

COMMENT LEVER LA CONTRAINTE CLIMATIQUE SUR L'HIVERNAGE DES TROUPEAUX OVINS DANS LES PYRÉNÉES ?
LES RÉPONSES APPORTÉES PAR DES SIMULATIONS

DANS LES PYRÉNÉES CENTRALES, L'HIVERNAGE CONSTITUE UNE CONTRAINTE IMPORTANTE DU FAIT D'UNE PART DE L'INSUFFISANCE QUALITATIVE ET QUANTITATIVE des ressources stockées et de la mauvaise maîtrise de la reproduction des troupeaux, et d'autre part de l'irrégularité du climat. En effet, l'hiver est le point de convergence des différents aléas climatiques qui peuvent intervenir tout au long de l'année :

— la longueur de l'hiver dépend à la fois des premières neiges, des gelées automnales et du démarrage de la végétation au printemps suivant ;

— à longueur d'hiver égale, la quantité de fourrage nécessaire dépend des possibilités de pâturage hivernal, c'est-à-dire de l'importance de l'enneigement ;

— la quantité de foin récoltée en vue de l'hiver dépend du climat du printemps précédent ;

— enfin, la qualité de ce foin dépend de la pluviométrie estivale.

Le problème ainsi posé peut se résumer de la façon suivante : quels sont les points de blocage dans la structure et la gestion des exploitations et comment s'affranchir de cette contrainte multiforme et aléatoire que constitue le climat ?

Nous essayons ici de montrer sur cet exemple pourquoi nous avons entrepris une démarche de modélisation et à quelles réflexions nous ont conduit les résultats de nos simulations.

I - DE L'ANALYSE DU PROBLÈME AU MODÈLE

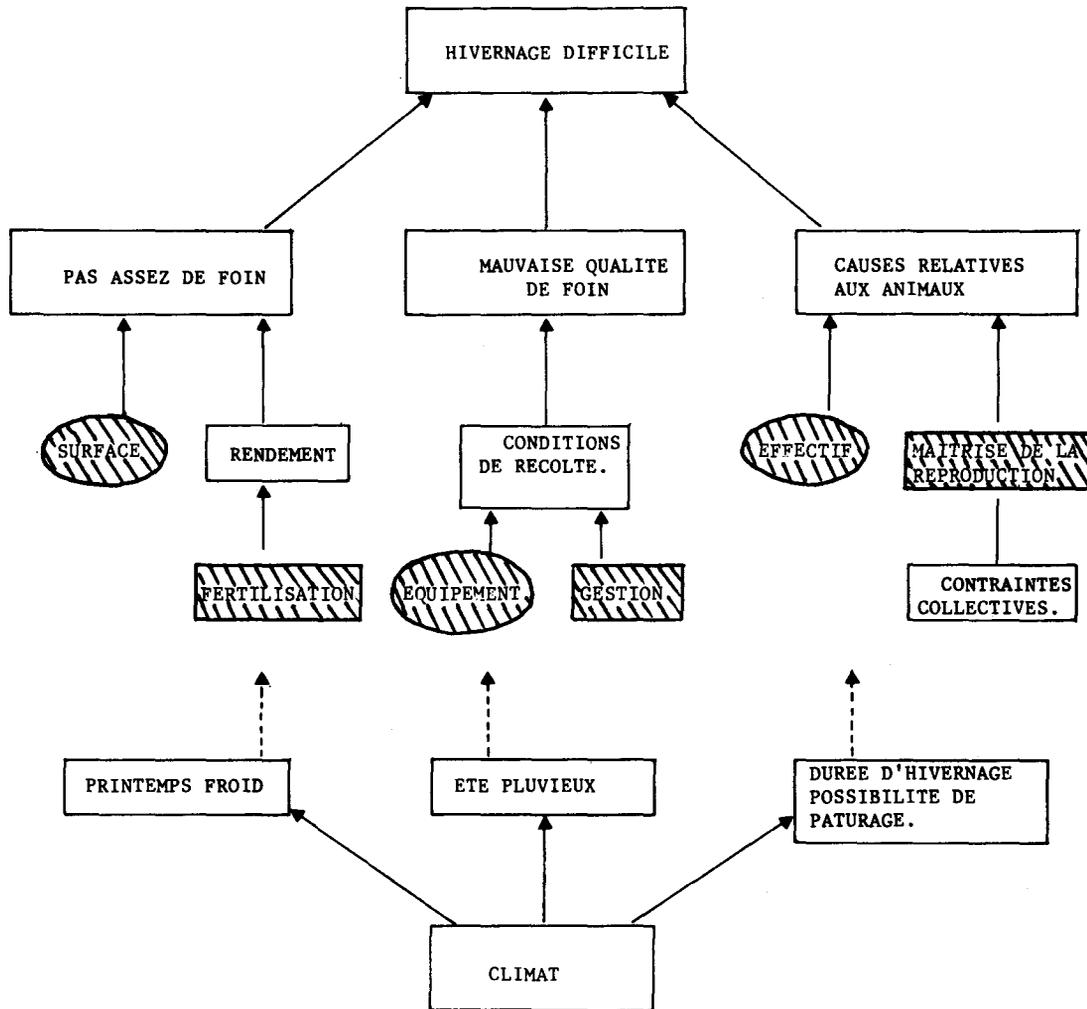
Dans ce contexte, l'analyse des déterminants d'un hivernage difficile peut se faire classiquement, en employant une méthode analytique, sectorielle. Dans notre cas, cela consiste par exemple à faire la liste, si possible exhaustive, des causes de difficultés d'hivernage. Cet inventaire étant fait, des synthèses partielles conduisent à classer les causes de difficultés en différentes catégories et à élaborer une première représentation graphique du problème étudié. Nous en présentons un exemple simplifié sur la figure 1. Dans ce schéma nous avons distingué des causes relatives à la structure de l'exploitation (surface, équipement), d'autres relatives à la gestion de l'exploitation (fertilisation, gestion des stocks, conduite du troupeau) et enfin les causes relatives à l'environnement de l'exploitation qu'elles soient fixes (environnement social, pratiques collectives d'élevage) ou aléatoires (climat). La dernière phase de cette démarche consisterait à essayer de raisonner quelles solutions techniques apporter aux différents problèmes ainsi soulevés. C'est ainsi que dans notre cas on pourrait penser lever la contrainte climatique globale par une augmentation du foncier, une amélioration de la fertilisation ou de la chaîne de récolte du foin.

