

## **1.1.4. Sensibilité à la sécheresse des systèmes fourragers et de l'élevage des herbivores**

**G. Lemaire** (INRA, Lusignan), **Didier Micol** (INRA Theix), **Luc Delaby** (INRA Saint-Gilles), **Jean Louis Fiorelli** (INRA Mirecourt) et **Michel Duru** (INRA Toulouse). **Françoise Ruget** (INRA Avignon)

### **1.1.4.1. Introduction**

Par rapport aux systèmes de cultures annuelles, pour lesquels on peut considérer que les aléas d'années sèches défavorables peuvent être compensés par les "bonnes" années et pour lesquels la production moyenne a un sens, les systèmes d'élevage, qui doivent assurer, à tout moment de l'année, une adéquation entre l'offre en fourrage et la demande alimentaire du troupeau, doivent mettre en œuvre des stratégies d'adaptation beaucoup plus coûteuses pour faire face à ces mêmes aléas. Dans beaucoup de régions et de systèmes d'élevage, la base de l'alimentation est la production d'herbe au pâturage. La forte saisonnalité de croissance de l'herbe et la relative constance de la demande alimentaire des troupeaux implique un système de constitution de stocks et de report de consommation intra-annuel. Les aléas de sécheresse amplifient donc cette distorsion entre production et consommation de l'herbe. Dans les cas les plus extrêmes, cela peut même nécessiter des reports de stocks fourragers d'une année sur l'autre et même conduire à des pénuries fourragères à l'échelle locale, régionale, voire nationale. Les systèmes d'élevage basés sur l'exploitation de l'herbe sont donc directement dépendant des effets du climat (froid hivernal et printanier, sécheresse et hautes températures estivales) qui déterminent à la fois la croissance de l'herbe au pâturage et la constitution des stocks fourragers. Les systèmes d'élevage qui utilisent davantage de cultures annuelles (maïs irrigué ou non, céréales immatures...) sont moins directement affectés par les variations interannuelles du climat.

Dans cette section, nous analyserons en premier lieu les effets du climat et plus particulièrement de la sécheresse sur la production des prairies, afin de donner l'ampleur des variations interannuelles de production d'herbe au niveau régional. Puis nous analyserons comment face à cette variabilité les systèmes d'élevage peuvent développer des stratégies d'adaptation et de flexibilité. Ensuite nous étudierons les conséquences que peuvent avoir certains épisodes de sécheresse sur la pérennité des prairies. Enfin nous analyserons la sécheresse et la pénurie alimentaire qui peut en résulter du point de vue de l'animal.

### **1.1.4.2. La variabilité de la production des prairies en fonction du climat. Outils d'analyse (le système ISOP)** (Françoise Ruget)

La forte dépendance des systèmes d'élevage basés sur l'exploitation de l'herbe vis-à-vis du climat donne lieu à des estimations très attendues, surtout quant à sa variabilité interannuelle, qui peut remettre en cause l'équilibre des exploitations d'élevage, où la fourniture de fourrages doit être continue.

#### **1.1.4.2.1. Méthodes d'estimations possibles**

Les estimations classiques sont le résultat d'avis d'experts, se déplaçant sur le terrain, avec les risques de subjectivité que cela entraîne et la difficulté d'intégration spatiale sûre, mais aussi une connaissance des événements qui empêche des estimations "farfelues", et permet la prise en compte de certains accidents climatiques rares ou localisés. Les estimations classiques du SCEES, donnant lieu à la publication des résultats nationaux de la Statistique Agricole Annuelle (SAA), sont faites par cette méthode de synthèse d'observations de terrain réparties dans toute la France.

Mais elles peuvent aussi être issues de modèles, ceux-ci ayant la qualité théorique de l'objectivité et de l'immédiateté. Mais le risque d'estimations fausses, qu'elles soient biaisées (formalismes, paramétrage) ou dispersées (incertitude sur les données d'entrée) n'est pas négligeable : les sorties de modèles ne sont utiles que si on peut leur accorder une certaine confiance.

Les modèles permettant d'estimer la production des prairies sont nombreux. LINGRA (Schapendonk et al., 1998), et PASIM (Riedo et al., 1998), pour citer 2 exemples européens, sont particulièrement adaptés à la simulation de pousses courtes, car ils sont calés et validés dans des conditions de coupes nombreuses (4 à 6 coupes par an), qui excluent l'existence de sénescence : ils sont plutôt adaptés à la simulation des systèmes intensifs. Il existe aussi de nombreux modèles où la croissance de l'herbe n'est qu'une petite partie, car leur but est la gestion de l'alimentation des troupeaux ou des effluents : modèle australien GrassGro (Moore et al., 1997), américain SPUR (Wight and Skiles, 1987), danois FASSET (Jacobsen et al., 1998), français Sépatou (Cros et al., 2004). Dans ce cas, les entrées nécessaires peuvent être définies de façon précise.

L'estimation de production régionale – ou de variabilité de production régionale - est assez rare, car plus difficile à bâtir et à contrôler. En effet, pour passer du modèle à l'estimation régionale, le travail à réaliser est conséquent : il faut construire une base de données adaptée au modèle et permettant de caractériser le milieu et les pratiques régionalement (paramètres et variables d'entrées "régionaux"). A cet effet, le ministère de l'Agriculture français a fait construire un système permettant d'évaluer régionalement la variabilité interannuelle des productions (ISOP) : il est appuyé sur un modèle et les résultats du système ont été mis à l'épreuve de la confrontation annuelle des résultats aux estimations des experts. Ce travail a été fait dans le cadre d'ISOP, et des confrontations aux estimations habituelles de terrain ont permis de valider ces estimations simulées.

Les autres estimations régionales en Europe sont celles de MARS qui donnent toutes les 6 à 8 semaines pendant la période de production une carte de la production en 4 classes par rapport à une référence dite "normale" (1 au dessus, 2 en dessous) (<http://agrifish.jrc.it/marsstat/bulletins/2005.htm>). Elles permettent de détecter en temps "réel" les zones affectées par la sécheresse sur l'ensemble de l'Europe et du bassin méditerranéen. Cet outil opérationnel, n'est pas employé actuellement pour des études historiques ou fréquentielles, sans doute en raison de l'absence de longues séries historiques (emploi d'images satellitaires, de disponibilité récente). L'estimation de l'évolution des couverts cultivés (par rapport aux années précédentes prises comme référence) est assez globale, car à l'échelle du 25 millionième environ (l'Europe sur un format A5).

#### **1.1.4.2.2. Résultats du système ISOP**

Le système ISOP (Ruguet et al., 2001 ; Ruguet et al., 2006) estime la variabilité interannuelle de production pour chaque région fourragère et l'évolution au cours de l'année de cette production, en valeur relative par rapport à la production "normale" de la même zone à la même date.

##### **a. La variabilité de la production annuelle**

. *Au niveau national*, en valeur absolue : les statistiques du SCEES et celles d'ISOP

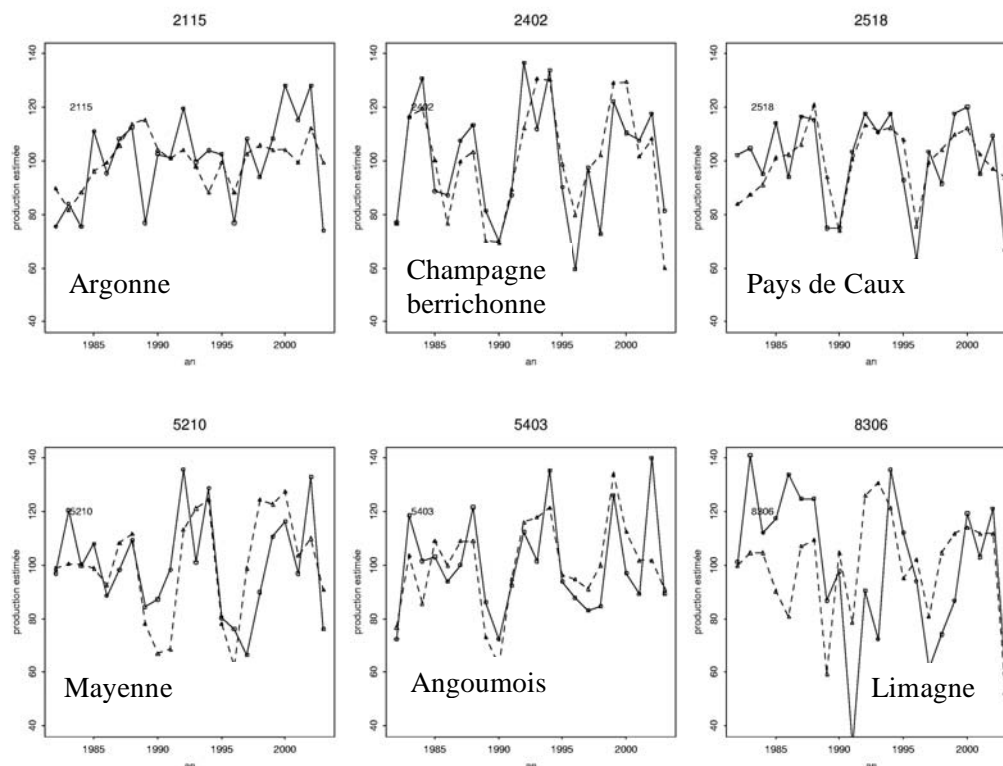
En moyenne nationale sur 20 ans (de 1984 à 2003), le rendement est de 50 q/ha avec des valeurs pour la moyenne nationale variant entre années de 36 à 61q/ha (chiffres SAA, SCEES), ce qui correspond à un rapport amplitude/moyenne de 0.5.

Les estimations du modèle donnent des valeurs absolues un peu plus élevées (moyenne nationale 67, minimum interannuel de 38 q/ha, maximum de 92 q/ha), ce qui correspond, en raison des maxima plus élevés, à une variabilité plus forte (amplitude/moyenne = 0.8).

. *Au niveau régional*

En valeur rapportée à la moyenne régionale, les estimations du modèle sont généralement proches des estimations des experts. Elles donnent de très grandes amplitudes de productions régionales : l'amplitude interannuelle de production se situe majoritairement entre 50 et 100% de la moyenne, avec

quelques rares valeurs plus faibles, par exemple dans les montagnes régulièrement arrosées, et quelques valeurs plus élevées dans des zones sèches, souvent peu productives, essentiellement à cause des années très sèches 1989, 1990, 1996 et 2003.



**Figure 1.** Quelques exemples de variabilité interannuelle régionale (ISOP, Ruget et al. 2001).

## **b. La variabilité de production au cours de l'année**

### *. A l'échelle nationale*

**La période où la production devient anormalement faible.** L'entrée en sécheresse a paru assez fiable par rapport à ce qui est observé globalement sur le terrain, en particulier en 2003 et en 2005 : les cartes mensuelles (non figurées ici) ont fait apparaître la réduction de production dès fin mai par exemple dans la vallée du Rhône et de la Saône, ce qui correspondait aux observations locales. Mais la période estivale non productive semble trop accentuée (toujours longue), et la reprise de végétation après sécheresse est généralement plus tardive. Jusqu'à présent, on n'a pas pu corriger ce défaut.

