

SEPATOU, un simulateur de conduites du pâturage, à l'épreuve des "menus" bretons

M.J. Cros¹, M. Duru², D. Peyre^{3*}

Définir et évaluer des stratégies de pâturage est une tâche délicate en raison de la difficulté d'anticiper les effets de changements d'une ou plusieurs pratiques (fertilisation azotée, place de l'ensilage de maïs au printemps...). D'où l'intérêt d'un simulateur de pâturage tel que SEPATOU en vue d'aider conseillers d'élevage et éleveurs à un "apprentissage" de la gestion du pâturage.

RÉSUMÉ

Le simulateur SEPATOU fait interagir deux sous-modèles. Le modèle biotechnique simule la croissance de l'herbe et sa qualité, l'ingestion de l'herbe et la production laitière. Le modèle de décision permet de représenter des règles d'organisation, des règles d'adaptation (aux aléas climatiques ou autres) et des règles opératoires pour les décisions au jour le jour. Le simulateur réalise des calendriers de pâturage et d'alimentation, des courbes de production potentielles et simulées. SEPATOU a été testé sur 3 des stratégies d'alimentation types définies en Bretagne. Les résultats sont cohérents avec les attentes des experts. En obligeant à expliciter et discuter collectivement des règles de décision, SEPATOU permet la construction de représentations collectives de conduite de pâturage ; il est de plus un outil de formation et d'animation par apprentissage par essais-erreurs.

* en collaboration avec F. Garcia¹, M. Grasset⁴, A. Le Gall⁵, R. Martin-Clouaire¹, L. Delaby⁶, J.L. Fiorelli³, J.L. Peyraud⁶

MOTS CLÉS

Gestion du pâturage, logiciel, modélisation, pâturage, prévision, production fourragère, système fourrager.

KEY-WORDS

Forage production, forage system, forecast, grazing, grazing management, setting-up of models, software.

AUTEURS

- 1 : INRA, Unité de Biométrie et Intelligence Artificielle, Toulouse.
- 2 : INRA, Unité d'Agronomie, Toulouse.
- 3 : INRA, Unité Systèmes Agraires et Développement, Mirecourt.
- 4 : Chambre d'agriculture d'Ille-et-Vilaine.
- 5 : Institut de l'élevage, Rennes.
- 6 : INRA, Unité mixte de recherche Production du lait, Rennes.

CORRESPONDANCE

M.J. Cros, INRA, Unité de Biométrie et Intelligence Artificielle, Toulouse, BP 27, F-31326 Castanet ;
mél : cros@toulouse.inra.fr

Gérer le pâturage, c'est anticiper et s'adapter

La place du pâturage dans les calendriers alimentaires peut être très variable selon les élevages au sein d'une même région. Il s'agit donc d'un choix de système motivé par des considérations internes ou externes aux élevages, y compris pour des élevages laitiers bovins (THÉBAULT *et al.*, 1998) et ovins (OSTY et LARDON, 1999). Il n'en reste pas moins que, quelle que soit la place du pâturage, il importe de raisonner sa conduite. Cette conduite correspond de fait toujours à un compromis entre, d'une part, la recherche d'une efficacité d'utilisation élevée (taux d'utilisation de l'herbe produite ; LEMAIRE, 1999) et, d'autre part, des contraintes de mise en œuvre liées le plus souvent aux caractéristiques des surfaces (surfaces facilement accessibles par vache), à l'organisation du travail ou à des considérations économiques ou réglementaires (quota laitier) qui peuvent conduire à choisir une efficacité technique moindre à l'échelle de la parcelle pâturée.

* Modalités utilisées pour améliorer la gestion du pâturage

Pour des élevages bovins lait, les recommandations établies de longue date s'appuient sur des résultats expérimentaux (hauteur d'herbe et fréquence de défoliation optimales) et des expertises locales. Les résultats expérimentaux ont eu comme objectif principal de définir des conduites permettant d'optimiser les productions de biomasse et les performances animales. Il a ainsi été défini des hauteurs du couvert, selon l'espèce animale, en pâturage continu (LE DU *et al.*, 1981) ou tournant (LE DU *et al.*, 1979). Pour prendre en compte d'autres logiques de conduite de pâturage, telles la réduction des apports d'azote ou bien la création de reports d'herbe sur pied pour prolonger l'alimentation au pâturage lorsque la croissance de l'herbe est réduite, d'autres référentiels sont en cours de création (DURU *et al.*, 2001).

Les expertises locales ont comme objectif de fournir des normes de dimensionnement du système de pâturage (date de mise à l'herbe, fertilisation azotée, chargement) par petite région et système d'élevage (DELAVEREAU *et al.*, 1999). Ce dimensionnement est conçu de façon à ce que les règles de conduite préconisées à l'échelle de la parcelle puissent facilement être mises en œuvre. Il correspond à la définition à l'avance de grands équilibres entre l'offre en fourrage (combinaisons de fertilisation azotée et de surface allouée) et la demande (nombre de vaches), ainsi que des moyens d'adaptation par saison pour tenir compte des variations de la demande et surtout de l'offre (climat).

* Limites... et perspectives

Ces règles d'organisation, supposées cohérentes entre elles et avec les objectifs de production, ne sont pas simples à élaborer. En effet, le pâturage doit être pensé pour sa fonction immédiate, alimenter les animaux, mais aussi sa fonction différée, préparer la repousse suivante. C'est ce dernier point qui justifie une règle de conduite basée sur la hauteur résiduelle en pâturage tournant (DURU, 2000). En outre, la régulation de l'offre fourragère ne se fait pas de la même manière selon qu'il s'agit d'optimiser l'ingestion par une conduite du pâturage en "flux tendus" ou bien de prolonger le pâturage en été ou en automne avec des stocks d'herbe sur pied. Dans le premier cas, la régulation de l'offre se fait en adaptant en temps réel la surface fauchée ; dans le second cas, elle se prépare plus à l'avance en réalisant une défoliation permettant de générer une quantité d'herbe à utiliser à une période déterminée à l'avance. Enfin, certaines règles de décision, la mise à l'herbe par exemple, doivent être pensées non seulement en fonction des autres règles de conduite, mais aussi en fonction des ressources allouées, la surface affectée par exemple (COLÉNO et DURU, 1998).

Face à ces difficultés, l'éleveur procède le plus souvent par tâtonnement sur la base de l'expérience des années antérieures. Mais dès qu'il s'agit de tester l'intérêt et la faisabilité d'un changement de conduite ou d'évaluer l'impact d'un changement du niveau des ressources, l'organisation devient beaucoup plus complexe. En matière de pâturage, l'expérience d'autrui est souvent difficilement communicable et transposable. Pour faciliter cette procédure d'organisation, notamment lorsque la question d'un changement de stratégie est posée, nous avons construit un simulateur (SEPATOU) qui peut servir à un utilisateur pour son apprentissage en explicitant ses connaissances et en les projetant sur d'autres scénarios. SEPATOU comprend un module biotechnique simulant les effets des caractéristiques du milieu (sol, climat) et des interventions techniques sur la production d'herbe, son prélèvement par les vaches et la transformation de l'énergie en lait (CROS *et al.*, 2000a), ainsi qu'un module décisionnel permettant de spécifier et de hiérarchiser les différentes règles de décision permettant de définir une stratégie (CROS *et al.*, 2000b).

Dans une première partie, nous présentons rapidement le fonctionnement du simulateur. Ensuite, nous présentons des résultats de simulation pour des stratégies de pâturage élaborées pour des élevages en Bretagne.

Après avoir décrit les principaux résultats tirés de l'évaluation du logiciel, nous concluons en précisant quelle pourrait être son utilisation future.

Le simulateur SEPATOU

1. Cadre de modélisation

Le simulateur utilise un modèle du système de production considéré et de son fonctionnement. Ce modèle est une représentation simplifiée de la réalité dont il convient de préciser les éléments pris en compte et les hypothèses simplificatrices sur lequel il repose.