En fait, cette démarche volontairement caricaturée ne peut structurellement répondre de façon satisfaisante au problème global posé. Et cela parce que :

* l'étude ainsi menée est « statique » : elle ne prend pas en compte le caractère aléatoire de certaines causes de difficultés ; on ne peut, par exemple, évaluer les résultats d'une stratégie de type régulation qui met en œuvre au coup par coup des améliorations ponctuelles ;

*Modélisation de
l'hivernage
dans les Pyrénées*

FIGURE 1
INVENTAIRE DES PRINCIPALES CAUSES
D'HIVERNAGE DIFFICILE



 variables de structure

 variables de gestion

 effet aléatoire

* les liaisons entre les différentes causes et leurs poids respectifs ne sont pas évalués, ce qui empêche en particulier d'évaluer les possibilités de compensation entre les différents postes ;

* enfin, le résultat escompté des améliorations proposées n'est pas quantifié, ce qui empêche la comparaison entre différentes stratégies d'amélioration.

Nous pensons qu'une solution pour passer outre ces blocages est apportée par une démarche de type modélisation. Construire un modèle c'est, à notre sens, d'abord considérer l'exploitation agricole comme un système dynamique susceptible, autour d'une structure stable, d'évoluer au cours du temps. Etudier le fonctionnement de ce système, c'est essayer de représenter de façon presque « mécaniste » les différents rôles des variables prises en compte dans l'élaboration du résultat. Par rapport à la démarche précédente, qui consisterait à établir un schéma de type « cause-effet », nous cherchons ici à représenter notre système par un schéma fonctionnel. Une condition nécessaire à l'établissement d'une représentation cohérente du système est la classification du statut de chacune des variables considérées (variables d'état, de contrôle de flux). Ce schéma permet dans un premier temps d'appréhender le degré de connaissance que l'on possède pour les différents points du système. La dernière phase de cette entreprise consiste à quantifier ce schéma fonctionnel, c'est-à-dire à remplacer chaque relation du schéma soit par une équation algébrique, soit par un algorithme. Cette opération se fait en mobilisant l'ensemble des connaissances que l'on possède sur le problème de quelque provenance qu'elles soient (bibliographie, expérience, enquête, etc.).