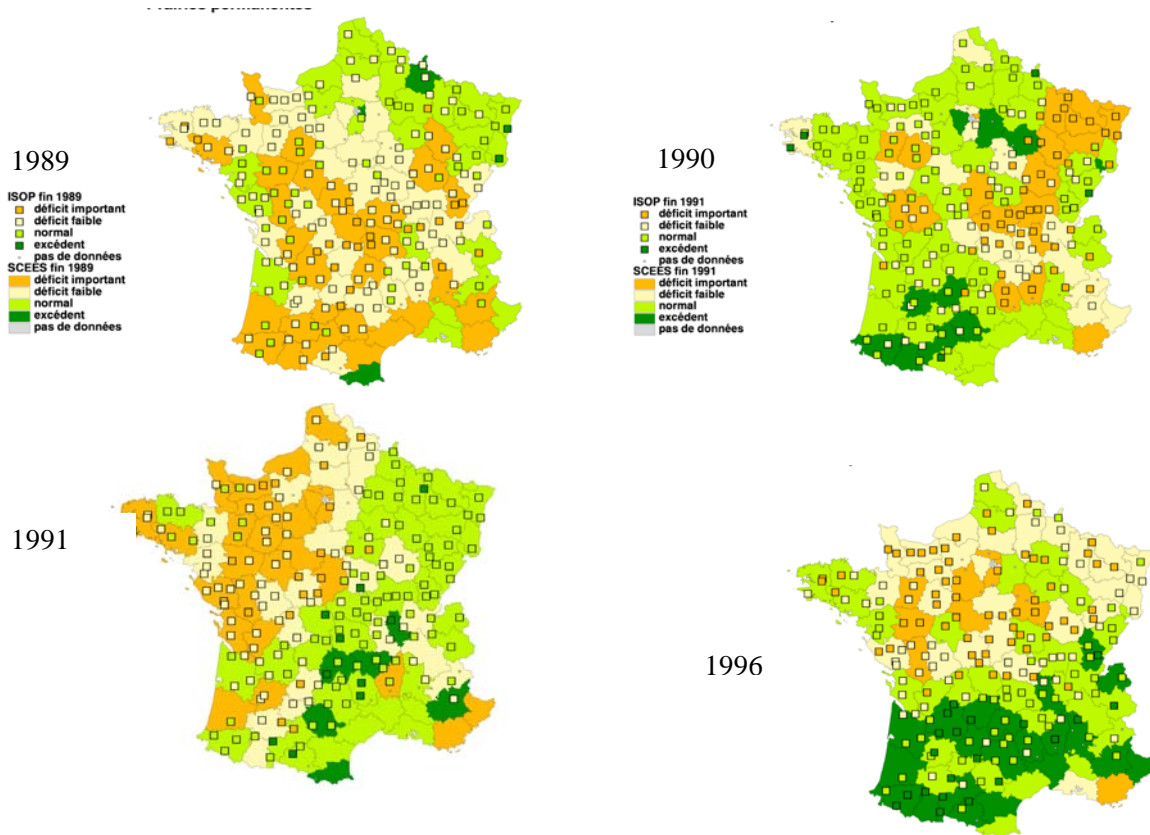
**Les zones touchées par la sécheresse sont assez différentes selon les années.** Les intensités de sécheresse sont souvent très différentes selon les régions, et ISOP le montre de façon tout à fait satisfaisante. Les cartes ci-dessous illustrent la différence des zones touchées par la sécheresse en 1989 et 1996, celles de 1996 ayant affecté principalement la moitié Nord de la France, tandis que celle de 1989 a affecté toute la France, mais surtout la moitié Sud-Ouest. Les années 1990 et 1991 ont respectivement affecté la moitié Ouest et le quart Nord- Est de la France.

### *. A l'échelle de l'exploitation ou du bassin d'élevage*

Pour les régions fourragères du département de Saône-et-Loire, le dispositif national de prévision de la production de la prairie (ISOP) donne des indications globales sur la variabilité spatiale, saisonnière et interannuelle des productions (Gateau et al., 2006).

La prise en compte de données plus locales du climat et des sols permet une estimation des productions d'herbe, par type de sol et par zone climatique, et permet de construire un référentiel régional pour les conseillers. Appliqué à des cas types réels d'exploitation en prenant en compte la

diversité des sols sur l'exploitation, il permet de déduire les risques encourus par l'éleveur vis-à-vis des aléas climatiques et de proposer des modes de gestion du fourrage selon la nature des sols et le niveau de chargement des exploitations : il est utilisé en temps réel au cours de l'année comme "baromètre herbager" pour suivre le niveau de production par rapport à la normale.



**Figure 2.** Sécheresse et déficit fourrager dans les régions française

La couleur de fond est celle de l'estimation SAA, le petit carré superposé donne l'estimation ISOP ;

### 1.1.4.3. L'ajustement à la variabilité du climat fait partie inhérente des systèmes fourragers et des systèmes d'élevage des ruminants

Dans les systèmes d'élevage de ruminants, les fourrages et les prairies sont des produits intermédiaires qui ne sont généralement pas commercialisés. Ils doivent être transformés sur place en produits animaux dans le cadre de systèmes fourragers. Le **système fourrager** est ainsi défini comme l'ensemble des moyens de production, des techniques et des processus qui, sur un territoire, ont pour fonction d'assurer la correspondance entre le ou les système(s) de culture et le ou les système(s) d'élevage. Autrement dit, la fonction du système fourrager est d'alimenter des lots d'animaux en continu malgré les fluctuations de l'offre fourragère associées aux fluctuations annuelles et interannuelles du climat, alors que la demande alimentaire reste relativement stable à effectif animal constant (Duru et al., 1988). Les éleveurs sont donc par essence habitués à gérer la variabilité climatique, à la fois entre années à une même saison, et à l'intérieur d'une même saison. Cette variabilité recouvre à la fois des variations qui restent dans une gamme considérée comme normale, mais aussi des aléas lorsque interviennent des phénomènes d'intensité supérieure ou inférieure à une normale établie sur une longue série d'années (Eldin, 1989 ; Jager, 1998 ; Ingram et al., 2002). Le système fourrager dans sa conception par l'éleveur et dans sa mise en œuvre comporte des éléments d'adaptation qui permettent d'ajuster l'offre fourragère à la demande alimentaire du troupeau grâce à la constitution de stocks fourragers et à leur utilisation reportée.

Dans la plupart des systèmes d'élevage en France, il y a (i) une période d'arrêt ou de quasi arrêt de la croissance de l'herbe et autres plantes fourragères pendant la période hivernale, et (ii) une plus ou moins forte réduction de la croissance d'herbe en été, voire même un arrêt total de la croissance par la sécheresse. Dans ces conditions, des fourrages conservés (principalement foin ou ensilage) sont distribués dans les périodes de trop faible croissance d'herbe. En première approximation, pour un élevage donné, la quantité de fourrages conservés distribuée au cours de l'année est d'autant plus grande que les périodes d'arrêt de croissance de l'herbe sont longues. La sécheresse n'est donc pas le seul élément d'incertitude auquel l'éleveur doit faire face. La variabilité des températures de l'automne, de l'hiver et du début de printemps provoque des variations importantes de la croissance de l'herbe (Lemaire et Salette, 1981) et de certains fourrages qui peuvent augmenter considérablement la durée de la phase d'alimentation hivernale et le besoin en stocks de fourrage. Ainsi, les aléas de sécheresse de printemps et d'été qui peuvent contribuer à augmenter la demande en fourrages stockés à ces saisons peuvent être largement amplifiés lorsqu'ils interviennent après, ou qu'ils sont suivis par, une période hivernale anormalement longue et provoquer ainsi des ruptures d'alimentation du troupeau pouvant remettre en cause le fonctionnement du système d'élevage (Duru et Charpentreau, 1981). L'élevage des ruminants en région herbagère est au premier rang des spéculations agricoles directement touchées par les épisodes de sécheresse prolongés du fait de l'impossibilité dans laquelle ces systèmes se trouvent généralement à constituer des stocks pour plusieurs années. Dans les cas les plus graves, on peut envisager de décapitaliser le cheptel pour faire face à de véritables situations de crise (Terrible, 1993).

Il existe une différence fondamentale entre la perception d'un éleveur et celle d'un agriculteur céréalier vis-à-vis d'un aléa sécheresse. Ce dernier peut s'adapter à une variation de ses rendements en prévoyant un rendement objectif atteignable "en moyenne" une année sur deux et en compensant les bonnes années par les moins bonnes au niveau de sa trésorerie. Cette notion de "rendement moyen" a donc un sens économique en soi. Pour l'éleveur, qui doit assurer chaque année et à tout moment de l'année l'alimentation d'un troupeau donné, un objectif de production fourragère "moyenne" n'a aucun sens et il est obligé de dimensionner et d'organiser son système fourrager en prévoyant sinon le pire, du moins des déficits de production fourragère suffisamment accentués pour être certain d'équilibrer offre et demande dans la grande majorité des situations. Cette politique d'adaptation aux risques climatiques a toujours été intégrée dans les pratiques des éleveurs, notamment dans les régions herbagères.

Ceci conduit à considérer deux types de pratiques au niveau des systèmes fourragers et des systèmes d'élevage face à la sécheresse, selon qu'elle est anticipée ou imprévue :

- **La sécheresse anticipée** est définie par le fait que les conséquences en terme d'offre fourragère ont déjà été intégrées dans la conception du système fourrager. L'éleveur peut alors faire face à ces aléas par la mise en œuvre d'ajustements dans la gestion de ses surfaces fourragères et de ses stocks. Ces processus d'ajustement font donc partie intégrante du système fourrager, et caractérisent sa flexibilité (Andrieu et al., 2006).
- **Une sécheresse imprévue** correspond à une intensité ou une durée qui ne permettent pas d'effectuer les ajustements nécessaires au sein du système fourrager pour réaliser l'adéquation entre l'offre fourragère et la demande alimentaire. Il est nécessaire dans ce cas de mettre en œuvre d'autres types d'actions qui sortent du cadre du système fourrager habituel : achats de fourrages ou de paille à l'extérieur, utilisation à des fins fourragères de cultures de vente (concentrés, céréales immatures...), ou qui sortent du cadre du système d'élevage ; baisse temporaire des performances animales, tarissement précoce, vente d'animaux avec réorientation du type d'animal produit. A l'extrême, des sécheresses sévères et longues peuvent même conduire à une décapitalisation et à une remise en cause du système d'exploitation.

Face aux aléas de sécheresse, le concept de flexibilité du système fourrager devient fondamental. Pour caractériser cette flexibilité, Coléno et Duru (1998) proposent de représenter le système fourrager en un certain nombre d'ateliers de production de ressource fourragère correspondant aux tâches et aux savoir-faire concourant à l'élaboration d'un ou de plusieurs éléments de la chaîne d'alimentation fourragère. Le système fourrager consiste donc en une planification par l'éleveur de ses différents ateliers, ce qui correspond à la détermination des objectifs et des ressources assignés à chacun d'eux :

- *dimensionnement* visant à fixer la production de chaque atelier dans le temps avec les ressources à mobiliser (surfaces et intrants...);
- *coordination* assurant l'enchaînement dans le temps des différents ateliers, par exemple pâturage et constitution/consommation de stocks;

Le caractère récurrent et cyclique des activités d'élevage rend possible leur planification par l'éleveur (Aubry et al ; 1998) et découle d'un processus d'apprentissage. La planification comporte à la fois des décisions générales correspondant au déroulement souhaité des opérations et les adaptations nécessaires pour faire face aux variations de l'environnement comme la sécheresse (Chatelin et al., 1993 ; Duru et al., 1998 ; Fleury et al., 1996).

