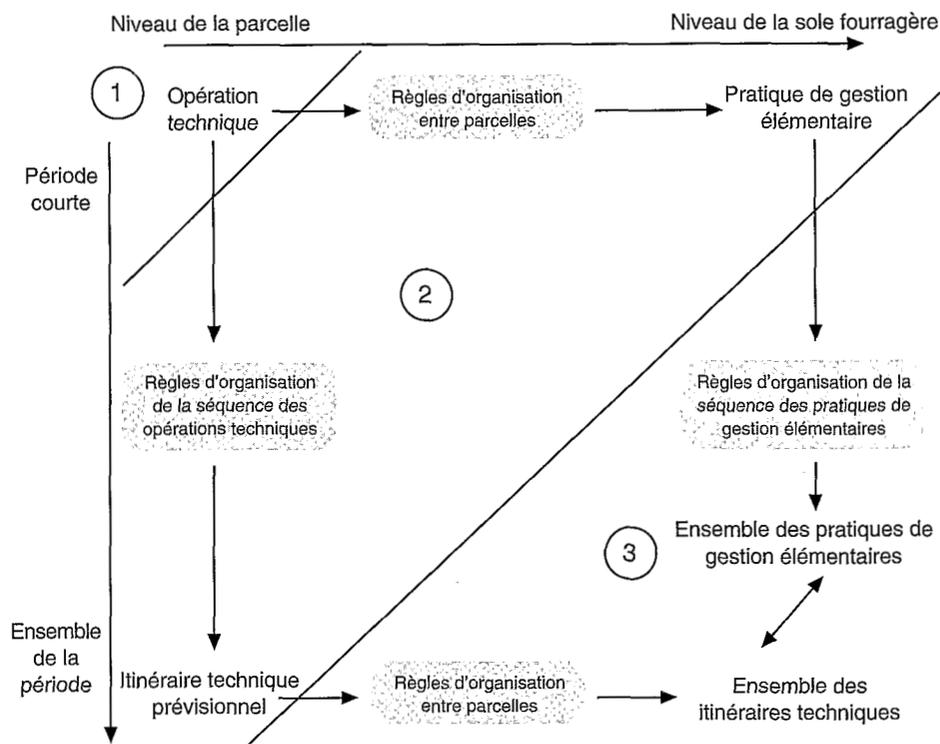


Fig. 4. Modèle de représentation de l'organisation spatio-temporelle de la stratégie de gestion de la sole fauchée (Gibon *et al.*, 1993). *Niveau 1* : l'opération technique s'inscrit dans l'espace (1 parcelle) et dans le temps court (une date donnée). Une opération de récolte par exemple est caractérisée par la "chaîne de récolte" qu'elle mobilise, les changements qu'elle entraîne sur la prairie et les bâtiments de stockage, et par un ensemble de conditions de mise en oeuvre : état de l'herbe sur pied, risque de mouiller le foin coupé, etc. *Niveau 2* : à ce niveau nous situons les règles d'organisation par unité de spatiale d'une part (parcelle) et par unité temporelle d'autre part (période de la campagne). L'ensemble des règles attachées au même type d'opération sur toutes les parcelles concernées constitue une *pratique de gestion élémentaire* ; ces règles organisent dans l'espace des parcelles les priorités entre les actions de même nature, qui mobilisent la même chaîne à la même période (pratique de gestion de l'ensilage de première coupe, etc.). Dans la dimension temporelle, l'agriculteur prévoit pour chaque parcelle, même de façon imprécise quant aux dates et modalités, la séquence d'opérations sur la campagne qui lui paraît logique et possible. Il s'agit de l'itinéraire technique prévisionnel, déterminé en fonction de ses connaissances sur les caractéristiques de la parcelle, sur les modalités de pousse de l'herbe en fonction du climat et sur les variations de la production sous l'incidence des dates de récolte. *Niveau 3* : (i) au niveau de l'ensemble de la sole, les décisions sont structurées en un corps d'itinéraires techniques prévisionnels déterminé en vue de permettre l'atteinte des objectifs globaux de stock ; des fonctions sont ainsi assignées à chaque parcelle (parcelles où l'agriculteur fera trois coupes, parcelles où il n'en fera qu'une, etc.) ; et (ii) au niveau de l'ensemble de la campagne, les décisions relatives au corps des pratiques de gestion élémentaires, définissent les règles d'arbitrage entre elles, quant à leur recouvrement, leur enchaînement, etc.

¹⁰ Un repère réactif est défini comme un couple constitué, d'une part, d'un changement prévisible de l'état du système biotechnique, ou d'un événement prévisible dans l'environnement du système, ou simplement d'une date particulière, et d'autre part d'une modification conséquente prédéfinie dans l'application des règles de décision (Gibon et Rellier, in Girard *et al.*, 1996 ; Rellier et Gibon, 1996).