Le système de production auquel s'intéresse le projet SEPATOU ne concerne que le troupeau de vaches productrices, de début février à fin juillet, pour un mode de production basé de manière prédominante sur l'exploitation de ressources fourragères par pâturage tournant et complété par du maïs ensilé, du foin et des aliments concentrés (en fin d'hiver en particulier). On ne considère en outre que des prairies à base de graminées susceptibles d'être pâturées. La production des parcelles réservées exclusivement à la production de stocks de foin ou d'ensilage d'herbe et de maïs n'est pas modélisée. La seule source d'incertitude considérée est climatique. On ne retient donc pas celle liée aux prix et à la réglementation. Ces données sont considérées comme des contraintes ou des atouts lors de l'élaboration des stratégies. On ne modélise pas non plus certaines composantes qui pour le moment n'entrent pas dans le cadre de l'étude: il s'agit en particulier de tout ce qui touche aux moyens d'exécution des actions comme les machines et la main d'œuvre que l'on considère non limitants. On suppose en outre que toutes les vaches du troupeau sont identiques (même poids, même potentiel génétique, même date de vêlage). Seul le bilan énergétique est considéré, dans la mesure où on suppose qu'il n'y a pas de risque de déficit de protéines au pâturage. De plus, on fait l'hypothèse simplificatrice d'homogénéité de chaque parcelle. Enfin, concernant les interventions techniques, on considère les actions suivantes : alimentation en maïs ensilé, en concentré, en foin, pâturage d'une parcelle, ensilage, fauche, fertilisation azotée en imposant que :

- l'engrais azoté soit apporté en trois fois à des dates fixes définies dans la stratégie avec, à une date donnée, la même quantité par unité de surface sur chaque parcelle ;

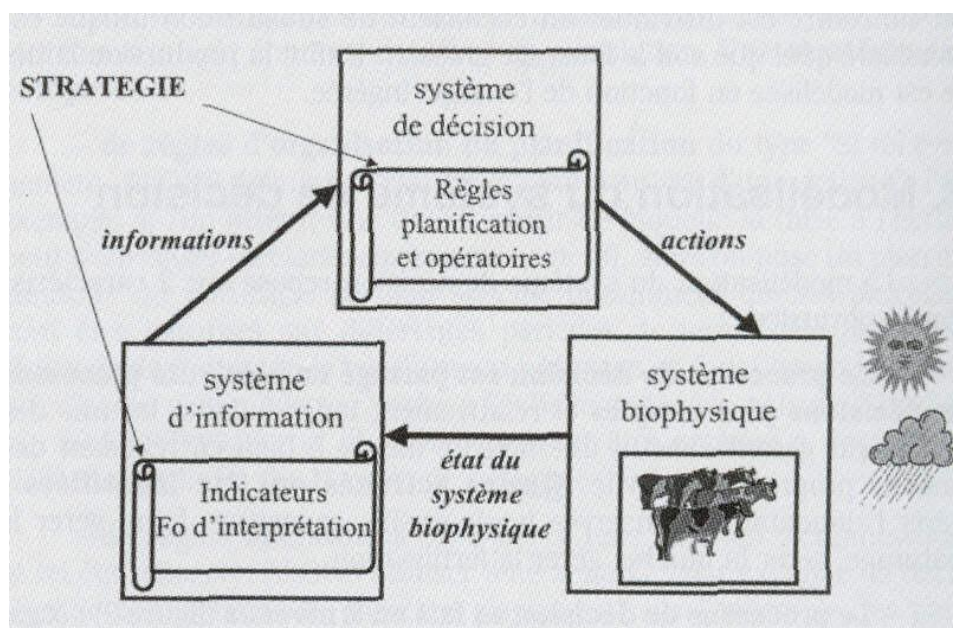
- l'affectation du troupeau sur une parcelle se fasse pour une journée au moins ; autrement dit, un jour donné, au plus une parcelle est pâturée.

2. Modélisation du système de production et de son fonctionnement

Dans le cadre de modélisation explicité ci-dessus, SEPATOU permet de simuler au jour le jour la gestion de l'alimentation d'un troupeau laitier durant la période de printemps. La construction et l'utilisation du simulateur

FIGURE 1 : Modélisation systémique du système de production.

FIGURE 1: Systemic model of the production system.



reposent sur une modélisation explicite, présentée ci-après, du problème considéré et de sa résolution. Le système de production considéré est décomposé en 3 sous-systèmes en interaction (figure 1) :

- le système biotechnique modélise les composantes biophysiques (prairies, vaches, stocks) et leurs évolutions compte tenu des interventions techniques réalisées et du climat observé ;
- le système de décision modélise au jour le jour la prise de décision des interventions techniques (actions) ;
- le système d'information "renseigne" le système de décision sur l'état passé, actuel, futur supposé du système biophysique, notamment en gérant des indicateurs qui mémorisent depuis combien de temps l'état associé à l'indicateur est réalisé.

3. Modélisation du système biotechnique

Nous en rappelons ci-après l'essentiel, le détail ayant été donné par ailleurs (CROS et al., 2000a). Le modèle comprend un module sol dont les variables d'entrée sont la réserve en eau utile et la texture. Connaissant la pluviométrie et l'ETP, la première variable permet de calculer l'eau disponible, l'évapotranspiration réelle et un indice hydrique (ETR/ETP). La seconde variable est une des informations qui peut être mobilisée pour décider si une parcelle est portante ou non.

Le module plante permet de simuler la croissance nette qui est calculée comme la différence entre la croissance brute et la sénescence. La croissance brute est estimée à partir des données du climat (température et rayonnement). Elle est affectée de coefficients (compris entre 0 et 1) de stress hydrique et azoté. Le stress azoté correspond à l'indice de nutrition azotée calculé à partir de la teneur en azote et de la biomasse (LEMAIRE et GASTAL, 1997). C'est une variable d'entrée du modèle ; mais une expertise régionale permet de définir des valeurs de nutrition azotée en fonction des caractéristiques des sols et des apports d'azote. La biomasse qui devient sénescente correspond à une fraction de la biomasse résiduelle après pâturage (DURU et al., 2000). La digestibilité de l'herbe offerte est simulée en fonction du temps de repousse, de la matière sèche résiduelle et de la température (DURU et al., 1999).

Le module animal permet de simuler la quantité d'herbe ingérée en fonction de la quantité d'herbe offerte par vache, ainsi que du stade de lactation et de la capacité d'ingestion de la vache. Lorsqu'un fourrage grossier (maïs ensilé, foin) est distribué, on considère qu'il est donné en premier dans la journée ; le pâturage vient ensuite. Lorsque du concentré est distribué, un coefficient de substitution unique est considéré quel que soit le fourrage grossier. Enfin, la production laitière est modélisée en fonction de l'énergie ingérée.

4. Modélisation du système de décision

La modélisation du système de décision repose sur 2 caractéristiques novatrices :

- Le processus de décision est partagé en plusieurs processus de décisions plus simples et relativement indépendants les uns des autres car gérant chacun une activité menée à bien en réalisant des actions propres à l'activité. Quatre activités ont été identifiées : gérer l'alimentation conservée (maïs ensilé, concentré, foin), gérer le pâturage, gérer la fauche, gérer la fertilisation.

- Le processus de décision se fait en 2 niveaux (figure 2) : organisation générale (planification) et opératoire. Au niveau planification, en se basant sur des règles énoncées, des plans sont décidés ou adaptés compte tenu du climat et du système biophysique. Un plan spécifie l'organisation d'une activité (affectation de valeurs à des variables de décision de planification) sur des périodes successives durant lesquelles l'organisation de l'activité est stable. Les périodes peuvent être définies dynamiquement ; par exemple, la fin d'une période est définie lorsqu'un indicateur est détecté. Les plans des différentes activités sont décrits dans la stratégie ainsi que leurs adaptations. Au niveau opératoire, un jour donné des actions sont décidées (affectation de valeurs à des variables de décision opératoires) compte tenu des plans en cours et de l'état observé, en se basant sur des règles opératoires énoncées.

