

Les fourrages et la production de protéines

C. Huyghe

Les fourrages constituent une source importante de protéines pour les ruminants, source qu'il est utile de détailler et d'évaluer. Quelles sont les voies possibles pour accroître la production de protéines fourragères et pour en améliorer la qualité ? Ces perspectives sont-elles compatibles avec les engagements environnementaux pris à Kyoto ?

RESUME

Cultures fourragères et prairies assurent environ 85% des besoins en protéines des ruminants, proportion qui peut être accrue par le développement des légumineuses fourragères (luzerne et associations), par la sélection génétique et l'évolution des techniques de récolte. La solubilité des protéines foliaires est forte, variable entre espèces. La recherche d'une plus grande autonomie protéique doit se faire dans un contexte de faibles lessivages en nitrates. Le couplage des systèmes laitiers autonomes avec des systèmes céréaliers permet une amélioration sensible du bilan azoté des exploitations. Les pertes par lessivage augmentent avec le chargement, mais sont moindres sous association. Dans un cadre plus global, les légumineuses fourragères ou les associations constituent des voies idéales pour combiner l'autonomie protéique et une faible consommation en énergie fossile; de plus, les prairies permettent une forte immobilisation du carbone.

MOTS CLES

Analyse énergétique, association végétale, autonomie, bilan d'azote, culture fourragère, environnement, légumineuse, prairie, protéine, système de production, valeur azotée, variabilité génétique.

KEY-WORDS

Energy analysis, environment, forage crop, genetic variation, grassland, legume, nitrogen balance, nitrogen value, plant association, production system, protein, self-sufficiency.

AUTEUR

Unité de Génétique et d'Amélioration des Plantes Fourragères, INRA, F-86600 Lusignan ; huyghe@lusignan.inra.fr

Les deux crises de l'ESB de 1996 et 2000 ont pesé lourdement sur les élevages bovins français et européens. Elles ont conduit à des débats vifs sur la diversité des protéines utilisées pour la complémentation des rations animales et sur le manque de traçabilité de certaines d'entre elles. Le souci de sécurité alimentaire ainsi que la nécessité de rentabilité économique ont engendré de profondes réflexions des éleveurs et des filières sur la production d'oléoprotéagineux, le soutien économique à ces espèces et leur utilisation en alimentation animale. De semblables réflexions ont jalonné les dernières décennies de l'agriculture française et européenne.

Cependant, au cœur même de ces crises et des débats qui ont suivi, la fourniture des protéines à partir des fourrages a été fréquemment oubliée. Pourtant, les fourrages constituent bien la première source de protéines pour l'alimentation des ruminants, qu'ils soient laitiers ou de type viande, bovins, ovins ou caprins. De plus, si les protéines issues de graines de protéagineux et d'oléoprotéagineux peuvent être utilisées dans l'alimentation des monogastriques ou en alimentation humaine, les ruminants sont les seuls à pouvoir valoriser les quantités considérables de protéines fourragères, en même temps qu'ils utilisent l'énergie apportée par les sucres cellulaires mais surtout la cellulose et les hémicelluloses des parois végétales. Ainsi, même si les ruminants présentent une efficacité de valorisation des protéines alimentaires plus faibles que les monogastriques, ils valorisent un réservoir considérable, accessible par eux seuls.

Par unité de surface agricole, les fourrages et tout particulièrement les légumineuses fourragères sont de gros producteurs de protéines végétales. Chez ces espèces, les protéines et l'azote jouent un rôle métabolique essentiel et nous analyserons quelques aspects éco-physiologiques liés au métabolisme de l'azote chez les espèces fourragères. Cependant, ce rôle métabolique implique une forte solubilité des protéines qui, en l'absence de traitements technologiques, seront rapidement solubilisées puis dégradées dans le rumen des ruminants. Seules les protéines liées à la paroi bénéficient d'une certaine protection.

L'analyse de la production de protéines fourragères et des possibilités d'augmenter leur contribution à l'alimentation protéique des ruminants sera conduite en trois étapes dans cet article.

Tout d'abord, et dans le cadre actuel d'exercice de la production agricole, on analysera la part des protéines fourragères dans l'alimentation des ruminants et les voies pour, d'une part, augmenter la production de protéines par unité de surface et, d'autre part, améliorer leur qualité. Les possibilités offertes par la génétique, l'agronomie ou la technologie seront discutées.

Le cadre des contraintes s'exerçant sur les exploitations agricoles pourrait à l'occasion des prochaines réformes de la PAC devenir plus sévère, notamment en ce qui concerne les pertes et lessivages d'azote. Ceci a une relation directe avec la production et la valorisation des protéines. Il convient de discuter l'impact possible d'une évolution de ce cadre de contraintes.

A plus long terme, la place des protéines fourragères et leurs modes de production doivent être discutés à la lumière des engagements pris dans le cadre des accords de Kyoto, notamment pour les deux aspects que sont le recours aux énergies fossiles et l'immobilisation du carbone. Nous nous attacherons à montrer que les surfaces fourragères et en particulier les cultures pérennes peuvent constituer une réponse satisfaisante à ces enjeux majeurs, tout en permettant le maintien des performances zootechniques et économiques des élevages.

1. La part des protéines fourragères dans les rations des ruminants

Différents modes d'estimation sont possibles.

Dans une première approche, très basique et uniquement destinée à fixer les grandes masses, on peut estimer la quantité de protéines issues des surfaces fourragères et la comparer à la quantité de protéines apportée pour la complémentation des rations.

Cette estimation est basée sur les surfaces des différentes cultures fourragères, sur des estimations globales de rendement et sur les teneurs moyennes en protéines. Cette estimation peut être biaisée par l'erreur faite sur la production de matière sèche, le taux d'utilisation des fourrages et sur la teneur en protéines des prairies, notamment permanentes, consécutive à de faibles fertilisations azotées.

Toutefois, et en restant prudent compte tenu des réserves émises ci-dessus, ces calculs conduisent à une quantité totale de protéines fourragères estimée à 8,4 Mt (millions de tonnes) de matières azotées totales, soit 17 Mt équivalent tourteau de soja 48 (tableau 1).

Tableau 1 : Estimation des rendements en matière sèche et en matières azotées totales à partir des différentes cultures fourragères en France.

Table 1 : Estimation of dry matter yield and crude protein yield from the various forage crops in France.