Les éléments de flexibilité mis en place par les éleveurs pour faire face aux aléas climatiques tels que la sécheresse sont de différentes natures. Hormis le recours à l'irrigation qui ne fait pas l'objet ici de notre analyse, ces adaptations des systèmes fourragers sont directement fonction de la **sécheresse anticipée** par l'éleveur, c'est-à-dire des risques de sécheresse qu'il conçoit comme probables ou possibles en fonction de la connaissance historique qu'il a de son territoire d'exploitation. Les ajustements mis en place au sein du système fourrager conduisent tous à une sous-utilisation certaines années des ressources fourragères produites, notamment au pâturage, puisque l'éleveur est contraint chaque année non pas d'anticiper des ressources fourragères moyennes, mais plutôt un niveau inférieur de ces ressources lui garantissant une adéquation satisfaisante entre offre et demande dans la grande majorité des situations. Ainsi plus le climat est variable et les risques de sécheresse aléatoires, plus le niveau d'utilisation des ressources fourragères devra être "sécuritaire". Le risque que craint l'éleveur n'est donc pas la sécheresse en soi mais davantage son aléa : à quelle saison la sécheresse interviendra-t-elle ? et quelle sera son intensité ?

Une des bases de l'ajustement de l'offre à la demande en cas de sécheresse est de réserver une plus grande part des surfaces en herbe à la constitution de stocks au détriment des surfaces pâturées. Des reports de stocks d'une année sur l'autre permettent d'amortir les variations interannuelles de climat. Mais comme nous l'avons dit, ces reports sont forcément limités car financièrement coûteux. Sachant que l'occurrence d'une sécheresse une année donnée n'est pas prévisible, cet ajustement conduit inévitablement à une sous-utilisation des surfaces, c'est-à-dire à une baisse du chargement animal. En conséquence, les systèmes à chargement trop élevé en régions à sécheresse aléatoire deviennent très rapidement vulnérables ou doivent avoir recours systématiquement à des apports fourragers extérieurs. Dans les régions où l'ensilage de maïs constitue la base essentielle des stocks fourragers, un élément d'ajustement très efficace consiste pour les éleveurs à jouer sur le rapport entre les surfaces de maïs ensilées et celle récoltées en grain. Cette grande flexibilité, que l'on rencontre dans les systèmes laitiers intensifs de l'Ouest, permet de maintenir de forts niveaux de chargement, mais à condition que la production du maïs ne soit pas elle-même soumise à de trop fortes variations de rendement dues à la sécheresse, ce qui est rarement le cas en dehors des systèmes irrigués. Dans un dossier spécial "Sécheresse, gérer les risques. Analyse de deux décennies", Pfmiln et al. (1997) analysent la sensibilité des systèmes d'élevage des herbivores aux aléas de sécheresse. Ils indiquent par exemple qu'en cas d'année dite "sèche", on observe une diminution d'environ 10% des rendements en blé, alors que la baisse de production de la luzerne ou des prairies temporaires comme la fétuque élevée sera de 40 à 50%. Si la sécheresse intervient tôt au printemps comme en 1976, la production annuelle de fourrage pourra être amputée de près de 2/3. Les prairies permanentes sont encore plus touchées par les sécheresses précoces de printemps car en général leur croissance démarre relativement tard.

En conclusion on peut dire que la sensibilité des systèmes fourragers et des systèmes d'élevage aux aléas de la sécheresse est d'autant plus grande que le niveau de chargement animal, c'est-à-dire le nombre d'UGB alimentées sur l'exploitation par unité de surface fourragère, est proche de celui correspondant au niveau moyen des ressources fourragères permises par le climat. La flexibilité des systèmes fourragers et les ajustements qui peuvent être mis en œuvre se traduisent dans la majorité des systèmes d'élevage par une diminution du chargement animal moyen de l'exploitation. L'intensification animale et fourragère, l'accroissement de la taille des troupeaux et leur spécialisation ont rendu les systèmes d'élevage de plus en plus vulnérables (Pfmiln et al., 1997). Les chargements ont généralement été calculés sur la base de ressources fourragères annuelles moyennes, ce qui

entraîne comme nous l'avons dit des systèmes de sécurité souvent coûteux, faisant appel à des fourrages extérieurs à l'exploitation et même à la région.

Un certain nombre de ressources fourragères sont mobilisables occasionnellement en cas de sécheresse :

- (i) La paille reste une solution accessible à tous les éleveurs. Le Bureau Commun Paille et Fourrage estime qu'environ 40% des pailles produites sont autoconsommées, 20% sont régulièrement commercialisées, et plus de 30% seraient enfouies, ce qui autorise une importante marge de manœuvre. Sur 20 millions de tonnes de paille de céréales, environ 2 millions sont utilisés normalement pour l'alimentation des ruminants, 10 à 12 millions sont utilisés normalement comme litière, et 5 à 6 millions sont enfouies directement au champ. Cette source est cependant en régression du fait des jachères et de la progression de l'enfouissement des pailles pour le maintien du statut organique des sols. Il reste cependant assez facile pour un éleveur d'acheter de la paille et de la stocker avec peu de pertes.
- (ii) Les céréales immatures. Dans un grand nombre de régions d'élevage, sauf dans les systèmes herbagers d'altitude, les céréales sont présentes, sinon dans l'exploitation, du moins localement dans la région, en proportion suffisante pour constituer, le cas échéant, une solution de rattrapage pour pallier un déficit fourrager occasionnel. Elles apportent un élément de flexibilité important car l'éleveur peut ajuster les surfaces de céréales utilisées en ensilage et celles récoltées en grain. Nous reviendrons sur cette technique dans la section 2.2.2. En cas de crise, on pourrait admettre que des éleveurs fassent des achats sur pied de céréales immatures à des voisins céréaliers.
- (iii) Le maïs. Comme nous l'avons signalé plus haut, lorsque la culture du maïs est possible, la possibilité d'un ajustement de surface entre maïs récolté en grain et maïs récolté en ensilage est un élément de flexibilité largement utilisé. Là encore, des éleveurs peuvent être amenés à acheter des maïs grains sur pied pour constituer des stocks en cas de pénurie fourragère.
- (iv) Les autres fourrages grossiers (foin de luzerne ou de prairies temporaires). Ces ressources sont plus difficilement mobilisables en cas de crise car elles sont elles-mêmes très affectées par la sécheresse. Hormis le "foin de Crau" ou la luzerne déshydratée, qui sont d'un accès très coûteux, il existe peu de ressources fourragères mobilisables sur le marché. Par contre des utilisations alimentaires de résidus de récolte peuvent s'avérer intéressantes dans certaines situations : cannes de maïs grain, fanes de pois. En revanche, les feuilles et collets de betterave sucrière ne peuvent plus être récupérés du fait des techniques de récolte actuelles.
- (v) Les friches, parcours, landes et bois. Les systèmes intégrant déjà ce type de surfaces peuvent aisément sécuriser leurs ressources pâturées en profitant du décalage entre la production de la ressource fourragère proprement dite, et son stockage sur pied. Pour le Sud pastoral, les moyennes montagnes, les zones herbagères en déprise, l'intégration de ces surfaces doit pouvoir augmenter considérablement la souplesse et la sécurité des systèmes d'élevage.

Toutes ces possibilités de mobilisation de ressources fourragères externes doivent bien entendu s'apprécier en fonction du contexte régional et surtout du système d'élevage pratiqué, notamment le type de production animale.

#### **1.1.4.4. Les dégâts de la sécheresse sur les prairies naturelles et de longue durée**

(Michel Duru, Pablo Cruz, Claire Jouany, Danièle Magda)

##### ***. Des observations et des recommandations, mais des questions toujours sans réponse***

Outre ses effets sur la production fourragère, la sécheresse est susceptible d'engendrer des changements importants de composition botanique dans les prairies naturelles, mais aussi dans les prairies semées de longue durée. Ainsi, après la sécheresse de 1976, une expertise réalisée au niveau de plusieurs régions françaises (Jeannin et al., 1977) a mis en évidence les points suivants :

- dans de nombreuses situations, les capacités de régénération ont été remarquables dès le retour des pluies à l'automne. Toutefois, des exceptions notables ont été observées lorsqu'un "surpâturage" avait eu lieu avant la sécheresse ;

- la capacité de régénération a été très différente selon les espèces composant la prairie. Le ray grass anglais, la féтуque élevée et le dactyle ont montré une bonne aptitude à redémarrer après une longue période de dormance. D'autres espèces (houlque laineuse, féтуque rouge...) sont apparues plus sensibles ;
- des graminées "médiocres" (agrostis) ou des plantes diverses (achillée millefeuille, capselle, chénopode, amarante...) peuvent se développer en profitant des "trous" consécutifs à la mortalité de certaines plantes.

Ce genre de constat est fait de manière récurrente après chaque épisode de sécheresse. La presse agricole fait mention de dégradations de prairies. Le plus souvent elle formule des recommandations pour ressemer ou sursemer. Il est ainsi proposé (Institut de l'Élevage, 2003a) de :

- ne pas pâturer immédiatement la prairie si un reverdissement généralisé est observé à l'automne,
- "regarnir" les trous par un sursemis lorsque les plantes qui reverdisent sont dispersées. Dans ce cas, il est conseillé de sursemer des graminées à installation rapide (féтуque élevée, ray grass hybride),
- ressemer la prairie par retournement ou semis direct si une proportion importante de plantes diverses est observée.

Il est à noter que peu de conseils sont donnés sur les conduites à mettre en œuvre pour éviter de tels "dégâts".

D'une manière générale, les enseignements provenant d'observatoires (suivi des dynamiques sur de longues durées) montrent que les changements dans la nature et l'importance des groupes d'espèces (graminées, légumineuses, espèces diverses) dans les prairies naturelles sont les plus fréquents suite à un épisode de sécheresse (Stampfli et Zeiter, 2004), confirmant bien les observations faites dans les exploitations agricoles. Mais ces suivis *in situ*, ou bien les observations dans les élevages, ne permettent pas de répondre aux questions suivantes posées de manière récurrente :

- les changements de végétation consécutifs à un épisode de sécheresse sont ils réversibles ?
- y a-t-il des différences de sensibilité selon les modes d'exploitation et/ou les types de végétation à l'approche d'un épisode de sécheresse ?
- quelle conduite tenir lorsque des mortalités de plantes sont observées ? faut-il toujours ressemer ? si c'est le cas, faut-il ressemer les espèces souhaitées, ou bien des mélanges comprenant des espèces facilitant l'implantation de ces espèces cibles ?
- les recommandations *ex ante* ou *ex post* épisodes de sécheresse peuvent-elles avoir valeur générale, ou bien dépendent-elles des localisations géographiques, notamment du potentiel floristique régional ?

De fait, la recherche n'a pas (en France) ou peu (en Europe) pris en compte ces questions soulevées de manière récurrente. Les recommandations résumées ci-dessus sont la synthèse d'observations sur le terrain. Elles ne s'appuient pas sur des recherches approfondies, génériques et validées. De telles informations sont à rechercher à l'étranger.

### **. Enseignements des recherches conduites en Australie et aux Etats Unis**

Les recherches conduites notamment en Australie et aux Etats-Unis fournissent des éléments de réponse factuelle aux questions posées. En outre, des cadres théoriques permettant d'orienter les recherches à réaliser ont aussi été proposés.

L'étude des effets de la sécheresse sur les dynamiques de végétation prairiale recouvre deux propriétés des écosystèmes : leur sensibilité (la nature et l'amplitude du changement suite à un stress, hydrique ici) et leur résilience (aptitude à retrouver l'état antérieur au stress). Dans une optique curative, il importe aussi de considérer le rôle de facilitateur de certaines espèces.