La conduite décidée (les actions réalisées au jour le jour) repose sur une stratégie énoncée en début de simulation. Une stratégie est composée :

- de règles d'organisation ou planification du type "SI tel événement, ALORS définir ou adapter le plan à suivre d'une activité". Par exemple, si l'on atteint une date à partir de laquelle la mise à l'herbe peut s'envisager (déclarée comme événement), alors on pose un plan de conduite du pâturage. Le plan spécifie notamment

quelles parcelles vont être pâturées sur différentes périodes de temps. De plus, des règles d'adaptation de la conduite du pâturage en fonction de la quantité d'herbe disponible par vache à l'échelle de la sole pâturée (DURU et al., 2000 ; THÉBAULT et al., 1998) peuvent être activées à des étapes clés comme la fin du 1er cycle de pâturage ;

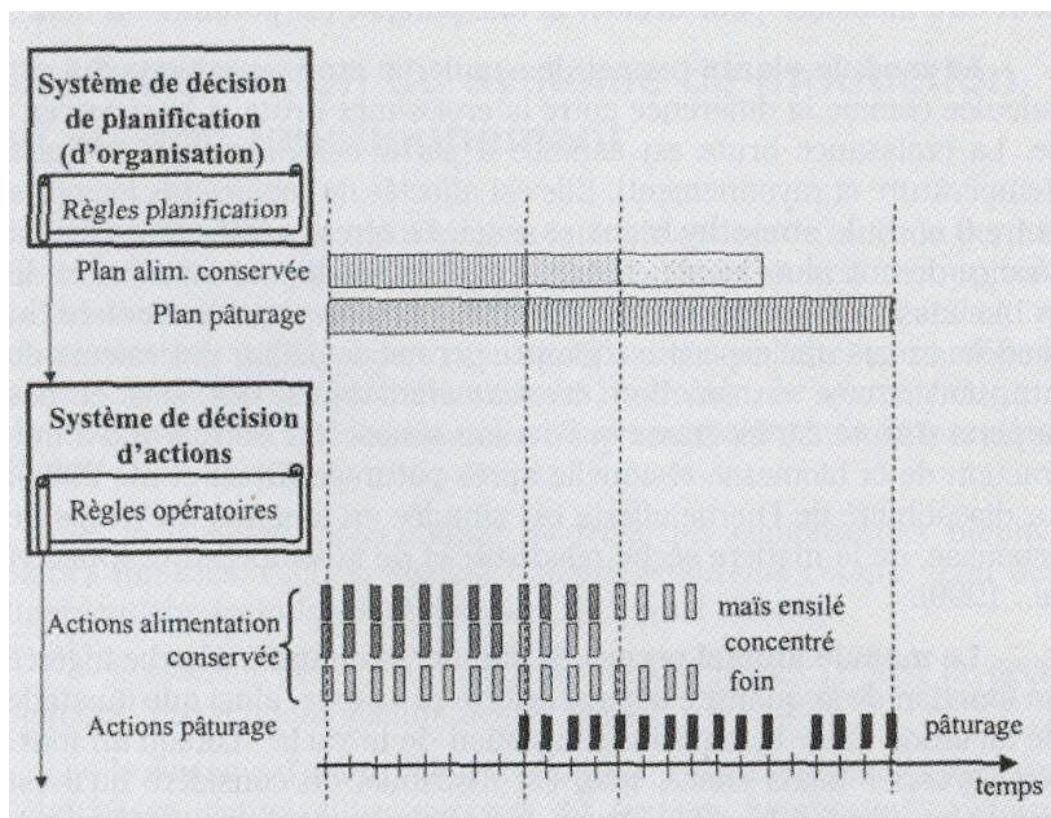
- de règles opératoires du type "SI telle décision d'organisation et tel état observé, ALORS réaliser telle action" ; par exemple, la décision de changement de parcelles s'appuyant sur l'ensemble des parcelles à pâturer avec quelle durée (décisions d'organisation applicables le jour considéré) et les états des parcelles (quantité d'herbe résiduelle) ou sur la production de lait en comparaison du potentiel de production ;

- d'indicateurs : ils mémorisent la date où l'état qui leur est associé est devenu réalisé ; par exemple, la date où la disponibilité en herbe dépasse 4 jours d'avance par vache peut être un indicateur de mise à l'herbe ;

- de fonctions d'interprétation : procédure d'élaboration d'une information particulière ; par exemple, une fonction indiquant si une parcelle est fauchable peut être définie vraie si la hauteur d'herbe atteint un certain seuil.

FIGURE 2 : Schéma du processus de décision illustré avec les activités alimentation conservée et pâturage.

FIGURE 2: Decision making process schematically illustrated with conserved feeds and with grazing.



Pour être utilisable dans un simulateur, la stratégie est formalisée dans un langage appelé LnU et développé pour l'application. Dans ce langage, une décision d'organisation consiste à poser un plan en définissant des périodes pour lesquelles des variables de décision de planification sont précisées. Une décision opératoire revient à donner une valeur à une variable de décision opératoire. Pour chaque activité, des variables de décision de planification et opératoires ont été définies et intégrées dans le langage.

5. Fonctionnement du simulateur

Sur la base de la modélisation énoncée précédemment, le logiciel de simulation a été programmé sous le système d'exploitation Linux. Le logiciel est constitué de deux parties distinctes communiquant par fichiers :

- l'interface utilisateur qui permet à l'utilisateur de décrire les entrées, de visualiser les sorties, de sauvegarder ou lire des données sur disque (écrite essentiellement avec le langage Tcl/Tk excepté le traducteur de stratégie de LnU en C++ qui est écrit avec les outils flex et bison) ;
- le cœur du simulateur qui est un simulateur à événement discret avec gestion du temps dirigée par horloge (programmation objet en gnu C++).

Pour utiliser le logiciel, l'utilisateur décrit une exploitation, une stratégie, les climats (réels ou générés) à simuler et les sorties voulues. Ensuite, il demande la traduction de la stratégie en C++ avant l'exécution des simulations. L'utilisateur peut ensuite visualiser les résultats sous différentes formes (calendrier de pâturage, graphique de répartition d'alimentation, courbe d'évolution ou valeur numérique des variables, histogramme de valeurs sur plusieurs années...) et ainsi évaluer la stratégie. L'utilisateur peut alors, seul ou en groupe, rentrer dans une boucle d'apprentissage avec essai, évaluation, modification de stratégie, qui lui permet d'interroger, d'élargir et d'explicitier ses connaissances et de les projeter sur d'autres scénarios.

Simulation de 3 "menus" bretons

1. Les menus bretons considérés

Comme dans de nombreuses régions d'élevage, une caractéristique des systèmes d'alimentation d'herbivores en Bretagne est leur diversité, notamment avec la recherche croissante de systèmes moins intensifs adaptés à différentes structures de production. Afin d'accompagner ces évolutions, cinq "menus" type (THÉBAULT *et al.*, 1998) ont été formalisés en fonction de la place allouée au pâturage, à partir de références acquises dans des réseaux d'élevage. Une présentation détaillée de ces modèles a été faite avant qu'il soit envisagé de les simuler avec SEPATOU.