Culture	Superficie (ha)*	Rendement MS (q/ha)*	Production (Mt)*	Teneur en MAT (%)**	Total MAT produites (Mt)
- Betterave fourragère	33 341	140	0,47	5	0,02
- Chou fourrager	38 663	47	0,18	10	0,02
- Navette fourragère	1 602	29	0,00	10	0,00
- Autres	1 240				
Total choux, racines...	74 846		0,65		0,04
- Maïs fourrage	1 397 919	130	18,17	7	1,27
- Sorgho fourrage	1 215	77	0,01	7	0,00
- Colza fourrager	234 109	47	1,10	15	0,17
- Trèfle incarnat	4 960	50	0,02	15	0,00
- Ray-grass d'Italie	238 505	80	1,91	8	0,15
- Autres	96 503				
Total fourrages annuels	1 769 678		21,22		1,59
- Luzerne	353 827	95	3,36	15	0,50
- Trèfle violet	44 503	85	0,38	14	0,05
- Autres et mélanges	34 410	79	0,27	14	0,04
Total prairies artificielles	432 740		4,01		0,60
- Ray-grass anglais	561 630	88	4,94	12	0,59
- Autres graminées	443 395	83	3,68	12	0,44
- Mélanges et associations	1 279 305	75	9,59	14	1,34
Total prairies temporaires	2 284 330		18,22		2,38
Total prairies de 0 à 5 ans	2 717 070		22,23		2,97
- Prairies de 6 à 10 ans	861 570	60	5,17	8	0,41
- Prairies naturelles	7 058 704	56	39,53	8	3,16
- STH peu productives	2 420 222	13	3,15	8	0,25
Total STH	10 340 090		47,84		3,83
Total fourrages	14 902 090		91,94		8,44
STH/Total fourrages	0,69		0,52		0,45

* : Données fournies par les statistiques agricoles Agreste 2000 ; Mt : million de tonnes

** : Teneur en MAT estimée et ajustée d'après les tables de DEMARQUILLY

Dans le même temps, pour la campagne 2000/2001, 10,5 Mt de matières végétales riches en protéines (MRP) ont été consommées en France pour un total de 3,73 Mt de MAT, et importées à hauteur de 51% (UNIP, 2002). En France comme en Europe, le taux de couverture tend à diminuer sur des volumes toujours croissants. Les aliments composés destinés aux bovins ont représenté 19% des 23,20 Mt d'aliments composés produits en France (source : SNIA/SYNCOPIA). Compte tenu des différences de teneurs en MAT entre les catégories d'aliments, on peut estimer qu'un tiers des MAT entrant dans la fabrication d'aliments composés est destiné à la complémentation des rations de ruminants.

On ne dispose pas des éléments statistiques concernant l'autoconsommation de céréales et de protéagineux au sein des exploitations.

Ainsi, si on exclut les compléments auto-consommés, on peut estimer à 85% la part des protéines fourragères dans l'alimentation des ruminants.

Cependant, ceci constitue une moyenne très globale. Les systèmes allaitants ont une part de protéines fourragères plus élevée, l'alimentation des animaux reposant massivement sur la fourniture énergétique et protéique permise par le pâturage. A l'opposé, les systèmes laitiers, particulièrement bovins, sont ceux où la part des protéines fourragères est la plus faible. Cependant, cette contribution peut varier fortement avec le rationnement. Une enquête du BTPL en 2001 auprès de 922 exploitations laitières montrait que le niveau moyen des performances laitières structurait fortement l'échantillon, notamment en ce qui concerne le rationnement. La quantité par litre de lait de correcteurs azotés et de concentrés de production riches en protéines augmente fortement pour les troupeaux dont la moyenne dépasse 8 000 kg/VL/an. Ces troupeaux sont aussi ceux qui reçoivent les plus grandes quantités de maïs ensilage, fourrage particulièrement pauvre en protéines (tableau 2).

Tableau 2 : Evolution de la complémentation protéique en fonction de la performance laitière moyenne des troupeaux (enquête BTPL, 2001).

Table 2 : Changes in protein feed supplementation according to mean dairy performances of herds (survey by BTPL, 2001).

Performances du troupeau	Maïs ensilage dans la ration (%)	Concentrés riches en protéines (g/l lait)
< 6 000 l par vache laitière (VL)	41	118,5
6 000 – 7 000 l par VL	50	118,5
7 000 – 8 000 l par VL	58	135,6
> 8 000 l par VL	64	156,6

2. Production de protéines par unité de surface

Les cultures fourragères produisent des quantités importantes de protéines à l'hectare (tableau 3). Comme connu depuis longtemps, la luzerne apparaît nettement comme la culture permettant la plus forte production de protéines par unité de surface, loin devant les protéagineux et oléoprotéagineux.

Pour les cultures fourragères non légumineuses, la fertilisation azotée a un effet important sur la production de biomasse et de protéines (tableau 4). Pour une culture d'âge donné, la réduction de la fertilisation azotée affecte plus la production de protéines que celle de matière sèche, signifiant ainsi un effet négatif très important sur la teneur en azote et en protéines.

Le vieillissement du couvert a des effets contrastés suivant le niveau de fertilisation. Pour le niveau de fertilisation intermédiaire, l'effet est faible. Sous fertilisation très limitée, la production significative en A1 et sa réduction au cours des années suivantes traduit une utilisation durant les premiers cycles de l'azote disponible. Sous fertilisation élevée, la production de matière sèche chute fortement alors que la quantité de protéines (ou d'azote) varie peu. Il est alors possible que le couvert soit en fertilisation excessive par rapport à son potentiel de croissance et que l'azote soit accumulé sous forme de nitrates.

Tableau 3 : Production de protéines par unité de surface pour différentes cultures métropolitaines.

Table 3 : Protein yield per unit area for various crops in metropolitan France.

	Luzerne	Colza	Tournesol	Pois	Blé
Rendement (t/ha)	13	3	2,36	5	7
Protéines (kg/ha)	2 600	567	502	1 150	700

Tableau 4 : Effet de la fertilisation azotée sur la production de matière sèche et de MAT sur des cultures de fétuque élevée récoltées en 5 coupes annuelles à Lusignan en A1 (1992) et en A4 (1995) (Gastal *et al.*, 1997).

*Table 4 : Effect of nitrogen fertilization on dry matter yield and crude protein yield of Tall Fescue crops cut 5 times a year at Lusignan in 1st (A1, 1992) and 4th (A4, 1995) crop year (Gastal *et al.*, 1997).*

Fertilisation azotée	Année	Matière sèche (t/ha/an)	MAT (N x 6,25) (kg/ha/an)
N1 : 40 N/ha	1992 (A1)	7,5	687
	1995 (A4)	3,8	343
N2: 180 N/ha	1992 (A1)	11,0	1 310
	1995 (A4)	10,0	1 093
N3: 380 N/ha	1992 (A1)	17,0	2 500
	1995 (A4)	11,2	2 250

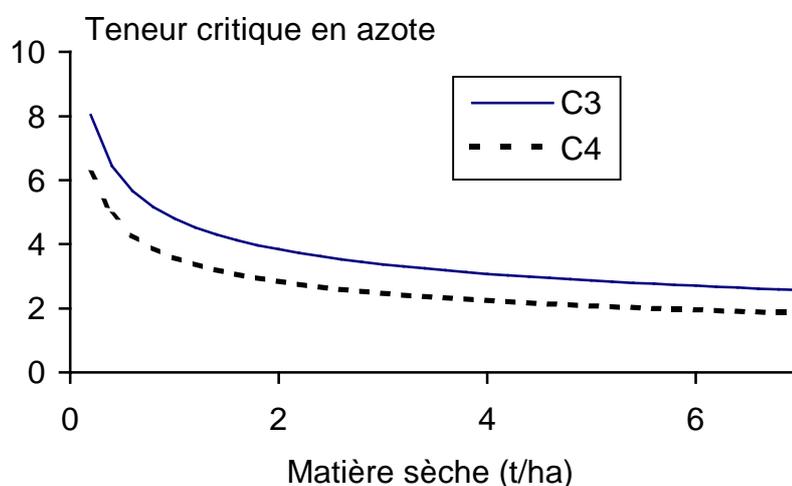
3. Quelques aspects écophysiological relatifs au métabolisme de l'azote dans les cultures fourragères

Afin de comprendre la variation de teneur en protéines, il est nécessaire de préciser quelques relations existant au sein des couverts végétaux.