#### *Une interaction forte entre la conduite du pâturage et l'état physiologique des plantes*

Les effets de la sécheresse se traduisent souvent par des mortalités de plantes entraînant la création de "trous" (surfaces de sol nu) qui sont susceptibles d'être colonisés par d'autres espèces que celles déjà présentes. L'ampleur des trous est très dépendante des pratiques de pâturage. Par exemple, il a été montré qu'un pâturage en rotation occasionne moins de mortalité de plantes qu'un pâturage continu

intensif (Teague et al., 2004). En outre, la mortalité de plantes la plus importante n'a pas forcément lieu pour les sécheresses les plus sévères (Boschama and Scott, 2000). En effet, l'intensité de l'effet de la sécheresse est très dépendant de l'état physiologique des plantes au moment où a lieu un pâturage. Une sécheresse sévère peut se traduire par une mise des plantes en dormance qui les protège en quelque sorte. Une sécheresse modérée peut se traduire par des mortalités de plantes plus importantes si il y a simultanément un niveau de réserve faible et un prélèvement de feuilles par le pâturage. La réduction du nombre d'espèces suite à un stress marqué semble d'autant plus importante que la prairie est riche en espèces (van Peer et al., 2004). En fait, la stabilité de la végétation en situation de perturbation comme un stress hydrique dépend bien plus du nombre de groupes fonctionnels, c'est-à-dire des ensembles d'espèces ayant des fonctionnements différents, que du nombre d'espèces (Mitchell et al., 2000).

#### *L'établissement et la pérennisation des changements de végétation*

Dans un premier temps, la colonisation des trous par de nouvelles espèces dépend plus de la coïncidence spatiale et temporelle de ressources (lumière) et de disponibilités en semences que de caractéristiques particulières des plantes (Davies et al., 2000). Dans certaines situations, cette phase dépend aussi de leur aptitude à la compétition, notamment pour la lumière. Ensuite, la pérennité des espèces qui s'installent dans des trous consécutifs à une sécheresse dépend de leurs caractéristiques démographiques. C'est ainsi que des espèces annuelles peuvent s'installer durablement si elles produisent des graines à durée de vie longue (Buckland et al., 2001).

#### *Faut-il (sur)semmer les espèces disparues ?*

Nous avons rappelé ci-dessus que nombre de (sur)semis après sécheresse se traduisaient par une absence de pérennité des espèces semées. Une des hypothèses pour expliquer ces échecs est que les espèces cibles ne sont pas compétitives. Dans ces situations, des recherches seraient à conduire pour semer des espèces pionnières ayant une fonction de plantes nurses facilitant l'installation à moyen terme des espèces cibles (Armas et Pugnaire, 2005).

En conclusion, nous pouvons dire si peu de connaissances sont disponibles pour prédire les effets de la sécheresse sur les dynamiques de végétation (semi)naturelles, un cadre théorique permettant d'aborder ces questions complexes est maintenant largement partagé. Le modèle conceptuel propose de représenter les dynamiques de végétation comme une succession d'états dont les transitions sont largement sous la dépendance de facteurs anthropiques (le pâturage), en forte interaction avec des facteurs abiotiques comme des épisodes de sécheresse (Westoby et al., 1989 ; Briske et al., 2003, 2005). Il permet d'aborder les conjonctions de facteurs donnant lieu à des changements importants des états de végétation et à leur degré de réversibilité.

### **1.1.4.5. La sécheresse chez les herbivores**

(Didier MICOL, INRA Theix)

De tout temps, parmi les fléaux climatiques, la canicule est la principale ennemie des herbivores des zones tempérées (Jarrige et al., 1987) et la sécheresse(s) celle des éleveurs d'herbivores. Ces sécheresses au fil des années ont une fréquence et une gravité plus importantes. Cependant, elles prennent des ampleurs différentes selon les zones naturelles de notre territoire et des formes différentes selon leur intensité au cours de la campagne (cf. flexibilité des systèmes fourragers) (Andrieu et al., 2006). Pour mémoire, la sécheresse de 1976 a affecté le Nord de notre territoire et s'est faite sentir avec moins d'ampleur dans les zones herbagères du Centre de la France ; a contrario, celle de 2005 a particulièrement affecté les zones de moyenne montagne humide du Massif Central, en pénalisant les réserves fourragères (-30 à -50%). La pire des sécheresses pour l'éleveur d'herbivores est celle qui s'accroît au fil de la saison : elle sévit dès le début du printemps (voire dès l'hiver), elle peut être renforcée ensuite par des gelées tardives ou des vents froids assez desséchants et enfin durant la période estivale se traduire par un manque accru de précipitations et des températures élevées (canicule), pénalisant les repousses d'automne. C'est au printemps et dans la première moitié de l'été que la croissance maximum des diverses plantes fourragères permet à tous les animaux d'avoir une production maximum au coût le plus bas, qu'il s'agisse de la production laitière, du croît des animaux

d'élevage ou de la finition à l'herbe ou de la reconstitution des réserves corporelles des mères allaitantes, et permet aux éleveurs de récolter la majeure partie des réserves fourragères pour l'hiver suivant, en particulier dans les zones à dominante herbagère.

Pour faire face à une pénurie de ressources végétales et combler le déficit pour l'hiver, il convient de préciser l'effet de la sécheresse sur la valeur alimentaire des fourrages et de connaître celle de ressources alimentaires de complément à cette pénurie.

#### **1.1.4.5.1. Valeur alimentaire des ressources en cas de sécheresse et utilisation de ressources alimentaires de complément**

Suite aux travaux de l'INRA sur les systèmes d'alimentation des herbivores (INRA, 1988), les valeurs alimentaires des ressources alimentaires des herbivores sont bien connues, ainsi que celles des fourrages et aliments de complément, dans une moindre mesure, en cas de sécheresse. Ces valeurs alimentaires sont exprimées : pour l'énergie dans le système des UFL ou UFV, pour les valeurs azotées dans le système des PDI, pour l'ingestion volontaire des animaux dans le système des Unités d'Encombrement (UE) et pour les minéraux. (INRA, 1978).

La sécheresse, en ralentissant la croissance de l'herbe, tend à ralentir également la diminution de sa digestibilité comme cela a été montré sur la luzerne (Lemaire et al., 1989). En effet, la vitesse de diminution de la digestibilité de l'herbe au cours d'une repousse est liée à la vitesse de croissance, ainsi tout ralentissement de croissance quelle qu'en soit l'origine, sécheresse ou baisse de température, permet de récolter un fourrage de meilleure qualité. Ceci explique en grande partie que pendant les périodes sèches où la pousse de l'herbe apparaît très ralentie, on a pu constater que les performances des animaux au pâturage pouvaient se maintenir de manière parfois assez surprenante. Bien entendu, en cas de sécheresse prolongée, le maintien des animaux sur les parcelles oblige ces derniers à consommer la base sénescence des tiges au ras du sol, et dans ces conditions la valeur alimentaire de l'ingéré chute. Il est important de noter que la sécheresse provoque un déficit de nutrition azotée aussi bien chez les graminées (Denoix et Lemaire, 1987) que chez les légumineuses (Lemaire et al., 1989). Ainsi, si la digestibilité de l'herbe se maintient relativement bien en situation de sécheresse, il n'en va pas de même de la valeur azotée de l'herbe qui chute fortement dès le début de la sécheresse, bien avant que la croissance de l'herbe ne soit stoppée.

L'utilisation de ressources alimentaires de complément comme l'ensilage de céréales immatures, la paille, les sous-produits de culture, et les drèches et marcs permet de combler le déficit fourrager des systèmes herbagers avec des rations qui ont des qualités très variables. Les tables de valeurs alimentaires de l'INRA permettent de prévoir la valeur alimentaire de ces différents aliments (Tableau 1).

#### **1.1.4.5.2. Plans d'alimentation des animaux**

Le but de cette expertise n'est pas de passer en revue les plans d'alimentation des animaux qui peuvent être mis en place dans les conditions de sécheresse. Ils sont par nature encore plus diversifiés que dans des conditions normales, selon l'état des réserves fourragères récoltées, les aliments de complément disponibles et aussi selon les disponibilités que les éleveurs peuvent mobiliser. Dans le cas où le niveau de réserves fourragères est encore satisfaisant, l'ajustement se réalise principalement par l'augmentation des quantités d'aliments concentrés dans les rations selon les règles classiques d'utilisation. Par contre, dans le cas de pénurie importante de réserves, le recours à des aliments extérieurs (pailles, fourrages pauvres) devient nécessaire en particulier pour les animaux à besoins modérés. Cette situation s'accompagne également d'une augmentation des quantités d'aliments concentrés dans les rations selon le niveau de production des animaux. Au fil des récentes sécheresses, ce sont ces deux possibilités d'ajustement (importation de fourrages pauvres disponibles hors exploitation et achat d'aliments concentrés au sens large) qui ont été mises en œuvre et soutenues auprès des exploitations d'élevage.