Trois de ces "menus", combinant pâturage et ensilage de maïs, et compatibles avec le cadre de modélisation posé pour SEPATOU, ont été simulés et sont présentés ici. Ils diffèrent principalement par la place faite au pâturage, en relation avec la surface offerte par vache. Pour la simulation, nous avons retenu les objectifs généraux communs suivants :

- pour la période prévue pour le pâturage, ce mode d'alimentation est toujours privilégié ;
- pendant la période de pâturage, trois grandes phases d'alimentation sont distinguées : transition alimentaire entre la mise à l'herbe et la fermeture du silo de maïs, pâturage seul, réouverture du silo ;
- il n'est pas pris en compte de parcelles spécifiques pour la fauche. Sont fauchées indifféremment les parcelles dont les repousses sont les plus anciennes quand il y a un excédent d'herbe ou les parcelles dont les repousses sont trop âgées pour le pâturage ;
- la fauche a lieu entre le 10 mai et la fin juillet, quand elle est jugée nécessaire et possible ;
- aucun concentré n'est distribué quand le silo de maïs est fermé.

2. Présentation détaillée du menu "100 jours de pâturage seul"

* Description de la stratégie

L'exploitation considérée entretient 31 vaches laitières à 7 500 kg de production annuelle, ayant vêlé au 15 octobre de l'année précédente. L'exploitation dispose pour le pâturage des vaches laitières de 11 ha de ray-grass anglais répartis en 10 parcelles de 1,1 ha, dont la moitié dite "sableuse" dispose d'une réserve utile de 80 mm, alors que celle de l'autre moitié dite "argileuse" est de 150 mm. Le chargement à la mise à l'herbe est donc de 35,5 ares par vache. La stratégie correspondant à ce menu a été formalisée de la manière suivante :

- Le pâturage est possible à partir du 15 février. Chaque phase de la transition alimentaire est conditionnée à un stock d'herbe disponible minimum (4 jours pour la mise à l'herbe, 7 jours pour sortir la nuit, 10 jours pour

fermer le silo) et à un niveau de croissance de l'herbe. Toutes les parcelles sont pâturées au moins une fois, puis le stock disponible est évalué tous les huit jours pour adapter le dispositif. Certaines parcelles peuvent alors être "débrayées" ou au contraire réaffectées au pâturage.

- La fauche concerne toutes les parcelles débrayées dont la hauteur d'herbe atteint 18 cm.

- La distribution de fourrages conservés, au cours de la transition alimentaire, en début de saison, évolue en 3 étapes : (i) à la mise à l'herbe, les vaches reçoivent 10 kg de MS d'ensilage de maïs et la moitié du concentré distribué avant la sortie ; (ii) quand les vaches sortent jour et nuit, elles ne reçoivent plus que 5 kg de MS d'ensilage de maïs et 1 kg de concentré ; (iii) à la fermeture du silo, aucun complément n'est plus distribué. A la réouverture du silo, les vaches reçoivent à nouveau 5 kg de MS d'ensilage de maïs et 1 kg de concentré, éventuellement augmentés ensuite. Il n'est jamais distribué de foin. En période de complémentation, si la croissance de l'herbe ne couvre pas la consommation du troupeau, la quantité de maïs distribuée est provisoirement augmentée de 5 kg, celle de concentré de 1 kg.

- Enfin, la fertilisation sur les parcelles permet de maintenir un indice de nutrition azotée élevé (de 90 à 85).

TABLEAU 1 : Des règles énoncées dans les modèles "menus bretons" aux règles implémentées dans SEPATOU pour le pâturage.

TABLE 1: From the rules given in the breton 'menu' models to the rules implemented in SEPATOU about grazing.

Recommandations du menu	Règles utilisées dans SEPATOU		
	Déclencheurs	Règles de planification	Règles opératoires
<u>Mise à l'herbe</u> - Entre le 15 février et le 1er mars - Sur sol portant - Hauteur entrée : 4 à 6 cm - Hauteur sortie : 4,5 cm	- Après le 15 février - Au moins 4 jours d'avance	- Toutes les parcelles sont à pâturer - Pâturage de jour - Hauteur sortie : 4,5 cm - Age minimum des repousses pâturées : 15 jours - Age maximum des repousses pâturées : 45 jours	- Mise à l'herbe sur une parcelle "sableuse" prédéfinie - Une parcelle est considérée comme finie quand la hauteur d'herbe résiduelle est inférieure ou égale à la hauteur sortie planifiée - La parcelle suivante pâturée est, parmi les parcelles à pâturer, celle dont la repousse est la plus âgée
<u>Pâturage jour et nuit</u> - Pousse \geq 20 kg MS/ha.jour et stock d'herbe d'avance - ou pousse \geq 35 kg MS/ha.jour	- Au moins 7 jours après la mise à l'herbe - Croissance \geq 39 kg MS/ha.jour - ou croissance \geq 30 kg MS/ha.jour et 7 jours d'avance	- Pâturage jour et nuit - Hauteur sortie : 5,5 cm	
<u>Fin du 1er cycle</u> - Pâturer toutes les parcelles avant le 15 avril - Hauteur entrée > 8 cm au 2e passage	- Toutes les parcelles ont été pâturées une fois	- Tous les 8 jours, examen du stock disponible - Toutes les parcelles dont la repousse dépasse 45 jours sont débrayées	
<u>Fermeture du silo</u> - Entre le 1er et le 15 avril - Pousse \geq 40 kg MS/ha.jour et 10 jours d'avance	- Au moins 7 jours après la sortie de nuit - Croissance \geq 45 kg MS/ha.jour et 10 jours d'avance	- Si stock > 20 jours d'avance, 1 à 3 autres parcelles sont débrayées - Si stock < 20 jours, 1 à 3 parcelles débrayées (repousse < 45 jours) sont réintégrées dans les parcelles à pâturer	

Le tableau 1 décrit pour le pâturage cette formalisation en indicateurs et en règles de décision de planification et opératoires. Au cours de ces transcriptions, nous avons adopté un certain nombre de conventions qui complètent ou adaptent au langage informatique les règles présentes dans les menus:

- Nous distinguons, au cours de la période de pâturage, deux ensembles mobiles de parcelles qui nous semblent correspondre à la façon de réfléchir les affectations de ces parcelles. L'ensemble des "parcelles à pâturer" comprend toutes celles dont la prochaine utilisation est probablement un pâturage des vaches laitières. Ce sont toutes les parcelles "non débrayées". L'ensemble des "parcelles débrayées" comprend toutes celles dont la prochaine utilisation est probablement une fauche ou un ensilage, Ce découpage peut être révisé à tout moment, toutes les parcelles décrites étant prioritairement destinées au pâturage. En cas de déficit en herbe, une parcelle qui était débrayée au jour J peut être réintégrée dans les parcelles à pâturer à J+ 1, dans la mesure où elle est considérée comme encore pâturable. De même, en cas d'excédent, ou parce que la repousse est trop âgée, une parcelle à pâturer peut être débrayée à tout moment.

- La durée minimum de pâturage, un jour sur une parcelle (3,5 ares/vache), se traduit par le prélèvement de 1,5 à 2 cm. Pour éviter de passer un jour de plus dans une parcelle où la hauteur sortie attendue est presque atteinte, les hauteurs sortie programmées sont un peu plus élevées que les recommandations. Quand la hauteur programmée est atteinte, on ne remet pas le troupeau dans la parcelle.

- Le stock d'herbe disponible, exprimé en jours d'avance au pâturage, et la croissance de l'herbe sont les deux indicateurs utilisés pour décider des adaptations de surface. Les jours d'avance sont toujours calculés pour une alimentation uniquement au pâturage. Ils tiennent compte de la consommation estimée des vaches laitières et de la hauteur sortie prévue à la période en cours. Les hauteurs d'herbe sont estimées à partir des biomasses calculées par le modèle. Une masse volumique unique, indépendante de la saison et de la hauteur est choisie (250 kg MS/ha/cm pour du ray-grass anglais). La croissance de l'herbe est calculée par la différence moyenne de quantité de matière sèche présente entre J et J-7 de toutes les parcelles qui n'ont pas été fauchées ou pâturées dans l'intervalle. Pour limiter les effets dent de scie, la "croissance lissée", moyenne des croissances calculées pour les 7 jours précédents, sera utilisée.