Pour les espèces fourragères pérennes, en situation de fertilisation azotée non limitante, la relation au long d'un cycle de croissance entre la quantité de matière sèche et sa teneur en azote suit une courbe exponentielle négative. Cette courbe a été vérifiée quels que soient l'espèce, le cycle de croissance et l'année.

Figure 1 : Relation entre la biomasse disponible par unité de surface et la teneur critique en azote chez les espèces en C₃ et en C₄ (Lemaire et Gastal, 1997).

Figure 1 : Relationship between available bio-mass per unit area and critical nitrogen concentration in C₃ and C₄ species (Lemaire and Gastal, 1997).



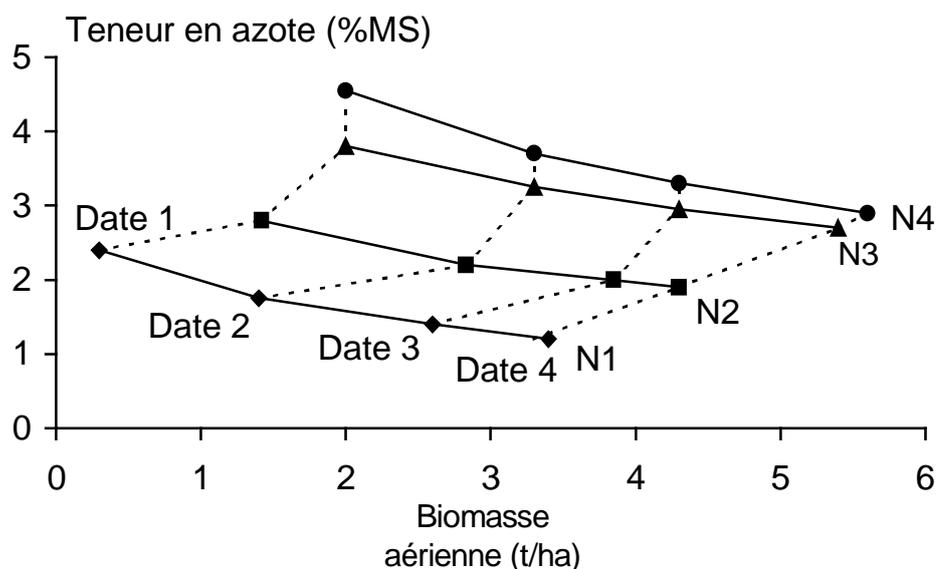
Cette courbe, appelée aussi courbe de dilution, a également été obtenue pour d'autres espèces en C3, y compris les légumineuses comme la luzerne (figure 1). Un modèle unique simple a été développé avec pour équation :

$$N_c(\%) = 4,8 MS^{-0,34}$$

En cas de fertilisation azotée limitante, la teneur en azote et la production de matière sèche diminuent. Les points se situent alors en dessous de l'équation citée plus haut. Si, au contraire, on augmente la fertilisation azotée, il y a accumulation d'azote dans la plante sans que cela ne se traduise par une augmentation de la production de biomasse (figure 2). La teneur en azote optimale a été qualifiée de teneur critique et correspond à un fonctionnement optimal du couvert, notamment vis-à-vis de la photosynthèse. La diminution observée avec l'accumulation de matière sèche correspond à la mise en place au cours du développement de tissus de soutien moins riches en azote.

Figure 2 : Relation entre l'accumulation de biomasse aérienne et la concentration en azote dans des couverts de fétuque élevée à 4 niveaux de fertilisation azotée (d'après Gastal et Durand, 2000).

Figure 2 : Relationship between above-ground bio-mass accumulation and nitrogen concentration in Tall Fescue swards for 4 levels of nitrogen fertilization (after Gastal and Durand, 2000).



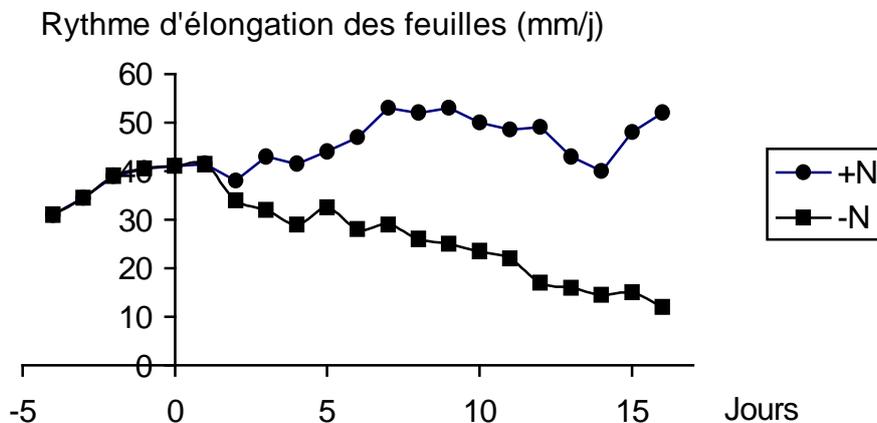
Les légumineuses, en adaptant en permanence leur fixation symbiotique à leurs besoins métaboliques en azote, suivront en permanence la courbe référence (sauf en période de stress hydrique), alors que les couverts de graminées auront fréquemment une alimentation azotée limitante.

Les espèces en C4 (maïs, sorgho) ont un système photosynthétique différent, plus performant en termes d'efficacité de conversion en biomasse du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé. La teneur critique en azote pour une même biomasse est plus faible chez les plantes en C4 que chez les espèces en C3 (figure 1). On comprend alors pourquoi la teneur en protéines chez le maïs ensilage est faible, ceci étant encore accentué par des fertilisations azotées réduites.

Chez les graminées fourragères, la réduction de la production de biomasse en cas de faibles fertilisations azotées s'explique d'une part par une diminution de l'activité photosynthétique (sous fort éclairage uniquement) (Chapin *et al.*, 1987) et, d'autre part, par une diminution de la surface foliaire, la vitesse d'élongation étant particulièrement sensible à la diminution de l'alimentation azotée (figure 3) (Gastal *et al.*, 1992).

Figure 3 : Réponse du rythme d'élongation foliaire à l'application d'azote (Gastal *et al.*, 1992).

*Figure 3 : Response of leaf elongation rate to nitrogen dressings (Gastal *et al.*, 1992).*



4. Comment augmenter la production de protéines fourragères par unité de surface ?

L'augmentation de la production de matières azotées par accroissement de la fertilisation azotée n'est pas acceptable en raison de ses impacts environnementaux. Trois voies pouvant contribuer à augmenter la production de protéines par unité de surface vont être discutées dans la suite de ce document.

* Explorer la variabilité génétique

Autour des grandes relations illustrées dans le paragraphe précédent, il peut être recherché une éventuelle variabilité génétique intra-spécifique, qui pourra ensuite être utilisée en amélioration génétique et en création variétale. Des exemples pris sur trois espèces fourragères vont illustrer cette voie et ses éventuelles difficultés.