Chaque itinéraire technique prévisionnel est assorti d'une séquence de repères réactifs, qui contient les règles de modifications de l'enchaînement des opérations sur la parcelle dans des situations prévisibles (par exemple "si la saison est mauvaise, je ne ferai pas deux coupes sur cette parcelle"). De même, chaque pratique de gestion élémentaire est assortie de repères réactifs, qui contiennent les règles de modification des conditions de déclenchement ou des critères de priorité pour le type d'opérations concerné (par exemple "si je n'ai pas récolté la moitié de la sole à la St Jean, j'augmenterai la superficie fauchée par jour"). Au niveau supérieur du schéma décisionnel, d'autres repères réactifs permettent d'ajuster le corps d'itinéraires techniques et celui des pratiques de gestion à l'état global du système (par exemple l'intégration de parcelles tampon, si le stock effectivement obtenu à une date donnée est plus faible que prévu). C'est l'articulation entre les différents repères réactifs qui assure la cohérence d'ensemble des décisions aux différents niveaux d'organisation spatio-temporelle.

La simulation des indicateurs utilisés par l'éleveur

Les indicateurs qu'utilise l'éleveur sont généralement très éloignés de ceux que l'on peut élaborer sur la base de nos connaissances (paramètres des modèles des processus biotechniques ; enregistrements météorologiques courants). Nous distinguons trois sortes d'indicateurs :

(i) Les *indicateurs non-modélisables*, c'est à dire ne possédant pas de paramètre équivalent calculable. Dans ce cas le système d'information ne peut pas être complètement modélisé. La réalisation d'un simulateur tel qu'ANSYL se fonde sur l'hypothèse qu'il n'y existe pas d'indicateur de ce type ayant un rôle majeur sur le fonctionnement du système considéré.

(ii) Les *indicateurs modélisables avec les connaissances disponibles* : le système d'information simulé est alors homologue au réel (exemple : le fait qu'une parcelle soit ou non récoltée à une date donnée ; la quantité de fourrage récoltée à un instant t).

(iii) Les *indicateurs non modélisables, mais possédant un équivalent calculable*. Dans ce cas, la façon dont un éleveur utilise un indicateur pour décider doit être traduite en règle de décision se référant à des paramètres d'un modèle agronomique. Par exemple, les expressions "herbe trop mûre", "pas assez mûre", qu'utilisent souvent les éleveurs pour rendre compte de l'état de la végétation sur pied en référence à sa qualité fourragère, sont traduites en plages de valeurs des paramètres de la qualité nutritive du fourrage.

La représentation de l'attitude de l'agriculteur face au risque climatique relève également de ce deuxième type. Elle est fortement conditionnée par notre décision de n'utiliser que les données météorologiques courantes (pluie et températures journalières) pour faciliter la "portabilité" de l'outil. Ainsi par exemple les niveaux de risque acceptés par l'agriculteur pour entreprendre la récolte sur une parcelle sont représentés par un seuil de probabilité d'obtenir les conditions climatiques nécessaires à la réalisation de cette récolte dans des conditions favorables (par exemple 3 jours consécutifs sans pluie). Cette probabilité est estimée par la fréquence de situations favorables dans la série climatique utilisée.

La construction d'un simulateur tel qu'ANSYL repose sur une hypothèse sous-jacente forte vis à vis des connaissances agronomiques. Elle postule tout d'abord que la représentation agronomique des processus gérés est suffisamment complète pour couvrir la diversité des situations du domaine (dans notre cas, dynamique de production des prairies dans toutes les conditions de milieu et à tout moment du cycle annuel). Elle considère également que l'on peut disposer de (ou encore construire) des modèles agronomiques prédictifs des processus importants dans le schéma de décision de l'éleveur. Elle suppose enfin que l'on peut élaborer sur leur base des modèles simplifiés adaptés aux contraintes de simulation, en particulier en ce qui concerne la simulation des changements d'état, de l'herbe dans notre cas, du sol dans d'autres cas (Cerf *et al.*, 1994a), en fonction du climat.

Intérêt pour l'aide à la gestion de la sole fauchée

Le simulateur ANSYL est actuellement au stade d'un prototype, développé avec le progiciel d'intelligence artificielle KAPPA-PC, contenant tous les concepts liés au système biotechnique (parcelles, prairies, mécanismes, etc.) et au système de décision, dans une base de connaissances

"orientée objets" (Rellier et Gibon, 1996). Le système d'information est simulé par des événements internes ("tour des champs", par exemple, au cours duquel l'éleveur met à jour sa connaissance de l'état de ses prairies).

La cohérence de l'outil est actuellement en cours de test en situation réelle sur une exploitation du Couserans (Ariège). La représentation des stratégies retenue se révèle bien adaptée au plan pratique pour identifier et modéliser les interactions entre les différents horizons spatio-temporels que l'éleveur prend en compte dans la gestion de sa sole fauchée. Le travail de construction du prototype nous a ainsi aidés à mettre au point une démarche d'identification d'une stratégie d'agriculteur opératoire sur le terrain. Le travail en cours montre que l'analyse au moyen du modèle proposé apporte une aide tant à l'éleveur lui-même (réflexion sur la cohérence d'ensemble de ses décisions), qu'aux conseillers de terrain associés à l'entreprise (rôle de formation à l'analyse d'une stratégie). Comme fréquemment souligné dans des démarches de ce type (Châtelin *et al.*, 1993 ; Attonaty et Soler, 1994), le premier acquis de cette recherche est de fournir une aide à la gestion par la seule analyse de la stratégie effectivement mise en œuvre.