Formellement, cela revient à construire une fonction du type :

$R_i = f(\theta_i, M, S)$ où R_i est le résultat du système l'année i , θ_i l'ensemble des variables climatiques cette même année, M et S représentant respectivement l'ensemble des variables de gestion et de structure. On cherchera ensuite selon l'objectif de l'étude soit à maximiser la moyenne de cette fonction soit à travailler sur sa variance en faisant varier les différents paramètres de la fonction. On prend ainsi en compte les possibilités de compensation entre les différents postes du schéma fonctionnel et le caractère aléatoire de certaines causes de difficultés. Le caractère quantitatif du

résultat permet d'apprécier l'impact respectif des différentes variables. C'est en suivant à peu près cette démarche que nous avons construit notre modèle.

II - CONCEPTION ET CONSTRUCTION DU MODÈLE « PYRÉNÉES »

Les objectifs assignés à ce modèle sont de trois ordres :

— Il doit représenter le mieux possible les mécanismes d'intervention des différentes contraintes climatiques, leur hiérarchie et leurs interactions sur le résultat final de l'hivernage.

— Il doit nous permettre de déceler quels paramètres de structure de l'exploitation seront les déterminants de la sensibilité de cette exploitation et éventuellement quelle gamme de variation de ces paramètres est admissible.

— Enfin nous espérons pouvoir, après l'analyse du fonctionnement de cette partie du système d'exploitation qu'est la constitution des stocks de fourrage et leur consommation, être capables de déceler et d'analyser des possibilités d'interventions ponctuelles déclenchées au vu de la situation (régulations).

Nous n'avons pas conçu ce modèle comme un producteur potentiel de références. En effet, dans cette étude c'est plus la comparaison entre deux simulations que la valeur du résultat de chacune d'elle qui nous intéresse. C'est pourquoi nous ne pouvons qualifier notre modèle de « biologique » et c'est également la raison pour laquelle les deux principaux phénomènes biologiques mis en œuvre sont modélisés de façon assez sommaire (bibliographie pour l'alimentation des animaux et relation linéaire pour la pousse de l'herbe). Toujours dans le même esprit d'analyse du fonctionnement d'un processus, notre modèle n'est pas prévisionnel. C'est pourquoi tous les événements sont pris en compte de façon entièrement déterministe et les effets partiels du climat sur le fonctionnement des parties du système pris en compte a posteriori (exemple : climat du printemps sur la récolte de foin, longueur de l'hiver sur le nombre de rations à distribuer).

Ainsi défini, voyons maintenant la composition de ce modèle. L'ensemble du fonctionnement du système est représenté sur la figure 2. Nous avons choisi pour cette représentation les conventions de FORRESTER (FORRESTER, 1980) : les rectangles figurent les variables d'état du système, les cercles représentent les calculs intermédiaires nécessaires, les flux de matière sont représentés en traits pleins et les flux d'information en tiretés. Par ailleurs, le symbole de la vanne est employé lorsqu'il s'agit d'un point où l'on peut intervenir sur un flux.

Le modèle se décompose en deux parties : une partie dans laquelle les calculs se font une fois et une seule dans l'année, c'est le calcul des paramètres de la récolte de foin (quantité, qualité), une autre partie dans laquelle les calculs sont journaliers ou presque, c'est la consommation de cette récolte par les animaux. Cette façon de procéder montre en outre concrètement pourquoi il est impossible d'utiliser ce modèle pour faire de la prévision. En effet, le poids et les caractéristiques des rations offertes sont déterminés d'après la connaissance exacte de l'hiver.