- Le défaut de portance n'est pas pris en compte.

Par la suite, quand nous parlerons de "règles", il s'agira de celles décrites dans SEPATOU.

* Simulation de la stratégie

Les simulations ont été réalisées pour les 17 années (1983-1999) où nous disposons des données climatiques nécessaires (station météorologique INRA de Rennes). La pluviométrie correspond à une situation qualifiée de séchante (moyenne 726 mm/an) dans les menus pâturage. Une illustration des calendriers de pâturage et d'alimentation est donnée sur la figure 3 pour l'année 1999. Pour l'ensemble des années simulées, la mise à l'herbe a lieu en moyenne au 27 février et 11 années sur 17 avant le 1er mars. La fermeture du silo s'effectue en moyenne au 14 avril et le silo est fermé environ 90 jours. Pour 6 années, il n'est pas encore réouvert au 31 juillet (figure 4). Entre 1 et 6 parcelles sont fauchées, la plupart du temps une seule fois, soit en moyenne 40% de la surface. Le plus souvent, il y a plusieurs dates de fauche échelonnées, aucune limite n'étant fixée sur le nombre de chantiers.

Bien que ce ne soit pas un critère de pilotage, la production laitière simulée est proche de la production potentielle.

Pour comparer nos résultats à d'autres références des menus, la même stratégie a été utilisée pour des niveaux de production annuels potentiels de 6 500 et 8 500 kg de lait par vache laitière. L'exploitation a été modifiée pour tenir compte du chargement conseillé : sur les mêmes 11 ha, répartis en 10 parcelles, sont alimentées 33 ou 28 vaches laitières pour obtenir une surface disponible de 33 et 38 ares par vache. La matière sèche ingérée passe respectivement à 15 et 17 kg/jour. Dans les deux cas, on constate très peu de différence dans le déroulement du pâturage et dans la régularité de la production.

FIGURE 3 : Calendrier de pâturage (haut) et planning d'alimentation (bas) pour la stratégie "100 jours de pâturage" en 1999 (niveau de production laitière : 7 500 kg/vache/an).

FIGURE 3 : Grazing schedule, and feeding programme, for the '100 day grazing' strategy in 1999 (milk production : 7 500 kg/cow/year).

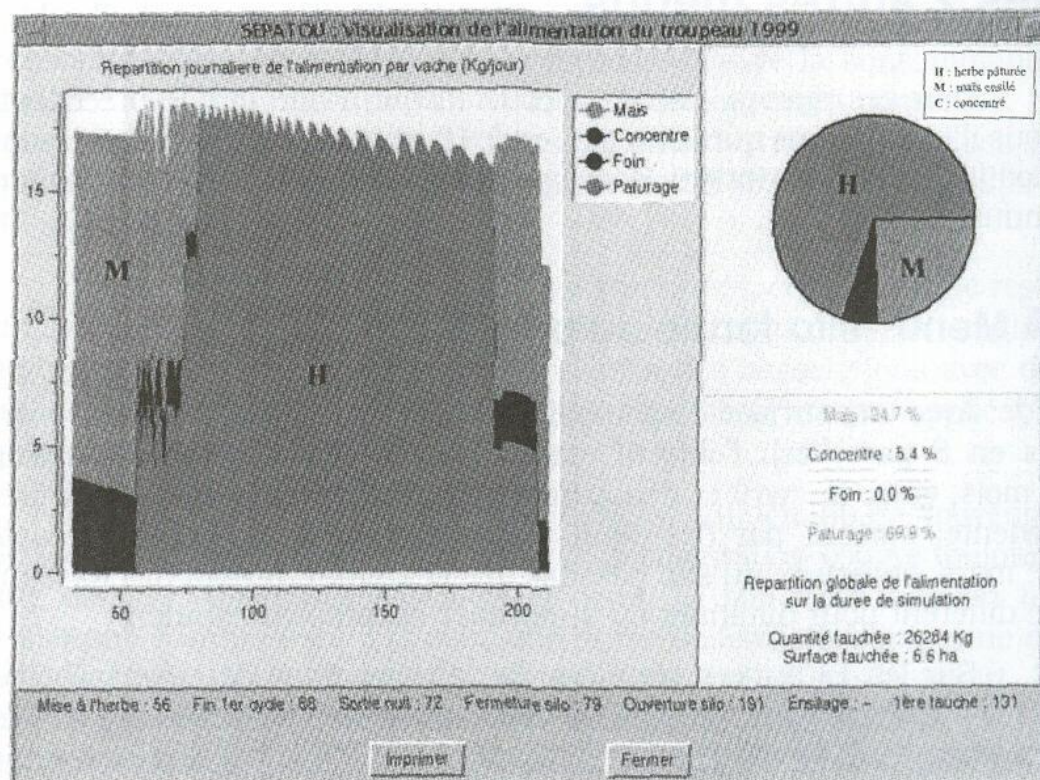
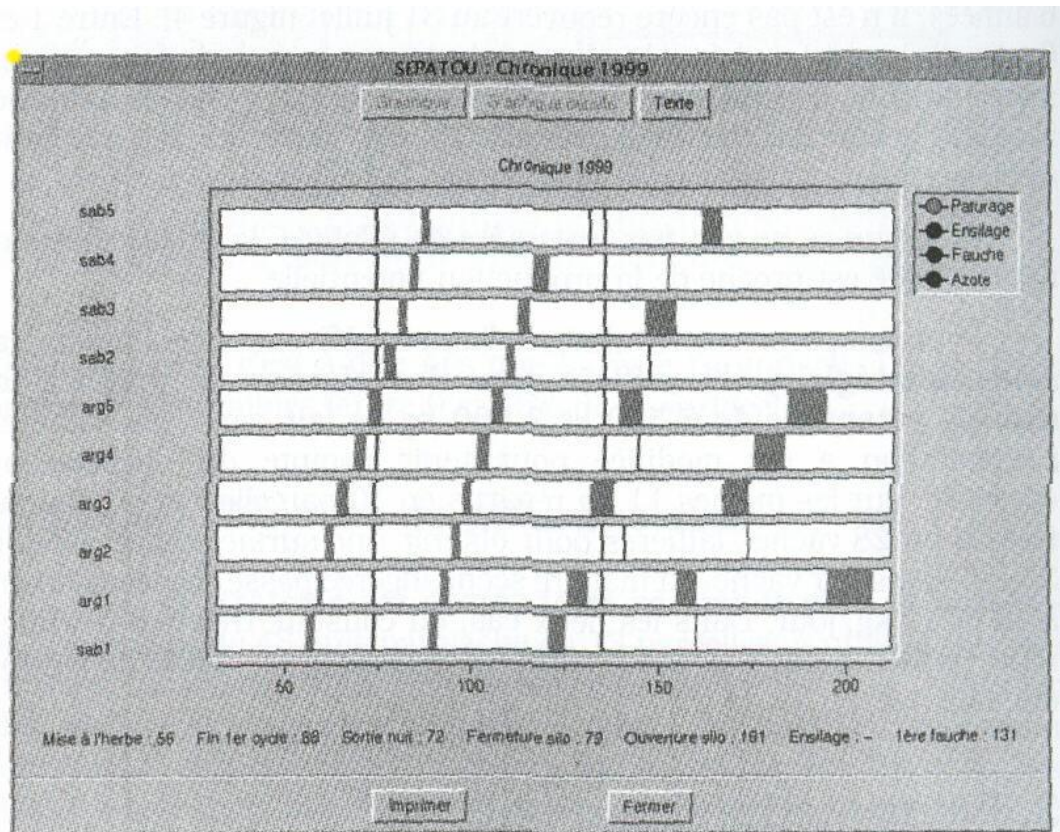
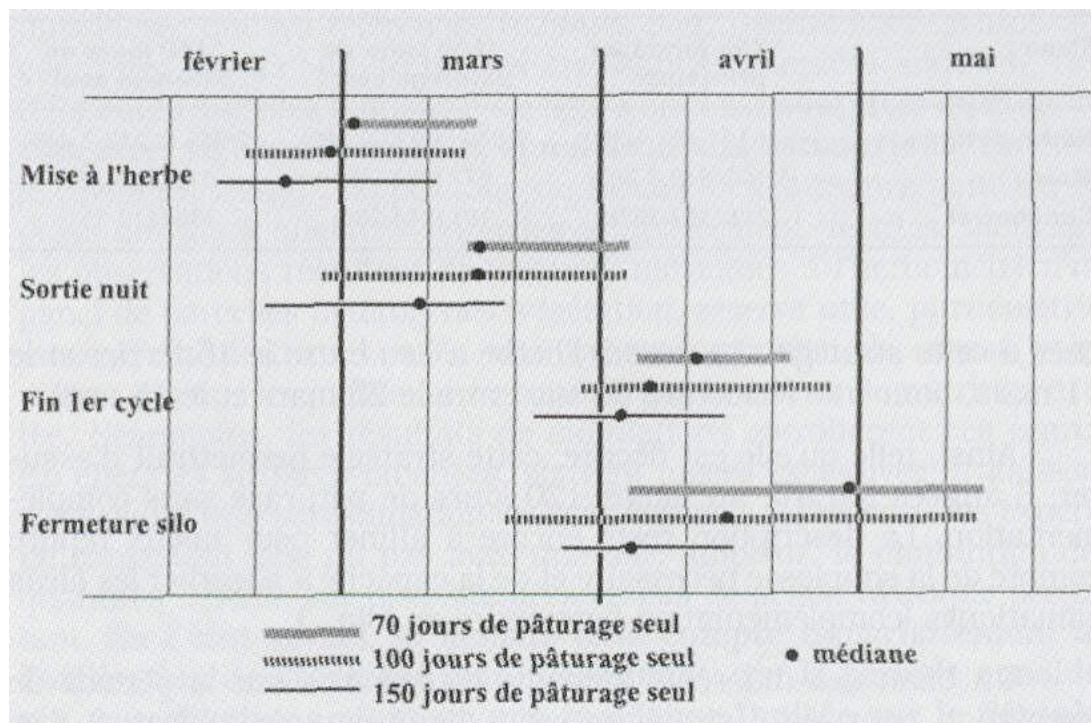