L'implémentation informatique du cas étudié n'étant pas terminée, il est trop tôt pour connaître la qualité du fonctionnement du simulateur (capacité à reproduire fidèlement une stratégie existante et ses résultats). La phase de validation de l'outil, qui vient de débiter, constitue une étape essentielle de notre entreprise. Certaines des questions que soulève ce type de modèle (facilité de mise en œuvre dans une démarche de conseil, temps nécessaire à son utilisation, rôle réel pour l'appui individuel, etc.) ne pourront être abordées qu'à l'issue de cette phase. La construction du simulateur nous a en revanche permis d'approfondir notre réflexion sur la nature des références parcellaires à rechercher dans l'optique du conseil.

Discussion générale et conclusions

L'analyse des choix que nous avons effectués dans notre recherche, et la comparaison avec d'autres recherches menées sur des sujets similaires, permettent de dégager quelques enseignements importants sur les bases de constitution de ce que nous appellerons des "référentiels régionaux" pour l'aide à la gestion des prairies.

Un référentiel d'aide à la gestion des prairies de fauche peut être vu comme la combinaison : (i) de références sur les relations entre pratiques, production agronomique et dynamique de la végétation des prairies, en référence à des types de prairies couvrant la diversité des situations régionales rencontrées, et qui permettent de guider les choix de conduite au niveau de la parcelle ; (ii) d'outils de diagnostic parcellaire qui permettent de caractériser une prairie quelconque du domaine régional et en particulier de déterminer son type d'appartenance ; et (iii) d'outils de diagnostic et d'aide à l'adaptation de la stratégie au niveau de l'exploitation, qui permettent de réfléchir à l'organisation d'ensemble de la sole et au rôle attribué aux différentes parcelles de l'exploitation compte tenu du système de production, des moyens disponibles ou envisagés (main d'œuvre, équipement, finances) et des objectifs de l'éleveur.

Si cette définition semble adaptée à l'ensemble des travaux auxquels nous nous référons ici, elle laisse néanmoins la place au développement de modalités d'application très variées d'une équipe à l'autre. Le principe d'une démarche descendante de l'exploitation à la parcelle est souvent retenu pour la constitution de référentiels. Tous les travaux analysés sont conduits à des fins de diagnostic dans le cadre d'opérations de recherche-développement. Si les modalités concrètes en sont variables, tous s'appuient sur un dialogue étroit entre agriculteurs, conseillers et chercheurs.

Du fait de la grande diversité locale des prairies permanentes, tous les travaux de construction de référentiels s'organisent autour de l'élaboration de typologies de prairies (cf. par exemple Vertès, 1986 ; Fleury *et al.*, 1988 ; Bornard et Dubost, 1992 ; Plantureux *et al.*, 1992 ; Senn et Rawski, 1992 ; Leconte *et al.*, 1994). Elles visent d'une part à rendre compte de la diversité locale des relations entre caractéristiques des prairies, pratiques et production, et servent d'autre part de base à l'élaboration d'outils de caractérisation des prairies sur le terrain. Elles permettent de rendre compte de la diversité de leur "valeur d'utilisation agricole" (Fleury *et al.*, 1988), et aident à appréhender l'aptitude des différentes parcelles à remplir des fonctions au sein des exploitations (Jeannin *et al.*, 1991 ; Fleury *et al.*, 1995).

Cependant la construction de références et d'outils est abordée sur des bases différentes. Au delà de particularités éventuelles des prairies locales, ces différences nous semblent révéler des différences de démarches plus fondamentales, relatives aux hypothèses faites sur la hiérarchie des questions de nature agronomique d'une part, et à la perception du type d'outil acceptable pour le conseil d'autre part.

Quelques éléments de caractérisation de la diversité des démarches de construction de référentiels régionaux

Divers éléments de l'attitude des équipes de chercheurs et des priorités qu'elles ont établies nous semblent fondamentaux dans la détermination des choix de construction de référentiels.

L'attitude en regard de la production agronomique sur le cycle annuel et de la dynamique à long terme de la végétation