**Tableau 1. Valeur alimentaire et utilisation de ressources alimentaires de complément à la sécheresse (INRA, 2006)**

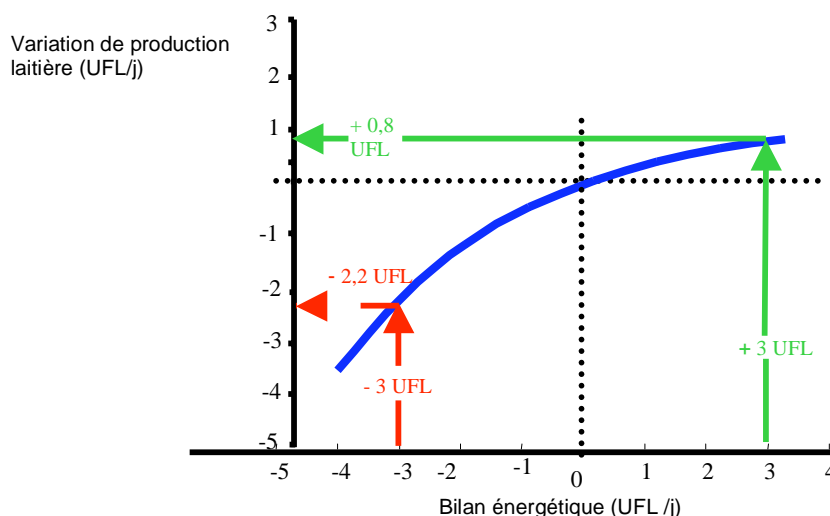
Code INRA	ALIMENT	Energie							Azote		Code INRA	Encombrement			Constituants organiques					Minéraux		Energie	
		%	UF/kg			g/kg		% PDIE		UEM		UE/kg		g/kg / %					g/kg		kcal/kg / %		
			MS	UFL	UFV	PDIA	PDIN	PDIE	LysDI			MetDI	UEL	UEB	MO dMO	MAT dMA	CB dCB	NDF dNDF	ADF dADF	P <sub>abs</sub>	Ca <sub>abs</sub>	EB dE	EM
<b>Ensilage de plantes immatures</b>																							
FE4800	Blé, Hachage fin sans conservateur laiteux-pateux	35,0	0,64 0,22	0,55 0,19	21 7	60 21	60 21	6,71	1,99	FE4800	1,36	1,01	1,01	892 59	98 58	267 47	522 50	313 44	2,6 1,7	4,0 1,6	4280 56	1946	
FE4790	Orge, Hachage fin sans conservateur laiteux-pateux	35,0	0,69 0,24	0,60 0,21	18 6	50 18	58 20	6,67	1,96	FE4790	1,36	1,06	1,10	930 59	81 51	200 29	449 36	249 26	2,3 1,5	3,4 1,3	4511 56	2085	
FV2900	Colza, floraison	13,5	0,76 0,10	0,70 0,09	34 5	94 13	82 11	7,16	2,03	FV2900	1,71	1,23	1,47	846 71	150 79	286 59	505 0	350 0	4,5 3,0	18,0 5,4	3960 68	2161	
FE4750	Mais, Hachage fin sans conservateur Temp. été insuff., récolte + de 55 j. après flor.	24,0	0,85 0,20	0,73 0,18	23 6	65 16	66 16	6,56	1,93	FE4750	1,53	1,17	1,26	944 68	105 59	226 61	477 61	274 57	1,8 1,3	2,0 0,8	4505 65	2417	
FV2860	Choux, cavaliers rouges	14,9	1,04 0,15	1,02 0,15	39 6	108 16	100 15	7,18	1,83	FV2860	0,95	0,98	0,97	880 83	172 81	166 67	348 0	191 0	3,0 2,0	15,0 4,5	4250 80	2862	
FE5580	Tournesol, Hachage fin sans conservateur graine consistante	23,0	0,73 0,17	0,64 0,15	24 6	65 15	56 13	6,51	2,13	FE5580	1,63	1,05	1,10	899 62	105 65	273 46	380 44	291 43	3,0 2,0	13,0 3,9	4590 59	2220	
FE5590	Choux, Hachage fin sans conservateur moelliers et 1/2 moelliers	15,7	1,03 0,16	0,99 0,16	34 5	94 15	79 12	7,12	1,80	FE5590	1,30	1,00	1,00	888 79	157 73	190 73	330 66	205 67	3,0 2,0	13,5 4,1	4510 76	2835	
<b>Pailles</b>																							
FP0020	Paille de Blé, Seule	88,0	0,42 0,37	0,31 0,27	11 10	22 19	44 39	7,24	1,99	FP0020	2,41	1,60	1,80	920 42	35 0	420 50	0 0	0 0	1,0 0,5	2,0 0,0	4340 38	1335	
FP0060	Paille d'Orge, Seule	88,0	0,44 0,39	0,33 0,29	12 11	24 21	46 40	7,36	2,06	FP0060	2,47	1,60	1,80	920 44	38 8	420 54	0 0	0 0	1,0 0,5	3,5 1,4	4300 40	1390	
FP0090	Paille d'Avoine, Seule	88,0	0,50 0,44	0,39 0,34	10 9	20 18	48 42	7,31	2,03	FP0090	2,30	1,55	1,70	910 48	32 0	420 61	0 0	0 0	1,0 0,5	3,5 1,4	4240 44	1509	
FP0100	Paille de Sorgho, Seule	85,0	0,54 0,46	0,43 0,37	14 12	28 24	53 45	6,67	1,94	FP0100	1,77	1,18	1,36	922 50	44 16	326 60	0 0	0 0	1,0 0,5	3,5 1,4	4320 46	1632	
FP0140	Paille de Graminée fourragère	88,0	0,50 0,44	0,39 0,34	26 23	53 47	53 47	6,93	1,86	FP0140	1,54	1,11	1,20	926 48	84 49	400 53	0 0	0 0	1,0 0,5	3,0 1,2	4340 44	1543	
FP0150	Paille de Féverole, Seule	87,0	0,45 0,39	0,34 0,30	15 13	31 27	51 44	7,52	1,73	FP0150	1,74	1,17	1,33	924 45	49 12	479 47	0 0	0 0	1,0 0,5	5,0 2,0	4200 41	1385	
<b>Cannes de Mais</b>																							
FP0170	Fraîche	52,4	0,60 0,31	0,51 0,27	15 8	30 16	60 31	7,31	1,83	FP0170	2,07	1,30	1,30	914 57	48 10	310 64	0 0	0 0	1,5 0,8	3,0 1,2	4160 53	1806	
FP0180	Ensilées	31,0	0,61 0,19	0,51 0,16	15 5	38 12	46 14	7,17	1,75	FP0180	2,50	1,00	2,00	907 57	66 42	337 65	0 0	0 0	1,5 0,8	3,0 1,2	4200 53	1800	
<b>Co produits</b>																							
CF0170	Pulpe de betterave déshydratée	89,1	0,99 0,89	0,98 0,87	41 37	66 59	109 97	7,98	1,99	CF0170				923 84	91 71	194	454	231	1,0 0,9	14,8 3,0	4060 81	2697	
FR0120	Pulpes de betteraves ensilées	22,0	1,01 0,22	0,99 0,22	28 6	60 13	84 18	7,95	2,00	FR0120	1,63	1,05	1,05	912 86	98 55	206 77	0 0	0 0	1,0 0,9	13,0 2,6	4010 82	2739	
FR0100	Feuilles et collets de betteraves propres	13,0	0,87 0,11	0,85 0,11	32 4	100 13	87 11	6,94	1,81	FR0100	0,75	0,80	0,80	803 82	164 72	95 75	0 0	0 0	2,5 1,8	10,0 2,0	3730 79	2514	
CS0200	Drèches d'orge de brasserie déshydratées	91,9	0,82 0,76	0,73 0,67	137 126	194 178	171 157	5,17	1,64	CS0200				958 61	262 70	167 0	574 0	222 0	6,3 4,9	2,3 1,3	4900 62	2395	
CF0120	Marc de raisin	91,8	0,31 0,28	0,19 0,17	18 16	32 29	27 25	6,42	1,94	CF0120				909 30	142 49	244 0	622 0	524 0	3,1 2,2	8,5 3,4	4505 28	1004	
<b>Co produit d'origine animale</b>																							
CA0010	Lactosérum	6,2	1,15 0,07	1,18 0,07	0 0	74 5	77 5	7,76	2,10	CA0010				885 94	129 90	0 0	0 0	0 0	10,0 9,0	19,0 14,3	3870 92	2989	

Les recommandations des différents organismes d'appui aux éleveurs (Institut de l'élevage, Chambres régionales ou départementales d'agriculture...) ont proposé des recommandations d'alimentation adaptées aux systèmes d'élevage rencontrés et aux zones concernées (Institut de l'Élevage, 1997, 2003 ; Réseaux d'Élevage Charolais, 2003). Les tables de la valeur des aliments et des apports recommandés pour les animaux permettent de raisonner ces plans d'alimentation (INRA, 1988, 2006). Les logiciels d'établissement des rations, maintenant disponibles sur différents outils informatiques, facilitent ces calculs et ajustements (INRA, 2006).

### 1.1.4.5.3. Adaptation des animaux et des troupeaux aux conditions de sécheresse

En cas de pénurie des ressources, il est possible de placer l'animal en situation de sous-alimentation ou de sous-nutrition (principalement sur le plan énergétique) par rapport à un niveau de production maximum ou optimum. Cette situation se traduit en général par une baisse à court terme des productions, mais également par la mise en place de processus adaptatifs de la part de l'animal, que l'éleveur peut utiliser dans ces situations de pénurie. Ces processus se manifestent à des pas de temps différents : à court terme, chute des performances, modifications de la nature et de la qualité des produits..., à moyen terme, mobilisation et reconstitution des réserves corporelles de l'animal... et à plus long terme, altération du processus de reproduction, mise en place de phénomènes de compensation (croissance compensatrice), voire modification de la carrière productive de l'animal.

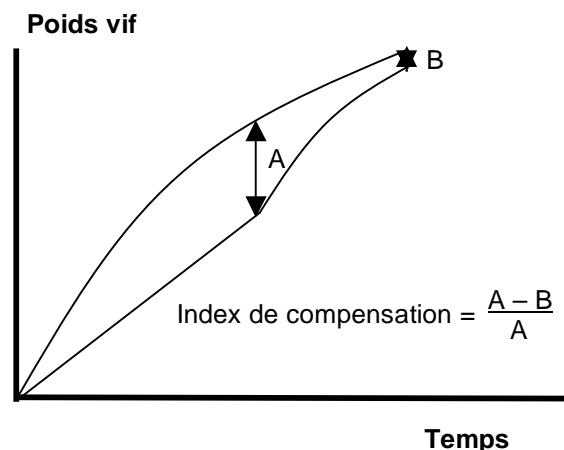
La **sous-alimentation** a des incidences zootechniques et économiques beaucoup plus importantes pour les animaux à fort niveau de production (femelles herbivores en lactation) que pour les autres catégories d'animaux, qui se concrétisent par une baisse de production. L'effet dépressif d'une sous-alimentation va dépendre de la période de lactation, du potentiel de production et de l'état des réserves corporelles de l'animal. L'effet de la sous-alimentation des femelles est plus marqué en début de lactation (Coulon et Rémond, 1991 ; Peyraud, 2003). Dans le cas d'une sous-alimentation modérée (besoins couverts à 80-90%) de 4 à 11 semaines post-partum chez la femelle en lactation (vache, brebis), la diminution d'énergie exportée dans le lait est moindre que la baisse des apports en énergie (Figure 3). En effet, l'énergie des réserves corporelles mobilisée contribue pour plus de 30% aux exportations d'énergie dans le lait. Lorsque la sous-alimentation est maintenue sur une longue période, l'exportation d'énergie diminue et s'ajuste sur les apports énergétiques. Ainsi, les capacités adaptatives permises par les réserves corporelles diminuent au cours de la lactation. Enfin, ces capacités d'adaptation permises par la mobilisation des réserves diminuent lorsque les animaux sont sous-alimentés sur plusieurs lactations successives (Chillard, 1992). Ainsi, à moyen terme, l'impact d'un niveau de sous-alimentation donné va différer selon l'état physiologique de l'animal et selon son état corporel (niveau des réserves) au moment où il subit cette restriction alimentaire.



**Figure 3.** Effet d'une variation des apports énergétiques sur la variation de la production laitière, exprimée en énergie nette (UFL) ingérée et exportée dans le lait chez la vache laitière (Coulon et Rémond, 1991).

Selon le même phénomène, on considère que la femelle herbivore allaitante compense au moins en partie les déficits nutritionnels momentanés, qu'elle récupère ensuite en période d'alimentation libérale. C'est la notion habituelle de "tampon" qui se traduit par des variations repérables de poids, qui peuvent atteindre environ 18-20% du poids moyen de l'animal. Ce volant de réserves corporelles est surtout constitué de dépôts adipeux (lipides) et d'un peu de muscles. Ainsi, pour en situer l'ampleur, la différence de poids des dépôts adipeux atteint environ 110 kg entre une femelle bovine allaitante non gestante très maigre de grand format et le même type d'animal très en état (grasse). Ce sont les dépôts adipeux sous-cutanés et internes, dont les variations relatives sont les plus importantes, qui assurent ce tampon. Ce point indique l'importance de la note d'état corporel (note de 0 à 5), indicateur de l'état des animaux estimé directement sur l'animal par des maniements cutanés. Ainsi, ces variations de composition corporelle correspondent essentiellement à des variations des quantités de lipides atteignant en moyenne environ 30 kg, soit 40 à 45 kg de variation apparente de masse corporelle. Lorsque ces réserves sont mobilisées, elles le sont efficacement, avec un rendement énergétique élevé par rapport à l'énergie alimentaire ingérée. Ainsi on estime, chez les vaches allaitantes adultes, le rendement à 4,5-6 UFL par kg de mobilisation de masse corporelle, soit l'équivalent de 8 à 13 kg d'ingestion par jour d'un fourrage de qualité moyenne (Petit et al., 1993 ; Agabriel et Doreau, 2003).

Par la suite, des réponses d'adaptation de **compensation ou de récupération** sont observées lorsqu'une période de réalimentation relative succède à une phase de restriction plus ou moins durable et sévère. L'exemple le plus classique de récupération est celui de la croissance (fonction prioritaire chez l'animal) compensatrice que l'on observe, par exemple, lors d'un retour à une alimentation non limitante (pâturage...) succédant à une période de restriction alimentaire, le plus souvent hivernale (Figure 4).



**Figure 4.** Phénomène de croissance compensatrice :  
évolution des poids vifs lors d'une croissance continue ou discontinue.  
L'index de compensation est calculé à partir de l'écart de poids  
entre les deux types de croissance, avant et après la période de compensation.