FIGURE 4: Pour les 17 années simulées, dates clés simulées de février à juillet ; valeurs médianes et intervalles de variation.

FIGURE 4: Simulated key dates, from February to July, median values and intervals of variation, in the 17 years, to which simulation was applied.



3. Présentation résumée des 2 autres menus

Pour ces menus, décrits avec la même trame que le précédent, nous n'indiquerons que les règles ou les paramètres essentiels qui sont modifiés. Les descriptions correspondent à un niveau de production annuel de 7 500 kg.

* Menu "silo fermé au printemps"

Avec une surface disponible moins élevée (26 ares/vaches répartis en 8 parcelles), l'objectif est de fermer le silo pendant environ 2 mois, entre fin avril et début juillet. La description diffère de la précédente, surtout par des seuils différents (mise à l'herbe après le 1er mars, ouverture du silo possible dès le 15 juin, niveau de croissance différent pour diminuer ou supprimer la complémentation).

Sur les 17 années simulées, la date moyenne de mise à l'herbe est le 4 mars (entre le 1er et le 16 mars), pour une fermeture du silo en moyenne au 27 avril et une réouverture (sauf 3 années) en moyenne au 23 juin (figure 4). En fait, une année sur deux, le silo a été réouvert dès le 15 juin, c'est-à-dire dès que la règle l'autorisait. Les surfaces fauchées sont faibles (entre 0 et 25% de la surface).

* Menu "150 jours de pâturage seul"

C'est la stratégie qui demande et permet le plus de souplesse. Disposant de 48 ares par vache en 13 parcelles, à utiliser sur plus de temps, le jeu des utilisations possible est élargi. Il a donc fallu créer des règles beaucoup plus souples en particulier lors de la transition alimentaire afin de permettre des variations fréquentes des quantités d'ensilage de maïs distribuées. Celles-ci peuvent aller jusqu'à 4 kg de MS en plus ou en moins tous les 3 jours : en plus, si le stock disponible diminue trop ou si la croissance de l'herbe ne couvre pas la consommation ; en moins, si la croissance couvre la consommation malgré une diminution de la distribution de

fourrages conservés. Le silo n'est pas fermé avant le 25 mars, ni ouvert avant le 15 juillet. Le nombre de jours d'avance cherché passe de 25 jours au printemps à 35 jours en été.

Le modèle ne portant que sur des graminées, cette stratégie reste un compromis où, tout en déclarant des surfaces en ray-grass anglais pur, on accepte des règles correspondant à des associations avec du trèfle blanc. En effet, cette stratégie n'est considérée comme applicable qu'avec au moins 50% d'associations.

Malgré des surfaces fauchées élevées, atteignant en moyenne 60% de la surface, le pâturage sans complémentation couvre toujours une période supérieure à 3 mois et demi. Le silo n'est réouvert fin juillet que 7 années sur 17, pour une durée de fermeture moyenne de 111 jours (figure 4). Pour les dix années où il n'est pas réouvert, le cumul du temps de fermeture sur la durée de la simulation et des jours d'avance disponibles à la fin de la simulation (au 31 juillet) est en moyenne de 147 jours. On est donc très proche des objectifs assignés à cette stratégie. La mise à l'herbe a lieu entre le 15 février et le 11 mars, pour une fermeture du silo entre le 25 mars et le 15 avril.

Ainsi, telle qu'elle est décrite, cette stratégie permettrait d'assurer, 6 années sur 10, au moins 120 jours de pâturage sans complémentation. La description reste encore à affiner pour mieux rendre compte de la souplesse nécessaire et de la capacité à absorber les aléas climatiques (complémentation temporaire en foin...).

Un bilan des différents aliments consommés sur la période de simulation pour les 3 stratégies est indiqué dans le tableau 2. Les écarts entre stratégies résultent des différences de surface disponible pour le pâturage (26, 35 et 48 ares par vache) et des autres règles de conduite associées. Cet ensemble de règles, couplé au modèle biotechnique, a donc permis de reproduire des résultats dont les ordres de grandeur sont cohérents avec ceux indiqués dans les "menus".

TABLEAU 2 : Aliments ingérés (kg de MS/vache) du 1er février au 31 juillet pour les 3 "menus bretons" ; valeurs médianes et intervalles de variation.

TABLE 2 : Ingested feeds (kg DM/cow) from 1st February to 31 July for the 3 breton 'menus' ; median values and intervals of variation.