L'approche écologique des successions de végétation a constitué un des objectifs de départ de nos travaux. L'objectif de comprendre les fondements de la dynamique de la végétation dans les conditions locales nous a conduits à accorder la priorité à leur positionnement le long de gradients, et à accorder peu de place dans un premier temps aux typologies et à l'appartenance d'une prairie à tel ou tel type. D'autres équipes ont en revanche négligé cette dimension pour se concentrer sur le diagnostic de la production agronomique. Leur démarche les a conduits dans à construire des typologies régionales sur la base d'analyses phytosociologiques (Vertès, 1986), ou de relevés floristiques (Bornard et Dubost, 1992 ; Plantureux *et al.*, 1992 ; Senn et Rawski, 1992), ou encore en associant des indicateurs de physionomie des prairies à une approche floristique (Fleury *et al.*, 1988). Des observations agronomiques effectuées en ferme sur des prairies de chacun des types identifiés permettent alors de caractériser leur production et leur valeur d'utilisation agronomique en référence aux pratiques d'utilisation. Ce n'est que dans un deuxième temps que certaines de ces équipes ont abordé la dynamique à long terme de la végétation [cf. par exemple Miège et Fleury (1995) sur les prairies de fauche des Alpes du Nord ; Brau-Nogué (1996) sur les alpages de la même région]. Cette différence d'approche est sans doute à l'origine d'autres différences d'orientation dans les travaux. Elle explique pour partie les différences observées dans le choix des critères de caractérisation des types de prairies. Elle est sans doute aussi à l'origine de différences d'approche du contrôle de la dynamique de la végétation. Ainsi par exemple, certaines équipes ont mis l'accent sur les modalités techniques de rénovation des prairies (Leconte, 1991 ; Leconte et Jeannin, 1993), alors que nous avons pour notre part attaché une importance plus forte au contrôle de la composition botanique de la végétation par les pratiques.

La manière d'utiliser les connaissances agro-écologiques sur les prairies pour caractériser les relations entre milieu, pratiques et résultats

Ainsi, nous avons cherché à modéliser le fonctionnement des prairies pyrénéennes en référence la plus étroite possible aux processus agro-écologiques impliqués (éco-physiologie des couverts, dynamique de production en référence à la nutrition minérale, etc.) en fonction de l'état actuel des connaissances. D'autres ont utilisé ces mêmes connaissances dans une démarche plus proche de l'expertise, tant pour élaborer des types, que pour caractériser et rendre compte de leur comportement. C'est par exemple le cas pour les typologies des Alpes du Nord (Fleury *et al.*, 1988) et des Alpes du Sud (Senn et Rawski, 1992). Ces différences proviennent pour partie de la "culture" agronomique des équipes, et de différences dans la place accordée respectivement à l'observation et à l'expérimentation dans la construction de modèles de production (Plantureux *et al.*, 1992). Mais elles relèvent aussi du positionnement des chercheurs vis à vis de la capacité des modèles agronomiques à permettre une prévision fiable de la production qualitative et quantitative des prairies en fonction des pratiques. Cette question comporte elle-même plusieurs dimensions, en référence au choix des critères de modélisation des processus de production. Le premier point renvoie à des différences des conditions pédo-climatiques locales. La relative homogénéité des conditions de sol des prairies pyrénéennes nous a permis de négliger cette composante dans les référentiels proposés, alors que, par exemple dans la typologie des prairies de fauche des Alpes du Nord ou dans celle des prairies du Plateau Lorrain, une place importante est accordée dans l'élaboration des types aux différences de conditions de sol (Fleury *et al.*, 1988 ; Plantureux *et al.*, 1992). Le deuxième point concerne l'évaluation de la "valeur d'usage" des références. Nous avons par exemple choisi d'élaborer des

indices de nutrition minérale des couverts pour rendre compte des différences de productivité et de dynamique de production des prairies, alors que de nombreuses autres équipes se contentent de proposer des tables sur le niveau et la dynamique de production par type. Les critères d'appréciation de la valeur nutritive retenus par les différentes équipes en offrent une autre illustration. Après avoir dans un premier temps élaboré des tables de valeur nutritive des fourrages pyrénéens, nous nous sommes contentés, dans les dernières années de modéliser l'évolution de la digestibilité NIRS des prairies, sans référence directe à l'utilisation des fourrages par les animaux. D'autres équipes ont développé un effort important pour produire des références sur la valeur nutritive des fourrages et leur appétabilité au plus près de leur utilisation pour le rationnement (Roumet *et al.*, 1996). La troisième dimension est celle de la confiance accordée à la capacité de prédiction des modèles (niveau de production des prairies en fonction de la fertilisation, valeur nutritive du fourrage en fonction des conditions climatiques, etc.). Roumet *et al.* (1996) insistent par exemple sur l'impossibilité de prédire avec précision la production de matière sèche et de la valeur nutritive en raison de la forte variabilité annuelle des conditions climatiques. Nous avons essayé pour notre part de les modéliser au mieux. La diversité des réponses apportées à ce type de question renvoie en premier lieu à la gamme de variations des conditions locales, aux bases conceptuelles et aux dispositifs utilisés pour la construction des modèles. Elle découle également pour partie de l'importance accordée à la fourniture de références pour gérer face à l'aléa climatique.