Les adaptations digestives et métaboliques mises en jeu dans cette période de récupération sont effectives à très court terme, ce qui témoigne de la réactivité de l'organisme à s'adapter à une pénurie alimentaire ou à mettre à profit un changement du statut nutritionnel. La réponse compensatrice des animaux, à la suite d'une restriction alimentaire, varie principalement selon la durée et la sévérité de la restriction subie et des caractéristiques de l'animal (âge physiologique principalement, précocité...). La compensation s'effectue par le biais de plusieurs mécanismes digestifs, métaboliques et hormonaux (Tableau 2) qui aboutissent à une augmentation du gain de poids et au rétablissement de l'état corporel en comparaison avec un organisme en croissance continue (Hoch et al., 2003). Les dépenses énergétiques réduites pendant la phase de restriction restent relativement basses lorsque les apports alimentaires augmentent. Lorsque le système digestif a retrouvé son potentiel, l'ingestion est accrue par rapport à celle d'animaux ne compensant pas. Sous la dépendance de nombreux signaux

hormonaux synergiques, l'ensemble du métabolisme s'oriente vers une accréation protéique accrue. Au terme de cette période de croissance compensatrice complète, par exemple à même poids vif pour les bovins en croissance, les animaux présentent les mêmes caractéristiques d'état corporel et de composition du corps entier.

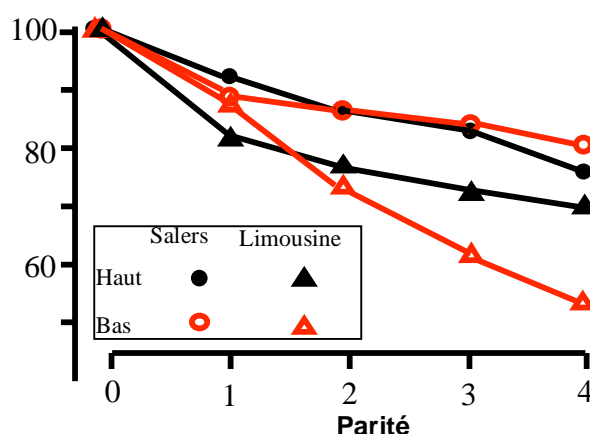
**Tableau 2.** Adaptations métaboliques et endocriniennes à la restriction alimentaire et à la réalimentation consécutive (croissance compensatrice) chez les ruminants

Métabolites / Hormones	Restriction	Réalimentation	Durée d'adaptation
Acides gras libres	↗	↘	Quelques jours
Corps cétoniques	↗	↘	Quelques jours
Glucose	↘	↗	Quelques jours
Urée	↘	↗	Quelques jours à quelques semaines
Insuline	↘	↗	Quelques jours
Insulin-Growth factor (IGF-1)	↘	↗	Quelques jours
Growth hormone (GH)	↗	↘	Quelques semaines
Glucocorticoïdes	↗	↘	Quelques jours
Hormones thyroïdiennes (T3-T4)	↘	↗	1 à 2 semaines
<b>Métabolismes</b>			
Dépenses énergétiques	↘	↗	Quelques jours à quelques semaines
Synthèse protéique musculaire	↘	↗	Quelques jours à quelques semaines
Protéolyse musculaire	↘	↗	Quelques jours à quelques semaines

Le processus de compensation ou de "rebond" a également été mis en évidence chez les femelles adultes au cours de leur cycle de production : brebis à l'entretien ou en lactation, vaches et chèvres en lactation (Atti et Bosquier, 1999 ; Chillard et al., 1983). Il intervient aussi bien sur les activités lipogéniques du tissu adipeux que sur les quantités de lipides déposés. Il est susceptible d'induire des écarts de bilans alimentaires totaux non négligeables (188 UFL vs 156 UFL) entre une stratégie alimentaire stabilisée chez la brebis, correspondant à la satisfaction des besoins des animaux, et une stratégie dynamique, mettant en jeu une période de sous-alimentation (20-40% des besoins) puis une ré-alimentation (130-150% des besoins) (Atti et Bocquier, 1999). Les processus d'épargne et de récupération des tissus musculaires adipeux lors de la sous-alimentation et de la ré-alimentation sont cependant plus ou moins efficaces selon l'espèce, la race ou l'âge de l'animal. Ainsi, la brebis rustique (Barbarine) est capable de moduler très finement la mobilisation des tissus adipeux et leur reconstitution pendant la ré-alimentation. Sa particularité est de pouvoir reconstituer intégralement la perte de masse musculaire. A contrario, chez la vache laitière adulte tarie non gravide subissant des niveaux alimentaires variables au cours du temps, les dynamiques des dépôts lipidiques et protéiques diffèrent lors des phases de ré-alimentation et se caractérisent par un accroissement très important des tissus adipeux alors que la reprise de masse musculaire reste très limitée (Robelin et al., 1990).

Chez la femelle bovine allaitante, des différences adaptatives à la sous-nutrition et à la compensation apparaissent entre génotypes. Par exemple durant la période hivernale, la sous-alimentation n'a pas d'effet sur la production laitière moyenne de vaches rustiques Salers, tandis qu'elle affecte celle des vaches à viande spécialisée Limousines (D'Hour et al., 1995). Les différences de profils de réponse entre ces deux génotypes peuvent s'interpréter par des réserves adipeuses plus importantes (maturité atteinte grâce à une précocité plus élevée) chez les Salers, et encore par des ingestions plus élevées au pâturage permettant de constituer des réserves corporelles conséquentes. Concernant la fonction de reproduction, les vaches Salers apparaissent également moins sensibles à la sous-alimentation. En effet, l'écart d'anoestrus post-partum entre des animaux correctement et sous-alimentés est plus long chez les vaches spécialisées Limousines. Enfin sur le long terme au niveau de la carrière productive de la vache, une différence de capacité adaptative s'amorce. Elle se répercute directement sur le taux de survie des vaches (Figure 3) qui résulte de la politique de réforme basée sur la sortie des femelles vides et pratiquée dans ces systèmes de bovins allaitants (échec à la reproduction pour une période donnée de reproduction).

Nombre de vaches (%)



**Figure 5.** Evolution du taux de survie des vaches Salers et Limousines conduites selon une modalité alimentaire correcte ou de sous-alimentation hivernale (D'Hour et al., 1995).

La fonction de reproduction est la composante animale clé des systèmes d'élevage d'herbivores et une des plus sensibles aux modifications de milieu (sous-alimentation, chaleur...). Les relations entre l'état nutritionnel de la femelle et la fonction de reproduction sont dynamiques. Les besoins pour la reproduction *stricto sensu*, fécondation et ovulation, sont pratiquement négligeables. En revanche, l'initialisation de la gestation est lourde en conséquences pour la survie de la femelle si les apports alimentaires et/ou si les réserves corporelles sont insuffisantes. En effet, ses besoins vont s'accroître au cours de la gestation et, surtout, après l'enclenchement de la lactation.

Ainsi, en pratique, dans les systèmes d'élevage d'herbivores soumis à la sécheresse et à une sous-alimentation notoire non compensée par des apports extérieurs, on peut s'attendre à davantage d'hétérogénéité des performances productives et à un étalement dans le temps de mécanismes de reproduction. On peut ainsi considérer que l'étalement de la reproduction constitue une forme collective d'adaptation puisque des événements nutritionnels sérieux (sécheresse par exemple) n'affecteront pas l'ensemble des individus de la même façon, améliorant ainsi globalement la longévité du potentiel de production considéré à l'échelle du troupeau.

#### 1.1.4.6. Adaptation régionale des systèmes d'élevage d'herbivores aux conditions de sécheresse

##### 1 1461 Les solutions aux crises fourragère au niveau national.

Chaque sécheresse d'ampleur nationale relance la question sur les disponibilités fourragères nécessaires, sinon pour la survie du cheptel, du moins pour le maintien des performances suffisantes des exploitations qui n'entraînent pas des baisses drastiques de revenu (Pflimlin, 1997). En effet, la sécheresse de 1959 avait entraîné une forte baisse de la production avec pour conséquence une importation de lait de consommation, alors que celle de 1976 avait permis de diminuer notablement les excédents de beurre et de poudre de lait au niveau européen (Pflimlin, 1997). La sécheresse de 1976 a été d'une ampleur exceptionnelle du fait qu'elle a débuté relativement tôt au printemps (Marion et al., 1977) ; son impact sur la production d'herbe et donc sur les élevages qui en dépendent le plus a donc été maximisé. Rétrospectivement, une majorité d'éleveurs avaient pu maintenir leur cheptel et leur capacité de production grâce notamment à trois ressources : la paille, les céréales à prix réduit et les concentrés (Pflimlin et al., 1977). Ces auteurs ont estimé les besoins en fourrages au niveau national d'après les effectifs animaux de 1995, soit environ 85 millions de tonnes de MS à raison de 5 tonnes par UGB.

**Tableau 3.** Surfaces et productions fourragères en année dite "normale" au niveau national (d'après Pflimlin et al. 1997).

	Surfaces (millions ha)	Production totale (Millions t MS)
Surfaces toujours en herbe	10,5	44
Prairies temporaires	3	24
Fourrages annuels (maïs...)	1,65	15
Paille et co-produits		2
Total	15,15	85

Cette fourniture de fourrage grossier implique une complémentarité d'environ 10 millions de tonnes de concentrés du commerce ou de céréales autoconsommées. Ainsi pour un besoin en année "normale" de 85 millions de tonnes de matière sèche de fourrage, une sécheresse du type de celle de 1976 aurait impliqué un déficit d'environ 19 millions de tonnes. Les auteurs considèrent que dans de telles conditions de pénurie fourragère, il serait nécessaire de mobiliser environ 10 millions de tonnes de fourrages supplémentaires.

A ces 10 millions de tonnes de fourrages de substitution devrait être alloués environ 5 millions de tonnes de concentrés supplémentaires afin d'équilibrer les rations. Ainsi les 19 millions de tonnes de MS de déficit fourrager pourraient être couverts à hauteur de 15 millions de tonnes, les 4 millions restants, soit 5% du bilan total, correspondant à la marge d'erreur ou au gaspillage habituel. Les auteurs de cette étude notent que les solutions décrites dans le tableau 4 paraissent accessibles tant en tonnage qu'en surface, à condition qu'il y ait une forte mobilisation et une solidarité tant entre céréaliers et éleveurs qu'entre régions qui sont différemment touchées.

**Tableau 4.** Surfaces et productions fourragères de substitution mobilisable en année de pénurie (d'après Pflimlin et al., 1997).

Ressources	Tonnages (Millions de tonnes)	Surfaces (Millions d'ha)
Paille	4	1
Céréales immatures	1	0,12
Conversion de maïs grain en ensilage	2	0,20
Cannes de maïs	0,5	0,20
Fanes de pois	0,5	0,50
Cultures dérobés	2	1
Total	10	3,02

#### 1.1.4.6.2. Quelques exemples d'adaptation régionale

D'une manière générale, dans **les régions de polyculture-élevage** où la céréaliculture co-habite avec l'élevage, la sécurité fourragère est assurée par les cultures à double fin grain et ensilage sur maïs et céréales d'hiver. Cette sécurité peut être réalisée soit au niveau de l'exploitation d'élevage elle-même, soit au niveau local par contrat avec des exploitations voisines.

Dans les **régions purement herbagères**, l'abandon des cultures céréalières complémentaires ne permet plus d'utiliser cette source de flexibilité. La sécurité de ces systèmes requiert une avance de stock de foin équivalent à un demi hiver (Pflimlin, 1997). En situation de pénurie exceptionnelle, le recours à l'achat de paille devient nécessaire. Des plans d'approvisionnements en paille peuvent se mettre en place au niveau régional.

Dans les **zones pastorales du Sud**, des éléments de flexibilité sont à rechercher dans une exploitation plus ou moins complète de ressources fourragères pérennes dans les parcours, landes et sous-bois.