Chez la luzerne, dans un dispositif bilocal (Lusignan (Vienne), Connantre (Marne)) avec 7 récoltes par lieu, la relation entre la teneur en protéines et la production de matière sèche a été analysée sur un ensemble de 144 variétés des classes de dormance 3 à 6 (Julier, comm. pers.). La corrélation génétique entre les deux caractères est négative (-0,56) et cohérente avec les éléments de physiologie présentés plus haut. Cependant, pour une coupe particulière, cette relation est peu nette et, pour un niveau donné de production de biomasse, et notamment parmi les variétés avec les meilleurs niveaux de rendement, une variation d'environ 2 points de protéines a été détectée en moyenne et peut être exploitée (figure 4).

Toujours chez cette espèce, des travaux avaient été entrepris pour exploiter une mutation naturelle permettant d'avoir des feuilles avec plus de trois folioles (jusqu'à 7). Ce caractère distinctif est stable vis-à-vis des variations de température et s'exprime davantage en jours courts (Juan *et al.*, 1993a). Il n'a cependant pas d'effet sur la teneur en protéines ou la digestibilité car la surface de limbes par feuille n'augmente pas alors que la quantité de nervures tend à croître (Juan *et al.*, 1993b). Ce caractère n'est plus utilisé qu'à des fins de distinction et de caractérisation du matériel végétal.

Le second exemple est celui du maïs ensilage pour lequel la diversité génétique a fait l'objet d'études pluri-annuelles de valeur alimentaire, notamment vis-à-vis de la digestibilité (voir diverses publications de Y. Barrière). La figure 5 illustre la relation entre rendement et teneur en protéines au sein d'un ensemble de 400 hybrides simples de maïs ensilage. Comme pour la luzerne, une variation d'origine génétique est détectée autour de la relation négative existant entre ces deux caractères, notamment parmi les variétés les plus productives.

Figure 4 : Relation entre la production de matière sèche et la teneur en protéines au sein d'un ensemble de 144 variétés de luzerne à Connantre (Marne ; données fournies par B. Julier).

Figure 4 : Relationship between dry matter production and protein content in 144 lucerne cultivars at Connantre (Marne département ; results from B. Julier).

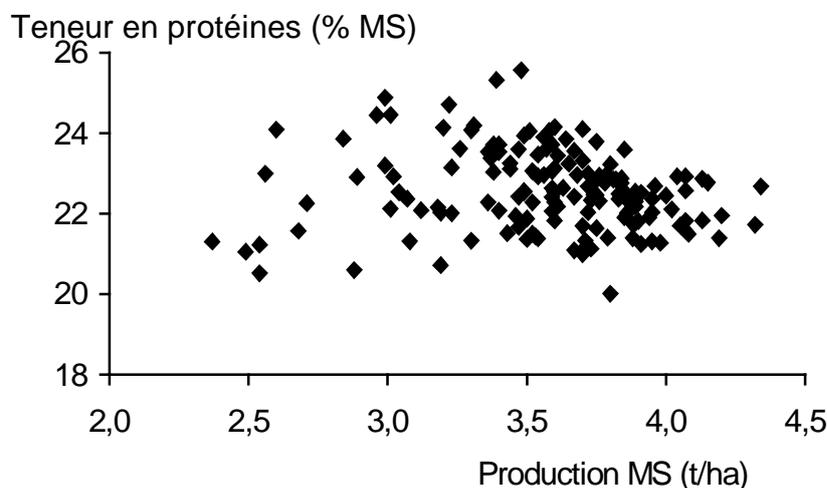
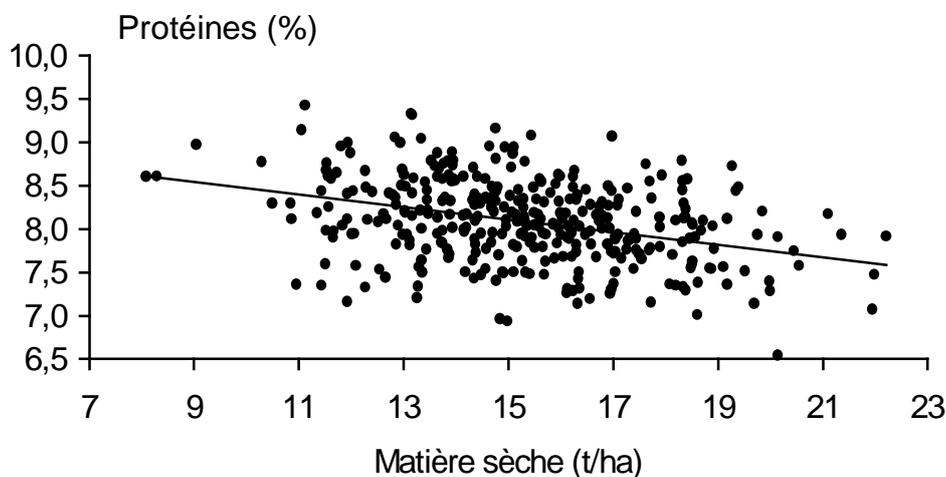


Figure 5 : Relation entre rendement en matière sèche et teneur en protéines au sein d'un ensemble de 400 hybrides de maïs ensilage (données fournies par Y. Barrière).

Figure 5 : Relationship between dry matter yield and protein content in 400 silage maize hybrid cultivars (results from Y. Barrière).



Les derniers exemples sont choisis parmi les graminées fourragères en C₃. Gastal *et al.* (1997) avaient mis en évidence une variation génétique pour l'efficacité d'utilisation de l'azote parmi un ensemble de 8 variétés de fétuque élevée, les cultivars extrêmes étant Soplina et Noria, cette dernière ayant la meilleure capacité à accumuler l'azote et à pousser en conditions de faible fertilisation azotée. *A contrario*, aucune variation n'avait été observée pour les cultivars de dactyle.

Dans une étude conduite sur 2 années, 4 lieux aux USA et 6 coupes annuelles, en conditions d'alimentation azotée peu contraignantes, Redfean *et al.* (2002) ont observé une variation très faible de 0,5 point de teneur en protéines, en moyenne non pondérée sur les différentes conditions, au sein d'un ensemble de 6 variétés de ray-grass d'Italie. Aucune différence significative de rendement n'avait été enregistrée. Cette différence entre variétés atteignait 1,4 point au mois d'avril en raison des différences de précocité d'épiaison.

Ainsi, comme le montrent ces différents exemples, il est fréquemment possible de détecter des différences intra-spécifiques de teneur en protéines, à condition de considérer une base génétique relativement large. Cependant, les différences restent faibles pour un niveau de rendement donné, les dispositifs expérimentaux doivent donc être adaptés pour éviter que ces variations génétiques ne soient masquées par les variations d'origine aléatoire.

* Augmenter la part des associations

En cas de limitation de la fertilisation azotée, l'utilisation d'associations graminées - légumineuses permet de maintenir une productivité fourragère et une teneur en protéines satisfaisantes. La légumineuse ne fournit pas ou très peu d'azote à l'espèce compagnon à partir de racines vivantes. En revanche, la sénescence des racines et des nodosités, sites de fixation symbiotique de l'azote atmosphérique et organes riches en protéines, va permettre, *via* la minéralisation de la matière organique, la fourniture d'azote à la graminée associée.