L'importance accordée à la prise en compte de l'aléa climatique dans l'approche des contraintes de gestion des prairies

En amont de la construction de notre référentiel sur les prairies de fauche, nous avons développé de nombreuses recherches sur ce thème en raison de l'importance de l'aléa climatique dans les stratégies de gestion des éleveurs pyrénéens (Gibon, 1981 ; Duru et Charpentreau, 1983 ; Gibon et Duru, 1986). Nous avons de ce fait "naturellement" été très attentifs à bâtir des modèles en référence explicite au climat et à ses variations inter-annuelles, tant pour représenter les processus de production agronomique que pour l'aide à la gestion de la sole fauchée. Une démarche similaire a été esquissée dans les Alpes du Sud (Bellon *et al.*, 1995). D'autres équipes, qui n'ont pas accordé une priorité initiale forte à la prise en compte du risque climatique pour l'élaboration de références parcellaires, se sont pour certaines penchées sur la question dans un deuxième temps (cf. par exemple Roumet *et al.*, 1996). Mais rappelons que les avis restent divergents aujourd'hui sur la possibilité de modéliser de manière pertinente l'évolution de la qualité des fourrages en fonction des conditions climatiques.

La perception de la façon dont on peut (et dont on doit) répondre aux besoins en matière de conseil

Dans la plupart des équipes, priorité a été donnée à la construction d'outils de diagnostic simples et d'utilisation facile sur le terrain, dans une recherche dont la portée se voulait avant tout régionale. Nous avons eu pour notre part l'ambition de chercher à mettre au point dans un premier temps des modèles à domaine de validité plus large, pour dans un second temps proposer des outils simplifiés, au moyen d'un paramétrage des modèles en référence aux conditions locales. Cette attitude joue sur l'importance respective accordée aux tables, grilles et modèles paramètres dans les outils de diagnostic proposés selon les équipes. Elle joue aussi sur le choix de "gommer" ou non l'effet de certaines composantes de ces processus complexes. Ainsi, dans notre cas, le diagnostic des prairies s'appuie sur une caractérisation de la composition de la végétation à partir d'espèces prairiales courantes, alors que, dans la typologie des Alpes du Nord par exemple, une place importante est accordée aux espèces qui qualifient localement les conditions de milieu et d'histoire culturelle de la parcelle (Fleury *et al.*, 1988). Ces différences de choix se retrouvent ensuite au niveau de différences dans la nature des outils de diagnostic de la valeur d'utilisation des prairies proposés.

Vers un cadre de référence unique pour le choix d'une démarche de construction d'un référentiel local ?

L'analyse que nous venons de proposer montre que la création de référentiels pour le conseil demande aux chercheurs de faire des choix et d'établir des priorités dans de nombreux domaines. La composition des équipes, souvent interdisciplinaire, qui s'y consacrent nous semble tenir un rôle important à ce niveau. La dynamique qui s'instaure localement dans le partenariat entre agriculteurs,

conseillers et techniciens joue aussi selon nous un rôle important dans la détermination des approches et dans la succession des étapes. Il nous paraît important de souligner en conclusion de cet article la convergence qui s'instaure avec le temps entre les différentes démarches évoquées. Leur ressemblance s'accroît très nettement, pas tant au niveau des outils concrets proposés, mais au niveau des champs de questionnement pris en compte. En particulier la gestion des prairies est posée en référence : (i) aux stratégies de gestion de l'éleveur ; (ii) aux caractéristiques d'ensemble du parcellaire de l'exploitation ; et (iii) à des objectifs non plus strictement agricoles mais agri-environnementaux [cf. par exemple, pour ce dernier point, Havet *et al.* (1996), Balent *et al.* (1998), Laffineur (1998)]. Cette évolution s'est révélée nécessaire pour mieux répondre aux besoins actuels des agriculteurs compte tenu de l'évolution générale des conditions d'exercice de leur activité.

Les différentes recherches évoquées, et le cheminement de chaque équipe offrent désormais un ensemble important d'illustrations des enjeux, embûches à éviter et précautions à prendre pour la construction de références sur les prairies dans la double optique d'aider à la maîtrise du fonctionnement des exploitations et à celle de la gestion de l'espace et de l'entretien des paysages. Une analyse commune poussée des savoir-faire acquis dans ces diverses expériences serait sans doute une étape très utile pour l'avenir. Elle contribuerait en particulier à éclairer la question de l'orientation des recherches techniques en milieu méditerranéen, où l'hétérogénéité des terrains, la prévalence du risque climatique et la dégradation récente des relations agriculture espace ne peuvent être ignorées dans une optique de conseil.