Les variables de structure et de conduite technique que nous avons choisi de faire varier sont :

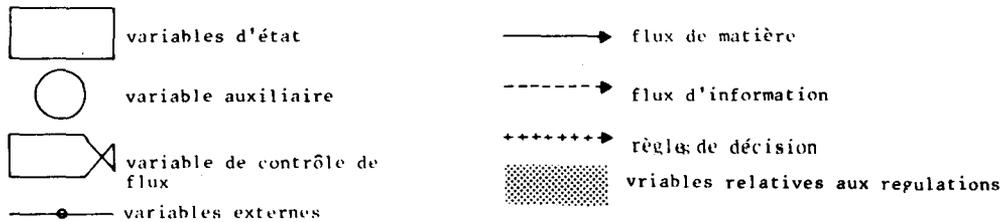
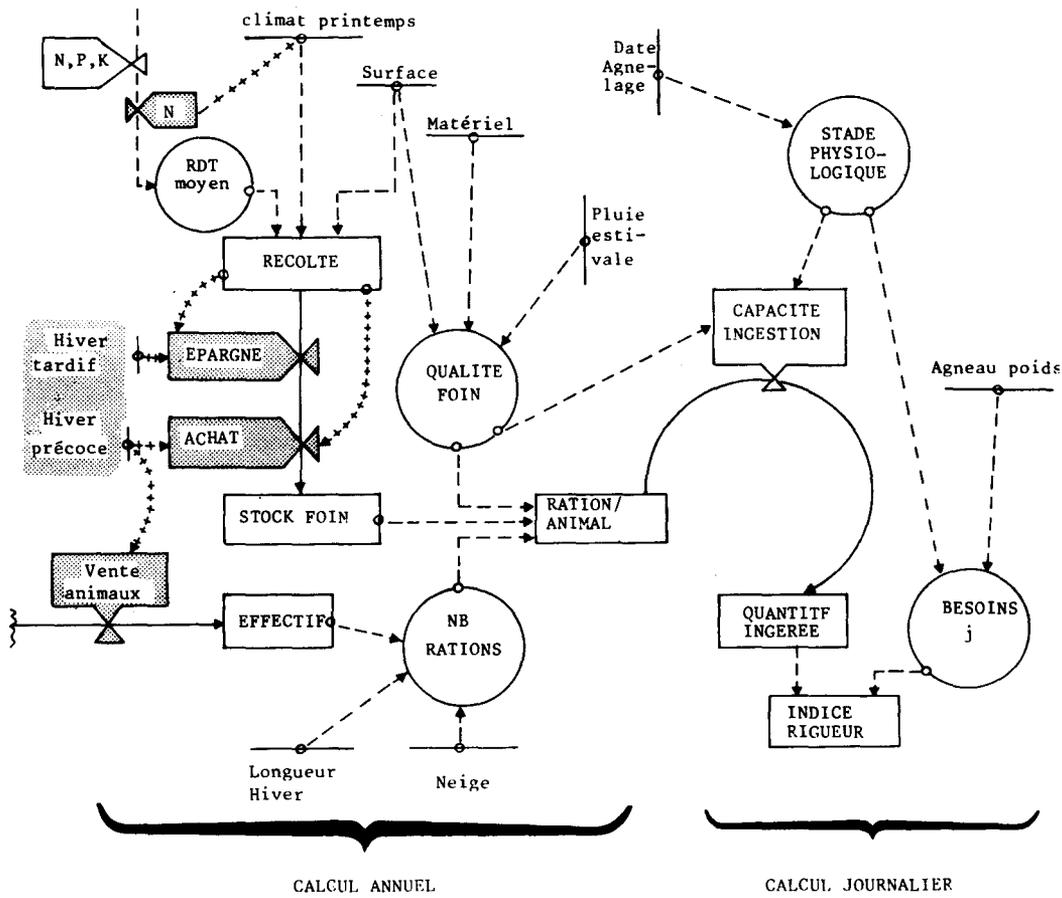
- la surface fauchée,
- le rendement moyen des prés fauchés,
- la capacité de la chaîne de récolte (matériel, main-d'œuvre),
- la taille du troupeau,
- la période et les modalités d'agnelage (groupé à l'automne ou dispersé uniformément durant tout l'hiver).

Nous appelons ces différentes variables les « commandes » du système. Leur champ de variation est précisé dans l'annexe 2.

Les entrées sont constituées uniquement des données climatiques relatives aux différentes périodes de l'année, c'est-à-dire :

- l'indice de potentialité climatique de TURC (TURC, 1972) cumulé sur la période du 1^{er} mai au 5 juillet pour le printemps et la détermination de la biomasse récoltable ;

FIGURE 2
 DIAGRAMME DE FORRESTER DU SYSTÈME ÉTUDIÉ



— les séquences de jours avec et sans pluie pour la période estivale pour déterminer les possibilités de récolte du foin et ainsi la qualité moyenne du foin (DURU, 1981) ;

— la longueur de l'hiver ;

— les séquences de jours où la neige couvre ou non le sol pendant l'hiver pour calculer le nombre de rations à fournir pour l'hivernage.