#### Cas des systèmes d'élevage intensifs du Grand Ouest

Cette région est soumise à des déficits hydriques estivaux chroniques, notamment à l'intérieur d'un triangle Le Mans, Lorient, La Rochelle. Les systèmes naisseurs-engraisseurs relativement intensifs avec des chargements élevés sont en général fortement impactés par la sécheresse, les rendements du

maïs ensilage étant très fluctuants en absence d'irrigation. La mobilisation des ressources en céréales apparaît donc comme la source de sécurité la plus mobilisable. Pour les élevages laitiers, les systèmes de vèlage d'automne apparaissent comme les plus adaptés, les vaches taries pouvant aisément être alimentées par des rations de paille + concentrés. La solution des ensilages de céréales immatures est cependant souvent préférable. Dans ces conditions, l'implantation de cultures dérobées après les premiers orages d'été peut permettre un pâturage prolongé à l'automne et une économie de stocks. Mais parfois les sécheresses de fin d'été et d'automne ne permettent pas de mettre cette solution en œuvre. Le recours à l'irrigation du maïs apparaît comme une solution d'assurance sécheresse, mais une telle solution ne peut pas être généralisée dans des régions où la ressource est fortement limitée. Des adaptations possibles des systèmes fourragers seront discutées dans le Chapitre 2.2.

### Cas des zones herbagères du Centre de la France

La plupart des régions herbagères d'élevage du Centre de la France ont été atteintes par les dernières sécheresses. En 2003, la situation a été particulièrement difficile pour la Bourgogne, le Centre, l'Auvergne et l'Ouest de Rhône-Alpes (Institut de l'Élevage, 2003b). Par contre, 2005 fut plus délicat pour les zones de moyenne montagne du Massif Central, bien que réputées humides, avec de très fortes variations selon la localisation et l'altitude. Dans ces régions, globalement, la première fauche d'herbe peut être notablement réduite (50%) en cas de début de printemps particulièrement froid puis sec ensuite. Dans les zones de plus faibles altitudes, les repousses sont très faibles ou inexistantes et utilisées dans ce cas à l'accroissement des surfaces de pâturage d'été et d'automne. La production de maïs ensilage, où elle est possible, peut être également atteinte par de mauvaises levées et par manque d'eau à la fécondation et ensuite..., sauf irrigation qui demeure limitée dans ces systèmes d'élevage.

L'analyse des données, à partir des Réseaux d'Élevage en 2003, met en évidence des situations et des stratégies d'adaptation des élevages très diverses selon les caractéristiques des troupeaux, de la perception et la réactivité des éleveurs, de leur situation technique et financière... Deux situations extrêmes peuvent être retenues. D'une part, les élevages qui disposent le plus souvent de stocks fourragers de sécurité ou de prévoyance. Ces stocks sont mobilisés dès que besoin en cas de sécheresse (juillet...). Les achats extérieurs ou les réservations sont assurés tôt et l'alimentation des troupeaux est couverte jusqu'au printemps suivant. Les productions animales sont assez peu affectées et les ajustements nécessaires se réalisent sur le type d'animal retenu et sur les ventes (mise en marché de vaches vides ou en surnombre, broutards initialement destinés à la repousse sur l'exploitation). Cette situation est loin d'être généralisée et semble difficile à tenir (agrandissement des exploitations et du nombre d'animaux présents, et surtout effet réitératif et cumulatif de cette situation de sécheresse au fil des ans). À l'opposé, de nombreux élevages ne disposent pas de ces stocks d'avance et leur situation financière ne permet pas d'envisager ou d'anticiper des achats de fourrages ou d'aliments de substitution. Cette situation peut se traduire par une décapitalisation importante à partir d'animaux mal préparés. L'autre possibilité est de conserver le troupeau avec une forte restriction des apports alimentaires qui se traduit, au-delà d'une certaine limite, par des contre-performances de production (reproduction...) et de santé animale. Des propositions ont été formulées dans ce cas, si le déficit fourrager estimé est inférieur à 20% par rapport à des conditions normales de récolte, il peut être couvert par une sous-alimentation du troupeau et par l'apport d'aliments concentrés, prélevés ou achetés pour les animaux les plus exigeants. Si ce déficit est supérieur à cette borne, il est nécessaire d'avoir recours en plus à l'achat de fourrages adaptés à la conduite du troupeau.

Dans ces zones où l'utilisation des fourrages (herbe surtout) par les animaux prédomine, la sécheresse se traduit par une recherche de fourrages de complément puis d'aliments de substitution (céréales, aliments concentrés...). La paille est le fourrage grossier qui est mobilisé en priorité, soit à la place de la litière sur l'exploitation, soit localement (Département...) ou à l'échelle du territoire national ou européen (1976 s'est traduit par la mise en mouvement de 4 millions de tonnes). Pour les éleveurs de ces zones, la paille est réservée aux bovins à forte capacité d'ingestion, vaches et génisse de 2 ans et plus. Les jeunes destinés à l'élevage ne reçoivent des rations à base de paille qu'en dernier recours et compensées par un apport supplémentaire d'aliments concentrés. Enfin dans le cas de bovins en finition, les régimes paille et céréales peuvent être mobilisés, ce qui présente l'avantage de libérer les autres ressources fourragères disponibles pour l'alimentation du troupeau souche (ensilage de maïs,

par exemple si disponible...). Une équivalence pratique a été mise en place sur la zone Charolaise : 10 kg de foin utilisés en année normale sont substitués par 7 kg de paille consommés plus un mélange d'aliments concentrés (céréales, tourteaux ou autres graines...). Ainsi, par exemple, au niveau de l'exploitation, un déficit de 10 tonnes de foin se résorbe par 7 tonnes de paille, 22 quintaux de céréales et 600 kg de tourteau de soja. D'autres fourrages grossiers ont été utilisés marginalement, cannes et spaths de maïs, foin médiocres, pailles de pois, de lin, fanes de lentilles... Dans les zones appropriées, le transfert du maïs grain vers l'ensilage a été une solution mise en oeuvre dans un contexte de sécheresse. Cependant dans ce cas, l'avancement rapide de l'état de végétation du maïs (>35% de MS) limite cette possibilité et les surfaces pouvant être mobilisées (Sud-Ouest). Cette possibilité se raisonne également selon le prix d'achat du maïs grain sur pied en complément des frais de récolte, de transport et les pertes à la conservation. Cette solution concerne principalement les élevages laitiers limitrophes à la culture du maïs. Des transferts de maïs épis ou de maïs grain humide ensilé vers les régions d'élevage sont signalés.

#### Analyse économique dans le Charolais (P. Veysset, Etude LEE, INRA Theix)

Fortement touchés par la sécheresse printanière et estivale de 2003, les éleveurs de bovins allaitants charolais des zones herbagères et polyculture-élevage des bordures nord et ouest du Massif Central, ont eu massivement recours à des achats de paille et d'aliments concentrés pour alimenter leurs animaux. Les observations réalisées par le Laboratoire d'Economie de l'Élevage (INRA Clermont-Theix) sur un échantillon constant de 83 exploitations sur les années 2002 à 2004 (Veysset et al., 2005), montrent que la sécheresse n'a pas affecté les résultats de productivité des troupeaux. Sur les trois années, les taux de gestation des vaches, de mortalité des veaux et de productivité numérique ne sont pas significativement différents. La productivité en viande, mesurée par le critère kg de viande vive produits par unité gros bovins (UGB), de 2003 est identique à celle de 2002 (305 kg/UGB), on observe même une augmentation de 2% en 2004.

Les éleveurs ont pallié le manque de fourrages par une distribution plus importante de concentrés et par des achats d'aliments grossiers au cours de l'été 2003 et de l'hiver 2003/2004. La consommation de concentrés moyenne des troupeaux a augmenté de 22% entre 2003 et 2002 (+140 kg/UGB) et 7% (+44 kg/UGB) entre 2004 et 2002 ; ces concentrés supplémentaires proviennent pour 65% d'achat et pour 35% d'autoconsommation des céréales de l'exploitation (d'où un moindre volume de vente de céréales). Ces consommations de concentrés et les achats de fourrages représentent une charge supplémentaire de 34 €/UGB en 2003 et 12 €/UGB en 2004, comparé à 2002. Les autres charges du troupeau varient peu, alors que les charges de la surface fourragère progressent de 15% (+11 €/ha) en 2004, pour maximiser les récoltes de fourrages et reconstituer les stocks fourragers. Cet événement climatique ne semble pas avoir eu d'incidence sur le profil de vente des animaux, les brouards ont été vendus à un âge identique aux années précédentes (mais les contraintes d'âge pour l'attribution de la prime spéciale bovins mâles obligent les éleveurs à conserver les animaux 9 mois), il n'y a pas eu d'anticipation des ventes afin de décharger l'exploitation ; le pourcentage d'animaux engraisés (mâles et femelles) a régressé en 2004, mais ceci est à mettre en relation avec une conjoncture de prix favorable au maigre fin 2003 et 2004.

Globalement la sécheresse 2003 s'est traduite par une augmentation des charges du troupeau de 22% (+40 €/UGB) en 2003 et de 7% (+13 €/UGB) en 2004. A ce chiffrage économique il faudrait rajouter le travail supplémentaire pour affourager et abreuver (la canicule a eu un effet sur les disponibilités en eau) les animaux. Des aides exceptionnelles sécheresses ont permis aux éleveurs d'absorber cette hausse de charges ; ces aides ont même plus que compensé les dépenses supplémentaires puisqu'elles se montent en moyenne à 88 €/UGB. Cette sécheresse, couplée aux fortes gelées de janvier 2003, a entraîné une chute de 32% du rendement des céréales, non compensée par des aides spécifiques, d'où une baisse de 10% de la marge brute des cultures par hectare. Au final, les aides sécheresses n'ont pas entièrement compensé les charges alimentaires supplémentaires et la baisse de marge des cultures, le revenu moyen par travailleur a baissé de 8% en 2003 par rapport à 2002. Cette baisse de revenu est plus importante pour les exploitations ayant une plus forte part de culture dans leur surface (-15% pour les exploitations à plus de 30% de culture). Les exploitations à faible chargement (inférieur à 1,05 UGB/ha de surface fourragère), n'ont pas subi de baisse de revenu. Ces exploitations ont eu recours à

une distribution de concentrés supplémentaire dans les mêmes proportions que les autres, mais elles n'ont quasiment pas acheté de fourrages en 2003/2004 ; leur faible chargement leur a permis de stocker de l'herbe sur pied et d'être autosuffisantes en fourrage. Cette herbe sèche de mauvaise qualité explique le recours aux concentrés, mais globalement les charges du troupeau n'augmentent que de 15% en 2003 et de seulement 3% en 2004 par rapport à 2002.

Face à une sécheresse ponctuelle, les éleveurs du bassin allaitant charolais ont pallié le manque de fourrage par des achats afin de maintenir la productivité du troupeau, le produit bovin est maintenu au prix de charges supplémentaires, il n'y a pas eu d'adaptation du système de production. Cependant, après une bonne année fourragère 2004, 2005 a été marquée par une nouvelle sécheresse estivale et automnale. Si les sécheresses ne deviennent plus des événements ponctuels, certains éleveurs réfléchissent à une adaptation du système en profondeur. Une première réponse serait une baisse du chargement pour adapter la taille du troupeau aux ressources fourragères de l'exploitation, cette extensification se fera certainement par agrandissement de la surface totale pour ne pas pénaliser la production de viande. D'autres voies seront à explorer telles que la modification des dates de vêlages, la gestion des stocks fourragers (report), les cultures fourragères et/ou dérochées à pousse rapide sur une courte période, le type d'animaux produits (avec le découplage de la prime bovins mâles, l'âge à la vente ne sera plus une contrainte), mais les rapports de prix et donc l'orientation du marché restent des signaux forts pour la décision des éleveurs.