Références

- Allen, T.F.H. et Starr, T.B. (1982). *Hierarchy : Perspectives for Ecological Complexity*. The University of Chicago Press, Chicago.
- Attonaty, J.M. et Soler, L.G. (1994). Renewing strategic decision-making aids. Dans : *Systems Studies in Agriculture and Rural Development*, Brossier, J., Bonneval, L. de, et Landais, E. (éds). INRA Publications, Paris, pp. 291-308.
- Aubry, C. (1994). De la parcelle cultivée à la sole d'une culture : Des échelles complémentaires de conception des références techniques. Dans : *Recherches Système en Agriculture et Développement Local*, Symposium International, Montpellier (France), 21-25 nov. 1994. CIRAD, Montpellier, pp. 519-525.
- Balent, G. (1986). Modélisation de l'évolution des surfaces pastorales dans les Pyrénées Centrales. Mise au point d'un référentiel micro-régional de diagnostic au niveau de la parcelle. *Cahiers de la Recherche-Développement*, 9/10 : 92-99.
- Balent, G. (1991). Construction of a reference frame for studying changes in species composition in pastures : The example of an old-field succession. *Options Méditerranéennes, Série A Séminaires*, 15 : 73-81.
- Balent, G. (1996). Dynamique de la végétation des prairies permanentes dans les Pyrénées Centrales. 1. La dimension temporelle dans la prise en compte de l'effet pratiques de gestion. Dans : *Analyse et modélisation du fonctionnement des exploitations agricoles. Implications pour la gestion de l'espace rural en régions méditerranéennes en retard de développement*, Hubert, B. et Leclerc, B. (éds). IAMZ, INRA, Projet CAMAR CT90-0002, Rapport Final, Vol. II, pp. 325-336.
- Balent, G., Alard, D., Blanfort, V. et Gibon, A. (1998). Activités de pâturage, paysages et biodiversité. *Annales de Zootechnie*, 47 : 419-429.
- Balent, G. et Duru, M. (1984). Influence des modes d'exploitation sur les caractéristiques et l'évolution des surfaces pastorales : Cas des Pyrénées Centrales. *Agronomie*, 4(2) : 113-124.
- Balent, G., Duru, M., Gibon, A., Magda, D. et Theau, J.P. (1997). *Les prairies permanentes de milieu océanique et de montagne humide : Outils de diagnostic agro-écologique et guide pour leur utilisation*, Gibon, A. (éd.). INRA Toulouse-Chambre Régionale d'Agriculture Midi-Pyrénées, Toulouse.

- Balent, G., Duru, M. et Magda, D. (1993). Pratiques de gestion et dynamique de la végétation des prairies permanentes. Une méthode pour le diagnostic agroécologique, une application aux prairies de l'Aubrac et de la vallée de l'Aveyron. *Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement*, 27 : 283-302.
- Bellon, S., Châtelin, M.H., Guérin, G., Havet, A. et Moreau, J.C. (1995). Analyse de la conduite du pâturage de printemps. *Fourrages*, 141 : 33-55.
- Benoît, M. (1994). Environmental issues : Use of farming systems research/extension to resolve environmental and spatial problems. Dans : *Rural and Farming Systems Analysis*, Dent, J.B. et McGregor, M.J. (éds). CAB International, Wallingford, pp. 167-177.
- Berendse, F., Elberse, W.T. et Geerts, R.H. (1992). Competition and nitrogen loss from plants in grassland ecosystems. *Ecology*, 73(1) : 46-53.
- Biston, R. et Dardenne, P. (1985). Application de la spectrométrie de réflexion dans le proche infrarouge. Prédiction de la qualité des fourrages en vue de leur exploitation rationnelle. *Bull. Rech. Agron. Gembloux*, 20 : 23-41.
- Bornard, A. et Dubost, M. (1992). Diagnostic agro-écologique de la végétation des alpages laitiers des alpes du Nord humides : Etablissement et utilisation d'une typologie simplifiée. *Agronomie*, 12 : 581-599.
- Bossis, N. (1994). Attitudes et comportements des éleveurs du public de Fourrages-Mieux face à la diversité des prairies. *Fourrages*, 137 : 89-106.
- Brau-Nogué, C. (1996). *Dynamique des pelouses d'alpages laitiers dans les Alpes du Nord externes*. Thèse doctorale, Université Joseph Fourier.
- Brossier, J. (1995). Modélisation systémique, gestion et protection de l'environnement. Dans : *La Modélisation Systémique en Entreprise*, Braesch, C. et Haurat, H. (éds). Hermès, Paris, pp. 109-125.
- Brossier, J., Vissac, B. et Le Moigne, J.L. (éds) (1990). *Modélisation Systémique et Système Agraire*. INRA Publications, Paris.
- Cerf, M., Mousset, J., Angevin, F., Boizard, H. et Papy, F. (1994a). La modélisation des conditions d'intervention au champ en grande culture. Dans : *Recherches Système en Agriculture et Développement Local*. Symposium International, Montpellier (France), 21-25 nov. 1994. CIRAD, Montpellier, pp. 53-57.
- Cerf, M., Papy, F., Aubry, C. et Meynard, J.M. (1994b). Agronomic theory and decision tools. Dans : *Systems Studies in Agriculture and Rural Development*, Brossier, J., Bonneval, L. de et Landais, E. (éds). INRA Editions, Paris, pp. 346-356.
- Charpentreau, J.L. et Duru, M. (1983). Simulation of some strategies to reduce the effect of climatic variability on farming. The case of Pyrenees Mountains. *Agricultural Systems*, 11 : 105-125.
- Châtelin, M.H., Aubry, C., Leroy, P., Papy, P. et Poussin, P. (1993). Pilotage de la production et aide à la décision stratégique. Le cas des exploitations en grande culture. *Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales*, 28 : 119-138.
- Châtelin, M.H., Mousset, J., Papy, F. et Quievreux, D. (1994) Conception des démarches de conseil en agro-équipement basées sur la simulation de l'organisation du travail. Dans : *Recherches Système en Agriculture et Développement Local*. Symposium International, Montpellier (France), 21-25 nov. 1994. CIRAD, Montpellier, pp. 639-644.
- Corrot, G. et Pfimlin, A. (1994). L'enrubannage en France : Place dans les systèmes fourragers régionaux et perspectives de développement. *Fourrages*, 138 : 187-203.
- Duru, M. (1987). Croissance hivernale et printanière de prairies permanentes pâturées en montagne. II. Variations de la croissance et de la composition chimique. *Agronomie*, 7 : 51-59.