Dans un deuxième temps nous avons envisagé la possibilité d'intervenir sur le fonctionnement de l'exploitation de façon non systématique. Alors que précédemment, tout changement dans les valeurs d'une ou plusieurs variables de commande était définitif, cette nouvelle optique vise à étudier l'effet de modifications temporaires du système de production. Nous appelons ces modifications des « régulations ». Elles visent essentiellement à contrebalancer des effets négatifs du climat et sont définies comme suit :

— possibilité de fertilisation azotée en cas de démarrage tardif de la végétation,

— achat de foin si la récolte est insuffisante,

— achat de foin ou diminution de l'effectif du troupeau si l'hiver est précoce,

— combinaison de ces régulations.

De plus, la possibilité d'une gestion des stocks de foin par report d'une année sur l'autre a été envisagée.

Enfin, la sortie de notre modèle, c'est-à-dire la fonction R_i précédemment décrite, est constituée par le calcul d'une quantité que nous appelons « indice de rigueur de l'hiver ». Cet indice est égal au produit du déficit global en énergie ou en azote sur l'hiver par la quantité d'énergie ou d'azote que doit obligatoirement prélever l'animal au pâturage pour équilibrer ses besoins, divisé par 10^3 . Ainsi, nous prenons en compte à la fois l'importance du déficit alimentaire et sa répartition au cours de l'hiver. Les besoins sont calculés de façon à assurer une croissance des agneaux de 200 g par jour (I.N.R.A., 1978).

Par construction, à chaque flux d'information représenté sur la figure 2 correspond soit une fonction algébrique, soit un algorithme de calcul ou d'exploration de données. Cet ensemble constitue la partie « matérielle » de notre modèle ; nous le présentons, ainsi que les règles de décision concernant l'intervention des régulations, en annexe 1.

III - RÉSULTATS DES SIMULATIONS

1. Simulation de différentes hypothèses de structure d'exploitation et de conduite technique

L'exploration d'un champ de variation suffisamment large pour les variables de commande du système ainsi que l'introduction des régulations nous ont conduit à effectuer un nombre considérable de simulations. De cet ensemble de résultats nous présentons en premier lieu ceux relatifs à 4 hypothèses de structure d'exploitation et de conduite technique.

a) Résultats pour les 4 hypothèses

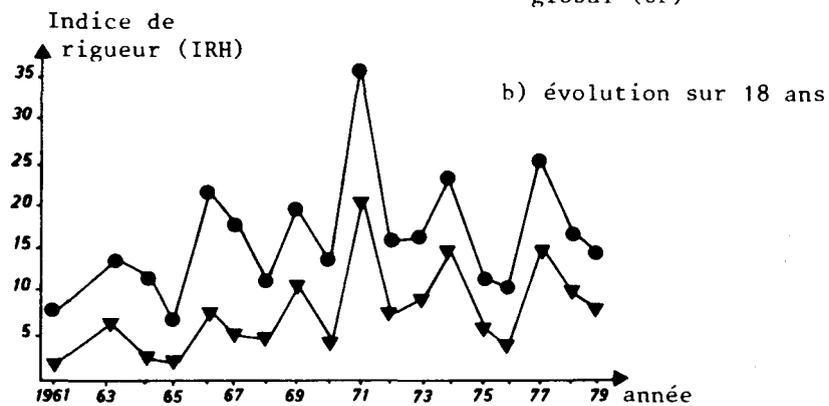
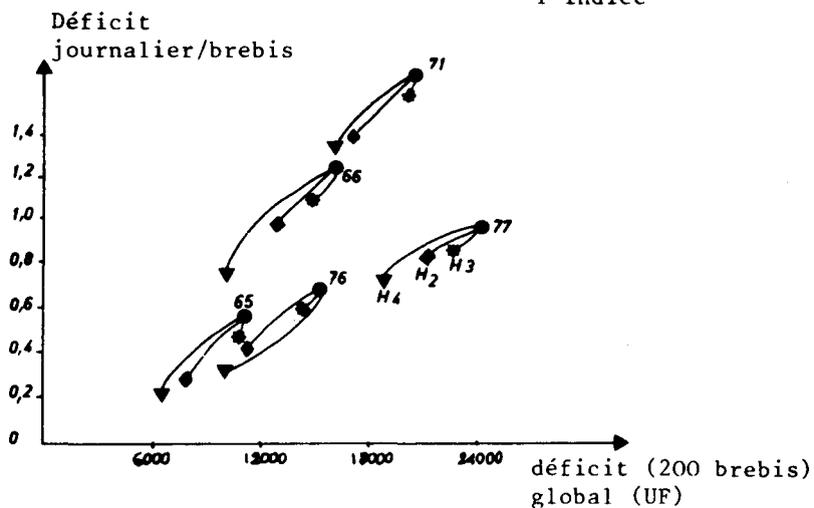
Dans ces hypothèses, l'une constitue une référence couramment rencontrée dans les exploitations (H1), les autres représentant des améliora-