De plus, l'association va offrir une meilleure répartition de la production de fourrages au cours de l'année, la légumineuse ayant une production estivale plus importante. C'est le cas des associations dactyle - luzerne exploitées en fauche, et dans une moindre mesure des associations ray-grass anglais - trèfle blanc exploitées au pâturage. Le pilotage des associations et de leur stabilité dans le temps est délicat. Il s'agit d'un équilibre instable dépendant de l'aptitude à la compétition des deux partenaires, composante variétale, du pilotage de la fertilisation et du mode d'exploitation.

Cependant, les associations constituent une voie privilégiée pour accroître la production de protéines à partir des surfaces fourragères, sans augmenter les coûts liés à la fertilisation et en limitant les pertes en azote par lixiviation (voir chapitre 6).

* Des innovations technologiques

Comme mentionné précédemment, la luzerne constitue une source importante de protéines par unité de surface. Cette culture est aujourd'hui exploitée presque exclusivement en fauche, essentiellement pour faire du foin ou pour être déshydratée.

La régression de la luzerne en fauche s'explique d'une part par la charge de travail induite par cette pratique agricole mais surtout par la forte perte de feuilles au cours du séchage.

La modification des techniques de fanage et notamment le développement du séchage en grange permet de sauvegarder une plus grande quantité de feuilles. Ce mode de séchage permet de disposer d'un fourrage plus riche en protéines. Cette technique connaît un réel développement, en particulier pour les élevages de petits ruminants (ovins, caprins), où elle conduit à une très forte réduction de l'achat de concentrés tout en augmentant les performances zootechniques des animaux.

La fauche permet de récolter une biomasse hétérogène en qualité et induit des modifications profondes de la structure du couvert et notamment de la population de méristèmes apicaux. Ainsi, si l'on compare le pâturage d'une graminée et la fauche d'une luzerne, on constate que dans le premier cas, l'animal prélève un fourrage relativement homogène composé pour l'essentiel de limbes, réduit de façon importante la surface foliaire, mais laisse globalement intact la population de méristèmes apicaux sauf pour le cycle correspondant à l'épiaison ou en cas de pâturage très ras. A l'opposé, dans le cas de la fauche d'une luzernière, le nombre de méristèmes est drastiquement réduit, puisque l'ensemble des méristèmes apicaux en fonctionnement et une part importante des méristèmes de ramifications sont supprimés. Le fonctionnement des bourgeons de la couronne ou de ceux situés à la base des tiges fraîchement récoltées va permettre de restaurer la surface foliaire. Ceci va prendre du temps et nécessiter la mobilisation importante de réserves azotées de la racine (Avice *et al.*, 1997).

Comme cela existe pour certaines cultures légumières (épinards, haricots verts de conserve), il faudrait envisager de ne récolter que les feuilles avec éventuellement le haut des tiges à l'aide de pick-up adaptés. Ceci devrait permettre i) de laisser intacte la population des méristèmes axillaires des tiges dont les feuilles ont été prélevées, conduisant vraisemblablement à une restauration plus rapide de l'indice foliaire, ii) de récolter un produit plus homogène et de forte valeur alimentaire (teneur en protéines et digestibilité) et iii) de récolter plus fréquemment.

Le développement et le test à grande échelle de cette technique de fractionnement au champ constituent des défis importants mais porteurs de potentialités nouvelles. Ses applications possibles en élevage restent à établir.

5. Comment réduire la dégradabilité des protéines ?

La forte solubilité des protéines fourragères crues limite leur valeur alimentaire, notamment chez les animaux à haut niveau de performances. Il existe cependant des différences entre espèces. A l'opposé, la recherche de variabilité au sein des espèces présentant les plus fortes solubilités comme la luzerne n'ont pas mis en évidence de variations exploitables. Tremblay *et al.* (2002) ont montré une variation pour la teneur en protéines non dégradables dans le rumen tant au niveau des tiges (de 24,2 à 28,7% de l'azote total) que des feuilles (de 27 à 30,6% de l'azote total) au sein d'un ensemble de 27 variétés de luzerne. Par contre, agrégé au niveau de la plante entière, la variation est plus faible et est surtout la conséquence du rapport feuilles/tiges.

Le lotier (*Lotus corniculatus*) fait exception à cette situation. Les variations de dégradabilité des protéines sont liées à la présence de tanins. Ceux-ci, accumulés dans la vacuole, vont, à la mort des cellules, venir se lier aux protéines par des liaisons hydrogène, formant des complexes peu solubles et non dégradés dans le rumen. Dans l'intestin, où le pH est plus bas, ces liaisons sont rompues et les protéines peuvent être absorbées par la paroi intestinale. Pour les mêmes raisons, les légumineuses riches en tanins ne météorisent pas. En effet, les protéines complexées ne peuvent former les réseaux qui, emprisonnant les gaz dégagés par la dégradation microbienne dans le rumen, sont à l'origine des phénomènes de météorisation. A ce jour, toutes les tentatives pour transférer les gènes de synthèse de tanins chez les espèces météorisantes se sont avérées infructueuses (Robbins *et al.*, 2002).

Dans des expériences *in vitro*, le mélange de feuilles avec et sans tanins (lotier et luzerne) permet de réduire la solubilité des protéines, les tanins des feuilles riches réduisant aussi la solubilité des feuilles n'en présentant pas. Cependant, ceci devra être confirmé au niveau de rations complètes de gros ruminants, le volume du rumen et son contenu pouvant limiter l'accès des tanins aux autres protéines solubles, voire, en raison de la possible liaison entre tanins et enzymes microbiennes, engendrer une baisse de la digestibilité de la matière sèche. Si cet effet était confirmé, il pourrait encourager, lors de l'implantation de prairies temporaires destinées au pâturage, l'ajout à doses limitées d'espèces riches en tanins, notamment le lotier.

Parmi les procédés technologiques, la déshydratation entraîne, par modification de la conformation spatiale des protéines sous l'effet de la chaleur, une forte réduction de la dégradabilité des protéines, faisant de la luzerne déshydratée une source de protéines de forte valeur alimentaire. Le fanage et le séchage en grange assurent un niveau intermédiaire de protection des protéines.

Tableau 5 : Caractéristiques et valeurs alimentaires comparées d'ensilage de luzerne et de trèfle violet, et conséquences sur les performances des vaches laitières (Broderick, 2001).

Table 5 : Comparison of characteristics and feed values of Lucerne and Red Clover ; consequences on the performances of the dairy cows (Broderick, 2001).