- Duru, M. (1994). Mineral nutrition status botanical composition of pastures. II - Effect on herbage nitrogen content and digestibility. *European Journal of Agronomy*, 3(2) : 125-133.
- Duru, M. (1997). Leaf and stem in vitro digestibility for grasses and dicotyledons of meadow plant communities in spring. *J. Sci. Food Agric.*, 74 : 175-185.
- Duru, M., Balent, G., Gibon, A., Magda, D., Theau, J.P., Cruz, P. et Jouany, C. (1998). Fonctionnement et dynamique des prairies permanentes. Exemple des Pyrénées Centrales. *Fourrages*, 153 : 97-113.
- Duru, M., Balent, G. et Langlet, A. (1994). Mineral nutrition status and botanical composition of pastures. I - Effect on herbage accumulation. *European Journal of Agronomy*, 3(1) : 43-51.
- Duru, M. et Calvière, I. (1996). Effet des niveaux de nutrition en phosphore et en azote et de la composition botanique de communautés prairiales sur l'accumulation de biomasse au printemps. *Agronomie*, 16 : 217-229.
- Duru, M. et Colombani, H. (1992). Haymaking : Risks and Uncertainties in Central Pyrenees Grasslands. *Agricultural Systems*, 38 : 185-207.
- Duru, M. et Gibon, A. (1988). Prévoir la valeur nutritive des foins et des regains dans les Pyrénées Centrales. I - Principaux facteurs de variation de la composition chimique. *Fourrages*, 114 : 143-165.
- Duru, M., Papy, F. et Soler, L.G. (1988). Le concept de modèle général et l'analyse du fonctionnement de l'exploitation agricole. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 74(4) : 81-93.
- Duru, M. et Théliier-Huché, L. (1997). N and P-K status of herbage : Use for diagnosis of grasslands. *Colloque de l'INRA*, 82 : 125-138.
- Fleury, P., Dubeuf, B. et Jeannin, B. (1995). Un concept pour le conseil en exploitation laitière : Le fonctionnement fourrager. *Fourrages*, 141 : 3-18.
- Fleury, P., Jeannin, B. et Dorioz, J.M. (1988). *Typologie des prairies de fauche de montagne des alpes du Nord humides*. (2ème éd.). GIS Alpes du Nord, Chambéry.
- Fleury, P., Jeannin, B. et Dorioz, J.M. (1994). Des résultats pour les Alpes du Nord : la typologie des prairies de fauche de montagne. Caractérisation des prairies permanentes en montagne. Les alpages à vache laitière. *FAO, Série Technique REUR 30*, pp. 25-32.
- Gibon, A. (1981). *Pratiques d'éleveurs et résultats d'élevages dans les Pyrénées Centrales*. Thèse Docteur-Ingénieur, INA Paris-Grignon.
- Gibon, A. et Duru, M. (1987). Fonctionnement des systèmes d'élevage pyrénéens et sensibilité au climat. Agrométéorologie des régions de moyenne montagne. *Colloque INRA*, 39 : 304-316.
- Gibon, A. et Flamant, J.C. (1985). *Intérêt d'approches interdisciplinaires pour le développement de l'élevage en milieu difficile : Un exemple d'action de recherche-développement dans les Pyrénées Centrales*. 10è Journées Recherche Ovine et Caprine, ITOVIC-SPEOC Ed., Paris, pp. 538-553.
- Gibon, A., Lardon, S. et Rellier, J.P. (1989). The heterogeneity of grassland fields as a limiting factor in the organization of forage systems. Development of a simulation tool of harvests management in the Central Pyrénées. *Etudes et Recherches du SAD*, 16 : 105-117
- Girard, N., Havet, A., Châtelain, M.H., Gibon, A., Hubert, B. et Rellier, J.P. (1996). Formalisation des relations entre stratégie et pilotage dans les systèmes fourragers. Propositions pour la conception d'instruments d'aide à la décision. *Les Cahiers de la Recherche Développement*, 39 : 60-72.
- Gosse, G., Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R., Chartier, M., Allirand, J.M. et Lemaire, G. (1986). Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*, 6 : 47-56