Menu	"Silo fermé au printemps"	"100 jours de pâturage seul"	"150 jours de pâturage seul"
Herbe pâturée	1 707 (1452-1952)	2 042 (1 922-2 269)	2 365 (2 212-2 445)
Maïs	1 146 (943-1 383)	877 (692-987)	610 (540-721)
Concentrés	241 (197-287)	181 (144-208)	130 (110-151)

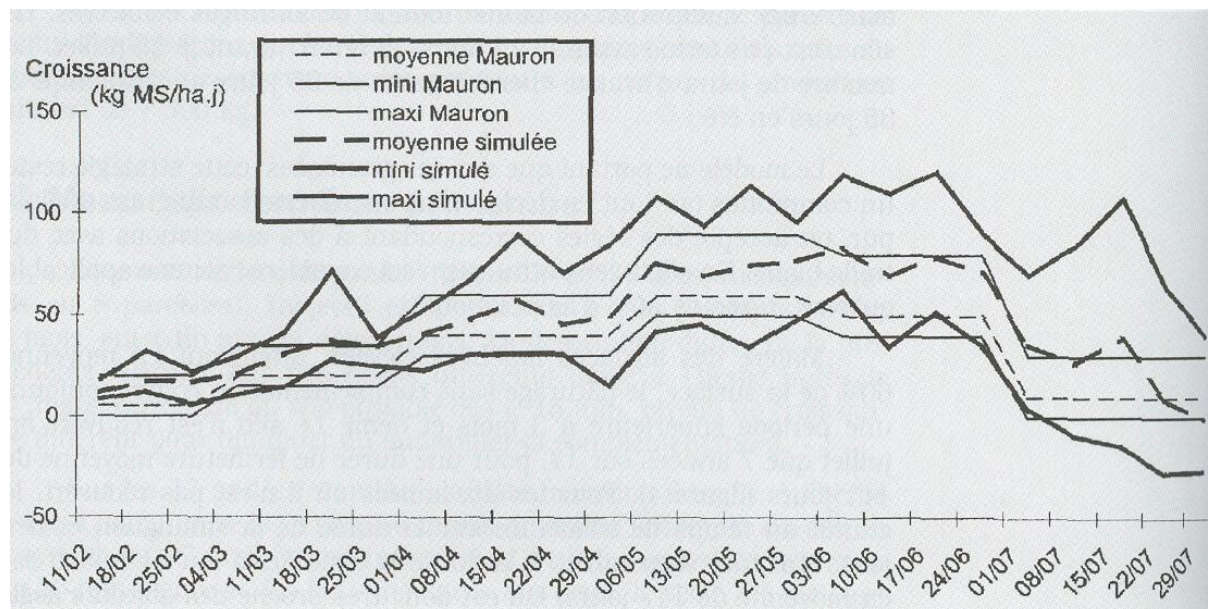
Discussion et conclusion

* Evaluation du modèle biotechnique

Nous avons constaté que la moyenne des croissances simulées pour la stratégie "100 jours de pâturage seul" est, jusqu'à mi-juillet, plus élevée que les références retenues pour décrire les 5 menus. Au contraire, en période sèche, les croissances simulées sont vite très inférieures aux observations (voir figure 5). Il est toutefois difficile de comparer rigoureusement la simulation aux estimations. En effet, le calcul est issu de l'application du modèle de croissance pour le ray-grass anglais à quelques parcelles arbitrairement décrites, alors que les observations résultent de mesures moyennes à l'herbomètre d'un panel de parcelles hétérogènes (végétation, réserve utile, pluviométrie, mode d'exploitation...), avec une même hypothèse de masse volumique, et pour lesquelles on ne connaît pas le niveau de nutrition azotée. Néanmoins, les résultats de simulations corroborent ces écarts. En effet, les surfaces fauchées, souvent jugées excessives, traduisent sans doute une surestimation de la croissance. A l'inverse, les experts ne constatent pas, ou pas avec une telle ampleur, la diminution des quantités d'herbe sur pied simulées en cas de déficit hydrique persistant. En l'état actuel, le modèle rend compte imparfaitement de l'utilisation du stock sur pied. Cependant, sur la période considérée, ces décalages n'ont qu'une incidence limitée sur le déroulement du pâturage.

FIGURE 5 : Croissance de l'herbe simulée (climat de Rennes) et estimée par des mesures de hauteur (région de Mauron) pour la période 1994-1999.

FIGURE 5 : Simulated grass growth (Rennes climate) and the same as estimated by height measurements (region of Mauron) in 1994-1999.



Du point de vue du champ d'application du modèle, nos partenaires souhaiteraient que la période simulée soit étendue jusqu'à l'automne. D'une part, la gestion du pâturage en fin de saison nécessite autant d'expertise. D'autre part, pour les systèmes où le pâturage est prépondérant, il est difficile de juger de la validité d'une conduite au printemps sans évaluer ses effets en été (stocks sur pied) et en automne. Une extension du modèle de croissance à des associations ray-grass anglais et trèfle blanc permettrait de mieux vérifier le réalisme de ces stratégies dont la sécurité repose sur la complémentarité des espèces.

Les simplifications choisies pour la conduite du troupeau (une vache moyenne, une date de vêlage unique) n'empêchent pas la définition et l'évaluation de différentes conduites de pâturage. Il est toujours possible de faire varier ces paramètres moyens, comme cela a été montré pour le potentiel de production laitière, de façon à tester la robustesse des stratégies de pâturage.

* Evaluation du modèle de décision

Alors que les descriptions des stratégies élaborées nous avaient paru déjà précises, les transcrire dans le cadre de modélisation proposé par le logiciel a nécessité des adaptations, tant du logiciel que des règles de décision. La construction du langage facilite plutôt l'écriture de stratégies très planifiées, avec un nombre limité d'alternatives prédéfinies suivant les conditions climatiques. Au contraire, les menus les plus "pâturant" basent leur sécurité sur la souplesse d'utilisation du parcellaire et de la complémentarité. Les possibilités du langage ont été étendues pour décrire ces systèmes moins planifiés, autorisant une grande mobilité d'affectation des parcelles.

Malgré cela, l'écriture reste assez complexe : plus on cherche à augmenter la part des adaptations au jour le jour, plus on accroît le nombre de conditions et d'indicateurs mobilisés pour décrire une règle.

Par ailleurs, les menus déjà assez détaillés comportent une grande part de connaissances implicites et qualitatives qui font encore appel à l'expertise acquise ou à acquérir par l'éleveur. Le simulateur utilise les règles définies par les experts ; ces règles n'ont pas toujours le niveau de finesse nécessaire pour s'adapter aux aléas. En effet, en cours de campagne, les éleveurs réalisent des compromis, font appel à leur expérience, s'appuient sur les conseils donnés et finalement prennent une décision différente de celle qu'ils auraient pu énoncer. En l'absence de ce filtre, les règles proposées sont immédiatement appliquées. Par exemple, la règle "changer de parcelle dès que la hauteur d'herbe résiduelle atteint 5 cm" s'applique-t-elle vraiment jusqu'à fin juillet ? L'écriture des règles a nécessité à la fois un travail d'explicitation avec les conseillers et de nombreux

compromis pour les coder dans le formalisme du logiciel. Durant cette phase, les confrontations des experts entre eux et avec les modélisateurs ont été particulièrement intéressantes pour approfondir certains points, faire apparaître des divergences... Les difficultés rencontrées soulignent la difficile transmission des savoir-faire sur le pâturage. Par exemple, comment définir, programmer et transmettre "une parcelle est portante au jour J" ? Pourtant considérée comme centrale dans le déroulement du pâturage, cette notion n'a pas été intégrée dans l'expression des stratégies, faute d'une représentation précise et commune. De même, des règles de menus du type "faucher [...] si plus de 30 jours de repousse [...]" ; "on peut pâturer [...] même avec un âge avancé des repousses" font largement appel à l'appréciation personnelle de l'éleveur et du conseiller sur ce qui est pâturable ou ne l'est pas. C'est donc à la suite de compromis successifs que les stratégies ont été codées.

Dans ces conditions, il n'est pas imaginable de valider SEPATOU avec un jeu d'essais qu'il faudrait reproduire. Un éleveur prend les décisions qu'il juge adaptées à la situation telle qu'il la perçoit un jour donné, en se basant sur son expérience passée et éventuellement celle de son entourage (reprise de la complémentation en anticipation d'une sécheresse durable ; fauche en mauvaises conditions pour dégager des parcelles quand la météo n'annonce pas d'amélioration prochaine...). Comme le module décisionnel ne dispose que des anticipations qu'on lui indique, il devient trop complexe et inopérant de définir la stratégie à ce niveau de détail. C'est pourquoi le logiciel n'est pas destiné à reproduire des situations réelles dans toute leur complexité et leur finesse. En revanche, le simulateur permet de produire un déroulement de pâturage probable en fonction de stratégies typées décrites par des experts. En l'état actuel, les conseillers qui ont participé à cette évaluation ont considéré les différentes sorties comme vraisemblables. Il reste cependant à affiner cette première approche. C'est en faisant varier successivement différents paramètres dont on estime qu'ils sont importants pour la définition d'une stratégie de pâturage et en examinant les conséquences, sur une diversité d'années climatiques, qu'on pourra estimer la robustesse du modèle et préciser son domaine de validité.