	Ensilage de luzerne	Ensilage de trèfle violet
% MS	40	41
NDF (%MS)	42,8	42,9
Protéines* (%MS)	21	19
Azote non protéique (% N total)	52	35
MS ingérée (kg MS/j)	21,9	20,7
Gain de Poids (kg/j)	0,02	0,19
Lait (kg/j)	31,9	31,3
MG (%)	3,51	3,45
MP (%)	2,91	2,93
NDF digéré (%NDF)	43,3	52,3
Valeur énergétique (MCal/kg MS)	1,21	1,39

* Protéines du fourrage vert, pas encore ensilé (= %N x 6,25)

A l'opposé, l'ensilage de légumineuses ou de fourrages riches en protéines conduit à une forte dégradation des protéines, qui sont alors mal valorisées par les ruminants. Le trèfle violet fait exception à cette situation car la présence d'un composé particulier limite fortement la dégradation de l'azote, réduit la quantité d'azote non protéique dans l'ensilage et améliore la valeur nutritive du fourrage ensilé (tableau 5 ; Albrecht et Muck, 1991).

6. Limiter les impacts environnementaux en réduisant les pertes en azote à l'échelle de l'exploitation agricole

Les liens entre les impacts environnementaux, notamment les pertes en azote, et l'alimentation protéique sont nombreux et complexes comme on a pu le voir au travers des paragraphes précédents.

Aujourd'hui, même si les préoccupations environnementales sont partagées par beaucoup, les mesures en vue de limiter les pertes en azote liées aux pratiques agricoles sont limitées aux exploitations ayant souscrit à des programmes dans le cadre des MAE ou de certains CTE.

En absence de mesures en ce sens, la limitation des pertes en azote se fait donc, dans la majorité des cas, dans un souci de réduction des coûts de production.

Dans les projets de réforme de la PAC en 2006, et même si aucune décision n'a encore été arrêtée, il est suggéré d'assujettir les aides aux exploitations agricoles à des conditionnalités environnementales (*Mid-term review*, texte de F. Fischler, juillet 2002 ; proposition de la Commission du 22 janvier 2003). La question des outils de mesure est alors immédiatement posée. Parmi les diverses possibilités, une étude anglaise (CEAS, 2000), commanditée par l'UE, propose l'utilisation d'un budget azoté par exploitation (entrées – sorties) et de baser la conditionnalité sur un excès par unité de surface.

Cet outil est certes grossier et souffre de nombreuses faiblesses (non prise en compte de la fixation symbiotique dans les entrées, de l'hétérogénéité spatiale des excédents, de la fragilité du milieu). Il offre par contre l'avantage d'une mise en œuvre facile basée sur l'enregistrement des intrants (fertilisants, concentrés ou compléments alimentaires) et des sorties (produits végétaux et produits animaux, exportations éventuelles des déjections animales). Dans cette hypothèse, il convient d'analyser l'impact du système de productions animales et du système fourrager.

Selon Simon *et al.* (2000), sur un ensemble de 555 exploitations françaises et en prenant en compte la fixation symbiotique par les légumineuses, les reliquats azotés moyens dans les exploitations ayant des ruminants laitiers varient de 100 à 234 kg/ha/an, selon les productions (tableau 6). Ces excédents sont plus faibles que ceux d'exploitations ayant des monogastriques mais moins performants que les exploitations ayant uniquement des cultures annuelles de vente (céréales et oléoprotéagineux) où la fertilisation peut être ajustée assez précisément à l'exportation d'azote attendue par la récolte des grains.

Tableau 6 : Excédent azoté moyen à l'échelle de l'exploitation selon les productions agricoles (Simon *et al.*, 2000).

Table 6 : Mean nitrogen excesses at the farm level according to the agricultural productions (Simon *et al.*, 2000).

Type de production principale	Excédent azoté (kg/ha/an)
Céréales	51
Céréales + production de viande bovine	100
Céréales + production laitière	103
Céréales + production de lait et de viande	122
Production de viande	137
Production laitière	149
Production de lait et de viande	234
Volailles + divers	277
Porcs + divers	313
Production laitière + porcs	316
Porcs	542

Une étude plus fine des exploitations impliquées en production laitière montre que les exploitations en agriculture biologique ont un excédent en moyenne de 34 kg N/ha/an, contre 146 pour celles recherchant une autonomie en protéines et qui ont en moyenne 28% de légumineuses dans la SAU et 180 pour le reste de l'échantillon qui présente une prédominance du maïs ensilage.

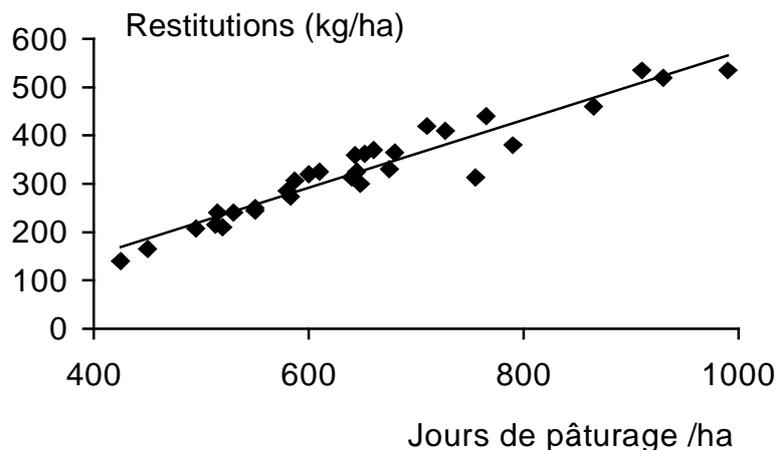
La présence d'une sole significative en céréales et oléoprotéagineux dans des exploitations d'élevage améliore de façon importante le bilan, ce qui est contradictoire avec le mouvement vers la spécialisation des exploitations. Ce paradoxe peut être résolu par des accords entre exploitations avec différentes finalités à l'échelle d'un territoire, accords qui permettraient un transfert d'aliments dans un sens et de déjections animales dans l'autre.

L'amélioration du bilan en élevage de ruminants nécessite une meilleure valorisation des protéines végétales, notamment en réduisant leur dégradabilité, ce qui est relativement difficile comme présenté au chapitre précédent. L'augmentation de la part des légumineuses fourragères, en culture pure ou en association, améliore ce bilan en réduisant les intrants.

C'est en particulier dans les systèmes où le pâturage constitue une part importante de la ration que les risques de perte sont les plus importants. Vérité et Delaby (2000) ont notamment montré que les restitutions en azote augmentaient avec le nombre de jours de pâturage, et ceci quelle que soit la composition botanique de la prairie (figure 6).

Figure 6 : Relation entre le nombre de jours de pâturage permis par la production de fourrages et les restitutions d'azote (Vérité et Delaby, 2000).

Figure 6 : Relationship between number of grazing days allowed by the forage production and amount of re-cycled nitrogen (Vérité and Delaby, 2000).



Les pertes d'azote minéral par lessivage restent limitées sous les cultures fourragères pérennes si la fertilisation et la conduite sont adéquates, à la fois parce que l'excédent est faible et parce que la quantité d'eau s'écoulant vers les horizons profonds est faible. Simon *et al.* (1997) montrent, en synthétisant des données issues de différentes conditions environnementales, que les lessivages d'azote et les concentrations en nitrates dans les eaux percolées n'augmentent de façon importante qu'au delà d'un chargement de 700 jours de pâturage.