- Gras, R., Benoît, M., Deffontaines, J.P., Duru, M., Lafarge, M., Langlet, A. et Osty, P.L. (1989). *Le Fait Technique en Agronomie. Activités Agricoles, Concepts et Méthodes d'Etude*. INRA - L'harmattan, Paris.
- Hacker, J.B. et Minson, D.J. (1981). The digestibility of plant parts. *Herb. Abstr.*, 51 : 459-482.
- Havet, A., Kerneis, E., Perichon, C. et Steyaert, P. (1996). Utilisation de parcelles en prairies naturelles : Pratiques des éleveurs et fréquentation par l'avifaune limicole dans un marais du Sud Vendée. *Rencontres Recherches Ruminants*, 3 : 33-35.
- Jeannin, B., Fleury, P. et Dorioz, J.M. (1991). Typologie régionale des prairies permanentes selon leurs aptitudes à remplir des fonctions. *Fourrages*, 128 : 377-422.
- Laffineur, B. (1998). Utilisation de la méthode de diagnostic de prairie dans une opération agri-environnementale. *Fourrages*, 153 : 51-57.
- Laissus, R. (1984). Comment faire le diagnostic des prairies permanentes à ressemer ? *Fourrages*, 98 : 127-135.
- Le Moigne, J.L. (1977). *La théorie du système général*. PUF, Paris.
- Leconte, D. (1991). Diagnostic et rénovation de prairie. *Fourrages*, 125 : 35-39.
- Leconte, D. et Jeannin, B. (1993). Diagnostic et rénovation des prairies en France. *BTI*, 11-12 : 99-121.
- Leconte, D., Le Gall, A., Pfimlin, A. et Straebler, M. (1994). *Améliorer les prairies : Diagnostic et décision*. GNIS, Paris.
- Lemaire, G. (1991). Productivité des peuplements prairiaux : Caractérisation et diagnostic. *Fourrages*, 127 : 259-272.
- Lemaire, G. et Gastal, F. (1997). N uptake and distribution in plant canopies. Dans : *Diagnosis of the N Nutrition Status in Crops*, Lemaire, G. (éd.). Springer Verlag, Berlin, pp. 3-44.
- Lemaire, G., Gastal, F. et Salette, J. (1989). Analysis of the effect of N nutrition on dry matter yield of a sward by reference to potential yield and optimum N content. Dans : *Proceedings of the XVI International Grassland Congress, Nice (France)*, 4-11 octobre, pp. 179-180.
- Menzi, H., Blum, H. et Nosberger, J. (1991). Relationship between climatic factors and the dry matter production of swards of different composition at two altitudes. *Grass and For. Sci.*, 46(3) : 223-230
- Miège, J. M. et Fleury, P. (1995). Dynamique et rénovation de la végétation des prairies de fauche des Alpes du Nord. *Fourrages*, 142 : 165-180.
- Monteith, J.L. (1972). Solar radiation and productivity in tropical ecosystem. *J. Appl. Ecol.*, 9 : 747-766.
- Plantureux, S., Bonischot, R. et Guckert, A. (1992). Utilisation d'une typologie des prairies permanentes du Plateau Lorrain pour le diagnostic agronomique. *Fourrages*, 132 : 381-394.
- Poorter, H. et Bergkotte, M. (1992). Chemical composition of 24 wild species differing in relative growth rate. *Plant Cell Environment*, 15 : 221-229.
- Rellier, J.P. et Gibon, A. (1996). *Description du Système ANSYL, Simulateur Orienté Objet d'une Campagne de Récolte de Fourrages*. INRA, Toulouse.
- Revilla, R. (1987). *Las zonas de montaña y su entorno económico. Analisis estructural y bases tecnicas para la planificación de la ganaderia en los altos valles de Sobrarbe (Pirineo Oscense)*. Thèse Doctorale, Facultad Veterinaria, Zaragoza.
- Roumet, J.P., Fleury, P. et Jeannin, B. (1996). Facteurs de variation et prévision de la production fourragère en zone de montagne. *Fourrages*, 145 : 77-90.

- Sébillotte, M. et Soler, L.G. (1988). Le concept de modèle général et la compréhension du fonctionnement de l'agriculteur. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 74(4) : 81-93.
- Senn, O. et Rawski, C. (1992). Remise en valeur de la prairie permanente fauchée dans les Alpes du Sud. Bilan 1987-1991. *Fourrages*, 132 : 395-409.
- van Arendonk, J.J.C.M. et Poorter, M. (1994). The chemical composition and anatomical structure of leaves of grass species differing in relative growth rate. *Plant, Cell and Environment*, 17 : 963-970.
- van der Werf, A., Visser, A.J., Schieving, F. et Lambers, H. (1993). Evidence for optimal partitioning of biomass and nitrogen at a range of nitrogen availabilities for a fast-growing and slow-growing species. *Functional Ecology*, 7 : 63-74.
- Vertès, F. (1986). Typologie floristique, écologie et agronomie des prairies et des alpages en moyenne Tarentaise. *Travaux Scientifiques du Parc National de la Vanoise*, XV : 201-227.
- Viviani Rossi, E. (1991). *L'enquête pour le diagnostic des systèmes fourragers. Elaboration d'une méthode sur le cas des exploitations du Haut-Couserans (Pyrénées Centrales)*. Thèse Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Viviani Rossi, E., Theau, J.P., Gibon, A. et Duru, M. (1992). Diagnostic de la constitution des stocks fourragers à partir d'une enquête. Proposition d'une méthode et application aux exploitations du Haut Couserans. *Fourrages*, 130 : 123-147.