## Références bibliographiques

- Agabriel J., Doreau M., (2003). Sécheresse 2003 : Conséquences sur les performances ; cas des troupeaux allaitants. Unité de Recherche sur les Herbivores, INRA. 5p.
- Andrieu N., Duru M., Coléno F., Osty P.L. (2006). Flexibilité de la gestion des ressources fourragères et pastorales permises par l'organisation du système fourrager. In: *Flexibilité et changements dans les exploitations d'élevage*. B. Dedieu, E. Chia, C. Moulin, M. Tichit (Eds), à paraître.
- Armas C. et Pugnaire L. (2004). Plant interactions govern population dynamics in a semi-arid plant community. *Journal of Ecology*, 92, 568-576.
- Atti J., Bocquier F., (1999). Adaptation des brebis Barbarine à l'alternance sous-nutrition et réalimentation : effets sur les tissus adipeux. *Annales de Zootechnie*, 48, 189-198.
- Aubry C., Papy F., Capillon A. (1998). Modelling decision making processes for annual crop. *Management. Agricultural Systems*, 56, 45-65.
- Borneman J., P.W. Skroch, K.M. O'Sullivan, J.A. Palus, N.G. Rumjanek, J.L. Jansen, J. Nienhuis, and E.W. Triplett (1996). Molecular microbial diversity of an agricultural soil in Wisconsin. *Applied and Environmental Microbiology*, 62: 1935-1943.
- Briske D.D., S.D. Fuhlendorf, and F.E. Smiens (2003). Vegetation dynamics on rangelands : a critique of the current paradigms. *Journal of Applied Ecology*, 40: 601-614.
- Briske D.D., S.D. Fuhlendorf, and F.E. Smiens (2005). State-and-transition models, thresholds, and rangeland health: a synthesis of ecological concepts and perspectives. *Rangeland Ecology & Management*, 58:1-10.
- Buckland S.M., and J.P. Grime (2000). The effects of trophic structure and soil fertility on the assembly of plant communities: a microcosm experiment. *Oikos*, 91: 336-352.
- Chatelin M.H., Aubry C. (1993). Pilotage de la production et aide à la décision stratégique. *Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales*, 28 : 119-138.
- Chiller Y., Rémond B., Sauvant D., Vermorel M. (1983). Particularités du métabolisme énergétique des vaches à haut potentiel de production. *Bulletin Technique CRZV de Theix*, 53, 37-64.
- Chillard Y. (1992). Physiological constraints to milk production: factors which determine nutrient partitioning, lactation persistency and mobilization of body reserves. *World Review of Animal Production*, 19-26.
- Coléno F.C., Duru M. (1998). Gestion de production de systèmes d'élevage utilisateurs d'herbe : une approche par atelier. *Etudes et Recherches sur les Systèmes agraires et le Développement rural*, 31: 45-61.
- Coulon J.B., Rémond B., (1991). Variations in milk output and milk protein content in response to the level of energy supply to the dairy cow : a review. *Livestock production Science*, 29, 31-47.
- Cros M.J., Duru M., Garcia F., Martin-Clouaire R. (2004). Simulating management strategies: the rotational grazing example, *Agricultural Systems*, 80, 23-42.

- Davies M.A., Grime P., Thompson K. (2000). Fluctuating resources in plant communities : a general theory of invisibility. *Journal of Ecology*, 523
- D'Hour P., Petit M., Pradel P., Garel J.P., (1995). Evolution du poids et de la production laitière de vaches Salers et Limousine dans deux milieux. *Rencontres Recherches Ruminants*, 2, 105-108.
- Duru M., Charpentreau J.L. (1981). Working on the farming systems in the Pyrenees. Elaboration of a model of constitution and utilization of hay stock. *Agricultural Systems*, 7, 137-156.
- Duru M., Coléno F.C., Gibon A. (1998). Systèmes d'élevage et aléas climatiques : une approche par modélisation. *Symposium Systèmes d'Elevage et Aléas Climatiques en Milieu méditerranéen*. Agadir (Maroc) 11/98, 329-338.
- Duru M., Nocquet J., Bourgeois A. (1988). Le système fourrager : un concept opératoire ? *Fourrages*, 115: 251-272.
- Eldin M. (1989). Analyse et prise en compte des risques climatiques pour la production végétale. In : *Le risque en Agriculture*. ORSTOM : 47-62.
- Fleury P., Duboeuf B. (1996). Forage management in dairy farms: a methodological approach. *Agricultural Systems*, 52:199-212.
- Gateau C., Novak S., Kockmann F., Ruget F., Granger S. (2006). Evaluation du potentiel herbager et de sa variabilité en élevage allaitant. Régionalisation de la démarche ISOP en Saône-et-Loire. *Fourrages*, 186, 257-269.
- Hoch T., Begon C., Cassar-Malek I., Picard B., Savary-Auzeloux I., (2003). Mécanismes et conséquences de la croissance compensatrice chez les ruminants. *INRA Productions Animales*, 16, 49-59.
- Ingram K.T., Roncoli M.C., Kirshen P.H. (2002). Opportunities and constraints for farmer of West Africa to use seasonal precipitation forecasts with Burkina Faso as a case study. *Agricultural Systems*, 74:331-349.
- INRA (1978). Alimentation des ruminants. R. Jarrige (ed). INRA, Actualités scientifiques et agronomiques. INRA Editions, Versailles. 597p.
- INRA (1988) Alimentation des bovins, ovins et caprins. R. Jarrige (ed). INRA, Paris. 471p.
- INRA (2006). Alimentation des bovins, ovins et caprins. Principes de rationnement. Besoins des animaux. Tables des aliments. INRA (sous presse).
- INRA 4.0 (2007). Logiciel de rationnement pour bovins, ovins et caprins. Educagri éditions.
- Institut de l'Elevage (2003a). *Sécheresse : gérer les risques*, Etude, 124 p.
- Institut de l'Elevage (2003b). Gérer l'après sécheresse : les solutions techniques pour faire face au déficit fourrager. Institut d'Elevage. Bulletin – septembre 2003. 20 p.
- Jacobsen B.H., Petersen B.M., Berntsen J., Boye C., Sorensen C.G., Soogard H.T., Hansen J.P. (1998). An integrated economic and environmental farm simulation model (FASSET , Report N° 102). Danish Institute of Agricultural and Fisheries Economics, Copenhagen, Denmark.
- Jager W. (1998). *Quelles relations entretenons-nous avec nos modèles ?* Edition CIRAD.
- Jarrige R. (ed). Alimentation des ruminants en période de pénurie. *Bulletin Technique CRZV de Theix*, INRA, 25, P-65.
- Jeannin B., Humbert L., Teilhard de Chardin B., Lemaire G., Laissu R. (1977). Le comportement des prairies et des cultures fourragères vis à vis de la sécheresse de 1976. *Bulletin Technique d'Information*, 324-325
- Lemaire G., Salette J. (1982). The effects of temperature and fertilizer nitrogen on the spring growth of tall fescue and cocksfoot. *Grass and Forage Science*, 37:191-198.
- Lemaire G., Denoix A. (1987). Croissance estivale en matière sèche de peuplement de Fétuque élevée et de Dactyle dans l'Ouest de la France. II) Interaction entre les niveaux d'alimentation hydrique et de nutrition azotée. *Agronomie*, 7 :381-389.
- Lemaire G., Durand J.L., Lila M. (1989). Effet de la sécheresse sur la digestibilité in vitro, la teneur en ADF et la teneur en azote de la luzerne. *Agronomie*, 9 :841-848.
- Marion R., Humbert M., Mourier C., Pflimlin A. (1977). Des conséquences de la sécheresse de 1976 sur l'alimentation des ruminants. *Bulletin Technique d'Information*, 324-325.
- Mitchell R.J., M.H.D. Auld, M.G. Le Duc, and R.H. Marrs (2000). Ecosystem stability and resilience: a review of their relevance for the conservation management of lowland heaths. *Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics*, 3/2:142-160.
- Moore A.D., Donnelly J.R., Freer M., (1997). GRAZPLAN: Decision support systems for Australian grazing enterprises. III. Pasture growth and soil moisture submodels, and the GrassGro DSS. *Agricultural Systems*, 55, 4, 535-582.
- Petit M., Agabriel J., (1993). Etat corporel des vaches charolaises : signification, utilisation, reproduction. *INRA Production Animales*, 6, 311-318.
- Peyraud J.L., (2003). Sécheresse 2003 : conséquences sur les performances des vaches laitières. Dossier sécheresse, Unité de Recherche sur les Herbivores, INRA. 4p.

- Pfimplin A. (1997). *Sécheresse : gérer les risques. Méthodes et exemples de scénarios d'adaptation par grandes zones d'élevage*. Dossier spécial Institut de l'Élevage, 111 p.
- Réseaux d'Élevage Auvergne et Lozère (2003). *Situation et perspectives dans les élevages suite à la sécheresse de l'été 2003*. 24 août 2003. 4 p.
- Réseaux d'Élevage Charolais (2003). *Sécheresse : des pistes pour agir en fonction de sa situation*. Chambres d'Agriculture, Institut de l'Élevage. 1 juillet 2003. 10 p.
- Riedo M., Grub A., Rosset M., Fuhrer J. (1998). A pasture simulation model for dry matter production, and fluxes of carbon, nitrogen, water and energy, *Ecological Modelling*, 105, 141-183.
- Robelin J., Agabriel J., Malterre C., Bonemaire J. (1990). Changes in body composition of mature dry cows of holstein, Limousin and Charolais breeds during fattening. *Livestock Production Science*, 25, 199-215.
- Ruget F., Delécolle R., Le Bas C., Duru M., Bonneville N., Rabaud V., Donet I., Pérarnaud V., Paniagua S. (2001). L'estimation régionale des productions fourragères. Colloque Ager-Mia, 31 août 2000, in : *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision*, ed. Cirad-INRA, Montpellier, Collection Repères, Malzélieux, Trébuil, Jaeger ed., 263-282.
- Ruget F., Novak S., Granger S., (2006). Adaptation du modèle STICS à la prairie. Valorisation dans le dispositif ISOP pour l'estimation des productions fourragères. *Fourrages*, 186, 241-256
- Schapendonk A.C.H.M., Stol W., van Kraalingen D.W.G., Bouman B.A.M. (1998). LINGRA, a source/sink model to simulate grassland productivity in Europe. *European Journal of Agronomy*, 9, 87-100.
- Stampfli A., M. Zeiter (2004). Plant regeneration directs changes in grassland composition after extreme drought: a 13-years study in southern Switzerland. *Journal of Ecology*, 92:568-576.
- Teague W.R., S.L. Dowhower (2001). Do life history traits predict responses to defoliation in co-occurring prairie grasses ? *Applied Vegetation Science* 4:267-276.
- Van Peer L., I. Nijs, D. Reheul, and B. Cauwer de (2005). Species richness and susceptibility to heat and drought extremes in synthesized grassland ecosystems: compositional vs physiological effects. *Functional Ecology* 18:769-778.
- Veyssset P., Lherm M., Bebin D., (2005). Evolutions, dispersions et déterminants du revenu en élevage bovin allaitant charolais. *INRA Productions Animales*, 18, 265-275.
- Westoby M., Walker B., Noy-Meir I. (1989). Opportunistic management for rangelands not at equilibrium. *Journal of Range Management*, 42, 266-274.
- Wight J.R., Skiles J.W. (1987). In : Wight J.R., Skiles J.W., Eds. SPUR : Simulation of production and utilization of rangelands. Documentation and User Guide (ARS 63). US Department of Agriculture, Agricultural Research Service. USDA, Fort Collins, CO.