La concentration en nitrates est donc liée à la quantité de protéines fournie par le couvert végétal, les pertes étant liées d'une part à l'efficacité d'utilisation de l'azote par la prairie et d'autre part à l'efficacité de valorisation des protéines ingérées par les animaux en quantités souvent excessives. Il existe peu de possibilités de sortir de ces liaisons. Il serait toutefois possible d'explorer deux voies. La première serait d'utiliser des espèces ou des variétés de graminées ayant une meilleure efficacité d'utilisation de l'azote. La seconde consisterait à apporter un complément alimentaire permettant de valoriser l'excès de protéines ingérées (complément très énergétique à base de céréales ou complément avec du maïs ensilage).

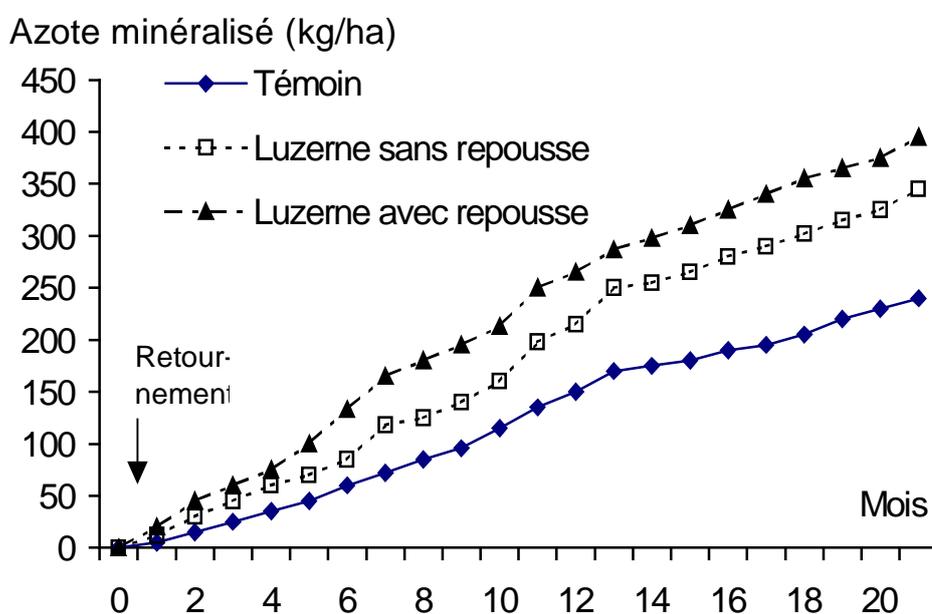
La réduction de la fertilisation azotée affectant d'abord la teneur en protéines, il existe une possibilité, très limitée, d'ajustement *via* l'ajustement de la fertilisation. Par contre, il est très intéressant de noter que, pour un

même niveau de production fourragère (mesurée par le chargement), Simon *et al.* (1997) ont noté des quantités d'azote lessivé (15 kg N/ha/an vs. 38) et des teneurs en nitrates dans les eaux percolées plus faibles (14 mg NO₃/l vs. 19) sous une association ray-grass – trèfle blanc que sous un ray-grass en culture pure avec une fertilisation azotée de 250 N.

En revanche, dans le cas de prairies temporaires ou artificielles en rotation, des libérations d'azote importantes se produisent pendant de longues périodes après le retournement, cette durée étant liée à l'évolution de la matière organique enfouie. Ainsi, Justes *et al.* (2001) ont montré que, suite au retournement d'une luzernière, la minéralisation de l'azote se produit sur les deux années suivantes avec une minéralisation totale de 345 kg/ha, soit 100 kg de plus que le témoin en cultures annuelles, avec donc des risques de lessivage importants. Ces quantités sont encore plus élevées (+ 50 kg) si la luzernière a présenté une repousse entre la dernière coupe et le retournement (figure 7). La fertilisation azotée des cultures suivantes devra être adaptée en conséquence, permettant ainsi de transformer un risque environnemental en avantage agronomique.

Figure 7 : Minéralisation d'azote au cours des deux années suivant le retournement d'une luzernière avec ou sans repousse après la dernière récolte (Justes *et al.*, 2001).

*Figure 7 : Nitrogen mineralization during the two years following the ploughing-up of a lucerne field, with or without re-growth after the last cut (Justes *et al.*, 2001).*



7. Réduire le coût énergétique global

Dans le cadre des accords de Kyoto, il est prévu de réduire significativement le recours aux énergies non renouvelables et de favoriser les pratiques susceptibles d'immobiliser du carbone pour lutter contre le réchauffement global.

Il est possible d'estimer, même de façon approximative, par l'analyse des cycles de vie, la consommation énergétique des différentes activités de production. Il est ainsi possible dans le domaine des prairies et de l'élevage d'estimer la consommation par unité de production animale. Rossier et Gaillard (2001) l'ont fait sur un ensemble de 35 exploitations agricoles suisses où ils démontrent que le coût énergétique par litre de lait varie de 4 à 12 MJ/litre lait. Ce coût énergétique est légèrement plus bas quand le niveau de production par animal augmente. Le coût énergétique est surtout affecté par la quantité de concentrés nécessaire à la complémentation des rations, la fertilisation azotée, les charges de mécanisation et les fluides (électricité, carburant). Les concentrés étant pour l'essentiel destinés à équilibrer la ration en termes de protéines, il est capital de maximiser l'apport de protéines par les fourrages.

La part des légumineuses dans la ration fourragère est aussi un élément important pour réduire les coûts énergétiques. En effet, l'utilisation d'engrais azoté constitue l'essentiel du coût énergétique de la production

fourragère puisqu'il faut 550 MJ pour fixer 1 kg d'azote sous forme d'engrais ammoniacal sachant que le rendement énergétique de la réaction chimique (procédé Haber-Bosch découvert en 1917) est aujourd'hui proche de 1. La consommation énergétique d'une culture de blé atteint 22 175 MJ/ha pour un rendement attendu de 90 qx alors que celle d'une luzerne est de 5 600 MJ/ha, la différence étant imputable au coût de la fertilisation, particulièrement azotée (INRA, 2002). Ainsi, l'augmentation de la part des légumineuses fourragères dans les rations animales permet de réduire le coût énergétique dû tant à la production fourragère qu'à la complémentation.

Le second volet des accords de Kyoto important pour les surfaces fourragères n'est pas directement lié aux protéines. Il a été montré que, sous les conditions pédoclimatiques françaises, les prairies pérennes permettaient de stocker 1,6 fois plus de carbone dans l'horizon 0-30 cm que les cultures annuelles (67,5 t/ha contre 43 t/ha), ce stock atteignant 92 t/ha pour les pelouses d'altitude (Arrouays et Deslais, 2001 ; INRA, 2002). Cependant, ces estimations doivent être affinées et le rythme de stockage - déstockage précisé dans le cas de prairies temporaires ou artificielles en rotation.

Conclusion

Cette analyse générale de la problématique montre l'importance de la contribution des fourrages à la fourniture de protéines alimentaires pour les ruminants. Il existe différentes voies pour augmenter cette production de protéines. Les possibilités pour en améliorer la qualité, notamment *via* la réduction de la dégradabilité sont quant à elles plus limitées, à l'exception de la déshydratation. Cependant, la mise en œuvre de ces différentes voies dépend beaucoup des politiques agricoles qui sont et seront mises en œuvre, qu'elles concernent les cultures de vente ou la déshydratation.