*** Un simulateur pour qui et pour quoi?**

Nous avons constaté pendant les tests que SEPATOU permet d'affiner et compléter l'expertise des conseillers d'élevage dans la définition et l'évaluation de stratégies de pâturage de vaches laitières. Habituellement, les conseillers peuvent dire ce qu'ils ont préconisé et ce qui est résulté des actions de l'éleveur. Il leur est cependant plus difficile d'expliquer ce que l'éleveur a fait, en fonction de quelles règles, et donc d'estimer les effets induits par les conseils donnés.

L'un des rôles de SEPATOU peut ainsi être de confronter des conseillers à l'explicitation et à l'application des règles qu'ils définissent, en leur proposant une expérimentation virtuelle. SEPATOU propose des résultats qui permettront d'évaluer les conséquences de nouvelles stratégies et d'imaginer de nouvelles variantes. Outre l'intérêt de pouvoir évaluer une stratégie et ses variantes, SEPATOU amène une réflexion approfondie sur la conduite de pâturage lors de la phase de description de stratégies. En effet, il est nécessaire de formaliser plus finement et complètement l'expertise que ce qui est fait couramment.

Cela permet ainsi de mettre en lumière des règles habituellement implicites.

La traduction des stratégies dans le cadre formel défini reste assez complexe. Cette phase nécessite une personne disposant à la fois d'une expertise technique et d'une bonne connaissance du logiciel, de ses règles et des limites de validité, plus généralement, d'un minimum d'aptitudes ou de goût pour une programmation informatique simplifiée. En revanche, définir des variantes de stratégies (modification des règles de mise à l'herbe ou des règles de sortie de parcelles) par modification de paramètres et réaliser leurs simulations peut être fait par des ingénieurs du développement agricole ou de la recherche spécialisée, après avoir pris connaissance du cadre de modélisation proposé et de la façon d'utiliser SEPATOU.

En obligeant à expliciter et discuter collectivement des règles de décision, SEPATOU peut permettre la construction de représentations collectives de conduites de pâturage. En permettant de simuler ces règles suivant différents scénarios climatiques, SEPATOU permet un apprentissage par "essais - erreurs". Les résultats des simulations, confrontés à la mise en commun de l'expérience passée, permettent de s'interroger sur les règles de décisions proposées et la validité des indicateurs utilisés. Le logiciel peut ainsi jouer le rôle d'un outil de formation et d'animation, en étant utilisé par un conseiller avec un groupe d'agriculteurs.

Travail présenté aux Journées d'information de l'A.F.P.F.
"Nouveaux regards sur le pâturage",
les 21 et 22 mars 2001.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

COLENO F.C., Du RU M. (1998) : "Gestion de production en système d'élevage utilisateurs d'herbe: une approche par atelier", *Etudes et Recherches, Syst. Agraires Dév.*, 31, 45-61.

CROS M.J., DURU M., GARCIA F., MARTIN-CLOUAI RE R (2000a) : *Gestion du pâturage tournant: modèle biotechnique pour l'aide à la définition de stratégies*, document interne de l'Unité de Biométrie et Intelligence Artificielle, INRA, Auzeville.

CROS M.J., DURU M., GARCIA F., MARTIN-CLOUAIRE R (2000b) : *Gestion du pâturage tournant: modèle décisionnel pour l'aide à la définition de stratégies*, document interne de l'Unité de Biométrie et Intelligence Artificielle, INRA, Auzeville.

DELAVEAU A., CHAPPELLE P., PERROT C., TCHAKÉRIAN E., VÉRON J. (1999) : "La cohérence des techniques fait le résultat économique. Les enseignements de l'approche globale appliquée aux exploitations d'élevage", *Rencontres Recherches Ruminants*, 6, 3-10.

DURU M. (2000) : "Le volume d'herbe disponible par vache: un indicateur synthétique pour évaluer et conduire un pâturage tournant", *Productions animales*, 13 (5), 325-336.

DURU M., FEUILLERAC E., DUCROCQ H. (1999) : "In vitro digestibility response of cocksfoot (*Dactylis glomerata* L) to growth and defoliation: a simple model", *J. of Agric. Sei.*, 133,379-388.

DURU M., DUCROCQ H., BOSSUET L (2000) : "The herbage volume per animal: a tool to manage a rotational grazing system in spring", *J. of Range Management*, 53, 395-402.

DURU M., HAZARD L., JEANGROS B., MOSIMANN E. (2001) : "Fonctionnement de la prairie pâturée : structure du couvert et biodiversité", *Fourrages*, 166, 165-188.

LE DU Y.L.P., COMBELLAS J., HODGSON J. (1979) : "Herbage intake and milk production by grazing dairy cows. 2 The effects of level of winter feeding and daily herbage allowance", *Grass Forage Sei.*, 36, 249-260.

LE DU Y.L.P., BAKER RD., NEWBERRY R.D. (1981) : "Herbage intake and milk production by grazing dairy cows. A Effects of grazing severity under continuous stocking", *Grass Forage Sei.*, 36, 307-318.

LEMAIRE G. (1999) : "Les flux de tissus foliaires au sein des peuplements prairiaux. Eléments pour une conduite raisonnée du pâturage", *Fourrages*, 159, 203-222.

LEMAIRE G., GASTAL F. (1997) : "N Uptake and distribution in plant canopies", *Diagnosis of the nitrogen status in the erops*, Springer Verlag, 3-44.

OSTY P.L., LARDON S. (1999) : "Livestock rearing modes to characterise the long-term change in sheep farming in less-favoured areas", *Proe.5" Int. Livestock Farming Systems Symp.*, Posieux (Fribourg, Switzerland), 1920 August 1999, EAAP Publication, 97,194-197.

THÉBAULT M., DEQUIN A., FOLLET D., GRASSET M., ROGER P. (1998) : *Dossier: 5 menus pour vaches laitières au pâturage: le pâturage au quotidien, du plan d'alimentation à la conduite de l'herbe. Guide pratique de l'éleveur*, Chambre Régionale de Bretagne, Rennes.

SUMMARY

SEPATOU, a simulator of grazing strategies, is confronted with the breton 'menus'

Grazing simulators are created with a view to assist the farm advisors in the definition and valuation of grazing strategies, because of the difficulty of anticipating the effects of the changes in one or several practices such as nitrogen fertilization or the place of maize silage in spring feeding. SEPATOU is a simulator working through the interaction of two sub-models. The biotechnical sub-model simulates 1/ the growth and quality of the herbage, 2/ its intake, 3/ the milk production. In the decision-making sub-model can be represented : rules for organizing, rules for adapting (to hazards, especially climatic ones), and rules for day-to-day decisions. The simulator's main outputs are grazing and feeding schedules, and potential and simulated production curves. SEPATOU has been tested on three of the typical cattle feeding strategies defined in Brittany, which differ by the place of grazing. The simulation results : schedules of simulated events (turnout date, silo closure...) and grazing schedules (stocking rate and its variations during the year) are briefly described and found consistent with the 'experts' expectations.

SEPATOU, by imposing collective clarification and discussion of the rules for decision-making, makes it possible to set up collective representations of grazing management. The rules can be simulated according to different climatic sequences, so that SEPATOU may serve as a learning tool by trial and error. When it is used by a farm advisor with a group of farmers, it will be a tool for formation and animation.