TABLEAU I
HYPOTHÈSES DE STRUCTURE D'EXPLOITATION
ET DE CONDUITE TECHNIQUE

Hypothèse	N°	Surface fauchée (ha)	Rdt moyen (t/ha)	Stock ingéré (t)	Indicateur chaîne récolte
Situation de départ	H1	6,8	3,5	23,8	3,0
Amélioration récolte	H2	6,8	3,5	23,8	0,7
Amélioration rendement	H3	6,8	4,5	30,6	3,0
Amélioration conjointe récolte-rendement	H4	6,8	4,5	30,6	0,7

FIGURE 3
INDICE DE RIGUEUR DE L'HIVER POUR L'ÉNERGIE ;
CAS DE L'AGNELAGE GROUPE

a) les deux composantes de l'indice



Légende : ● H1 ◆ H2
 ◆ H3 ▼ H4

Modélisation de l'hivernage

tions pour la chaîne de récolte (H2), pour la fertilisation (H3) ou pour ces deux améliorations cumulées (H4) (tableau I). Les calculs ont été effectués dans tous les cas avec un troupeau de 200 brebis. De plus, nous ne présentons ici que les résultats relatifs à l'énergie (U.F.) et dans le cas d'un agnelage groupé.

Sur la figure 3a nous avons représenté quelques années caractéristiques dans les repères des deux « composants » de l'indice. Par commodité, nous appellerons désormais indice de rigueur le produit de ces deux composants divisé par 10^3 . Puis, pour l'ensemble des années nous avons représenté les valeurs et les variations de l'indice (figure 3b).

Sur le premier graphique (figure 3a), les déplacements des coordonnées de l'indice pour les hypothèses H2, H3, H4, relativement à l'hypothèse de référence, montrent que la variabilité interannuelle est supérieure aux variations induites par les différentes hypothèses. Dans le tableau II sont indi-

TABLEAU II
INDICE DE RIGUEUR DE L'HIVER POUR L'ÉNERGIE
AVEC AGNELAGE GROUPÉ
 (Statistiques élémentaires)

Hypothèses	Indice énergie		
	moyenne	écart type	CV (%)
H1	16,6	6,8	41
H2	9,8	5,5	56
H3	14,8	6,5	44
H4	8,0	5,1	64

quées les moyennes, les écarts types et les coefficients de variations de l'indice correspondant à la figure 3b. D'une manière générale, l'amélioration de l'efficacité (moyenne de l'indice) va de pair avec celle de la *sensibilité* (variance de l'indice).

A ce niveau, notons pour mémoire que les graphiques relatifs à l'azote (M.A.D.) montreraient des effets différents des améliorations de structure. En particulier, l'hypothèse H3 améliore plus l'indice azote que l'indice énergie.

De plus, dans le cas d'un troupeau de 100 brebis, avec les mêmes caractéristiques de chaîne de récolte et de stock espéré par brebis, l'indice de rigueur « énergie » est réduit de 5 à 10 % et celui « azote », de 12 à 34 %. Cette réduction plus importante de l'indice azote s'explique par la réduction de la durée de fenaison.