L'analyse des évolutions possibles des systèmes fourragers et de leur contribution à l'alimentation protéique doit tenir compte des cadres de contraintes.

La diminution des reliquats azotés par unité de surface pourrait favoriser les cultures annuelles plus faciles à maîtriser. Par contre, la prise en compte des contraintes globales de réduction de la consommation en énergie fossile et de stockage de carbone est possible *via* un accroissement de la part des cultures pérennes et surtout des légumineuses fourragères. Ainsi, un accroissement des prairies et cultures fourragères peut permettre à la France et à l'Europe de remplir leurs engagements dans le cadre des accords de Kyoto.

Plus globalement, il apparaît que les perspectives de changement ou d'innovations pour augmenter la contribution des protéines fourragères à l'alimentation des ruminants ou leur qualité existent même si elles sont limitées, que ce soit par la sélection, la gestion des associations ou les innovations technologiques. Les systèmes fourragers et d'élevage ont en effet déjà été optimisés pour les aspects agronomiques, zootechniques ou économiques. Cependant, cet équilibre doit en permanence être repensé et re-optimisé en fonction des contraintes, et notamment des contraintes environnementales. La production de protéines fourragères pour nourrir les ruminants constitue un exemple supplémentaire de l'obligation d'approcher les problématiques agronomiques des prairies en prenant en compte leur rôle multifonctionnel.

Travail présenté aux Journées d'information de l'A.F.P.F.

"Fourrages, protéines et environnement : de nouveaux équilibres à construire",
les 27 et 28 mars 2003.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Albrecht K.A., Muck M.E. (1991) : "Proteolysis in ensiled forage legumes that vary in tannin concentration", *Crop Science*, 31, 464-469.

Arrouays D., Deslais W. (2001) : "The carbon content of topsoil and its geographical distribution in France", *Soil Use and Management*, 17, 7-11.

Avice J.C., Ourry A., Lemaire G., Volenec J.J., Boucaud J. (1997) : "Root protein and vegetative storage protein are key organic nutrients for shoot regrowth", *Crop Science*, 37, 1187-1193.

Broderick G.A. (2001) : "Maximising utilization of alfalfa protein : the example of the lactating dairy cow", *Options Méditerranéennes*, 45, 183-192.

Centre for European Agricultural Studies (2000) : *The environmental impact of dairy production in the EU: practical options for the improvement of the environmental impact*, 176 p.

Chapin F.S., Bloom A.J., Field C.B., Waring R.H. (1987) : "Plant response to multiple environmental factors", *BioScience*, 37, 49-57.

Gastal F., Durand J.L. (2000) : "Effects of nitrogen and water supply on N and C fluxes and partitioning in defoliated swards", G. Lemaire, J. Hodgson, A. de Moraes, P.C. de F. Carvalho éd., *Grassland Ecophysiology and Grazing Ecology*, CAB, p 15 – 39

Gastal F., Nelson C.J., Coutts J.M. (1992) : "Role of N on leaf growth of grasses : assessment of a root signal hypothesis", *Proc. Annual Meet. American Soc. of Agron.*, p 125.

Gastal F., Ghesquière M., Murray C., Hazard L., Bélanger G. (1997) : "Variation in nitrogen use efficiency among tall fescue and cocksfoot cultivars", *Proc XVIIIth Int. Grassland Cong.*, Winnipeg, 8-19/06/97.

INRA (2002) : *Contribution à la lutte contre l'effet de serre ? Stocker du carbone dans les sols agricoles français ? Rapport d'expertise réalisé par l'INRA*, octobre 2002, INRA éd., 332 p.

Juan N.A., Sheaffer C.C., Barnes D.K. (1993a) : "Temperature and photoperiod effects on multifoliolate expression and morphology of alfalfa", *Crop Science*, 33, 573-578.

Juan N.A., Sheaffer C.C., Barnes D.K., Swanson D.R., Halgerson J.H. (1993b) : "Leaf and stem traits and herbage quality of multifoliolate alfalfa", *Agronomy J.*, 85, 1121-1127.

Justes E., Thiebeau P., Cattin G., Larbre D., Nicolardot B. (2001) : "Libération d'azote après retournement de luzerne. Un effet sur deux campagnes", *Perspectives Agricoles*, 264, 22-28.

Lemaire G., Gastal F. (1997) : "N uptake and distribution in plant canopies", *Diagnosis of the nitrogen status in crops*, Springer-Verlag, 3-43.

Redfearn D.D., Venuto B.C., Pitman W.D., Alison M.W., Ward J.D. (2002) : "Cultivar and environment effects on annual ryegrass forage yield, yield distribution and nutritive value", *Crop Science*, 42, 2049-2054.

Robbins M.P., Allison G., Bettany A.J.E., Dalton S., Davies T., Hauck B., Hughes J.W., Timms E., Morris P. (2002) : "Biochemical and molecular basis of plant composition determining the degradability of forage for ruminant nutrition", *Multi-function Grasslands, Grassland Science in Europe*, 7, 37-43.

Rossier D., Gaillard G. (2001) : *Bilan écologique de l'exploitation agricole. Méthode et application à 50 entreprises*, FAL, SRVA, Zürich, 105 p.

Simon J.C., Vertes F., Decau M.L., Le Corre L. (1997) : "Les flux d'azote au pâturage. I- Bilans à l'exploitation et lessivage du nitrate sous prairies", *Fourrages*, 151, 249-262.

Simon J.C., Grignani C., Jacquet A., Le Corre L., Pages J. (2000) : "Typologie des bilans d'azote de divers types d'exploitation agricole : recherche d'indicateurs de fonctionnement", *Agronomie*, 20, 175-195.

SNIA/SYNCOPIA (2002) : www.nutritionanimale.org/chiffres.asp

Tremblay G.F., Belanger G., McRae K.B., Michaud R. (2002) : "Leaf and stem dry matter digestibility and ruminal undegradable protein of alfalfa cultivars", *Canadian J. Plant Sci.*, 82, 383-393.

UNIP (2002) : *Statistiques Plantes riches en protéines*, 80 p.

Vérité R., Delaby L. (2000) : "Relation between nutrition, performances and nitrogen excretion in dairy cows", *Annales de Zootechnie*, 49, 217-230.

SUMMARY

Forages and protein production

Forage crops and pastures supply approximately 85% of the protein requirements of ruminants, and this proportion can be increased still further by developing the legume forage crops (lucerne and grass/legume associations), by breeding, and by improving the harvesting techniques. On the other hand, there is a problem caused by the great solubility of the leaf proteins, which is linked to their essential metabolic function, and which varies among species. Dehydration is a means of diminishing strongly this solubility. A greater protein self-sufficiency has to be obtained while maintaining low nitrate leachings. The dairy systems that strive for protein self-sufficiency are relatively well-performing and, when coupled with cereal systems, lead to a noteworthy improvement of the nitrogen balances of the farms. At the field level, losses through leaching increase with the stocking rate, but are smaller under a grass/clover association than under a pure ryegrass crop. Attention should be given to possible losses when ploughing-up perennial forage crops. More globally, forage legumes and grass/legume associations are ideal means of combining protein self-sufficiency and a low consumption of fossil energy; moreover, pastures do immobilize carbon in a strong way.