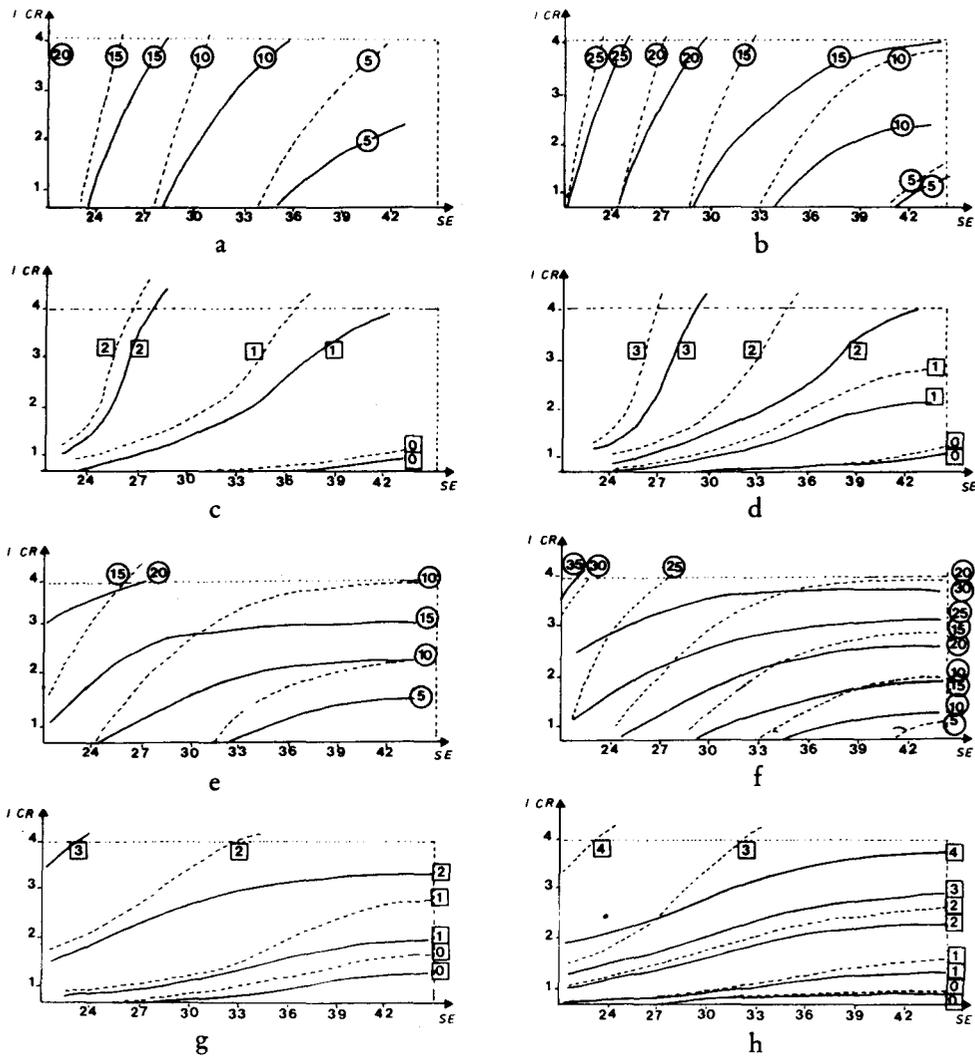
Le fait que les courbes de la figure 3b ne se recoupent quasiment jamais, ainsi que la persistance d'une grande variabilité interannuelle nous font penser que l'amélioration des structures (en restant dans le domaine du « raisonnable » économiquement) n'est pas capable de résoudre de façon satisfaisante les problèmes de l'hivernage. En effet, la persistance d'hivernages difficiles laisse entier le problème d'une répercussion d'une année sur l'autre des effets néfastes de cet hivernage (état du troupeau, performances de reproduction, etc). Il faut donc envisager la possibilité d'intervenir au coup par coup, éventuellement plusieurs fois dans l'année si nécessaire.

b) Résultats pour la gamme de variation des variables

Pour étudier les poids respectifs de chacune des variables et l'effet de leurs interactions nous avons prospecté un champ de variation dont les valeurs sont indiquées en annexe 2. Sur la figure 4 sont mentionnées les valeurs des moyennes et des écarts types de l'indice de rigueur de l'hiver, selon le stock de foin espéré pour 200 brebis, et la capacité de la chaîne de récolte pour 18 années climatiques. Les résultats sont présentés pour 2 rendements moyens (3,5 ou 5,5 t M.S./ha) et pour 2 modalités d'agnelage (groupé à l'automne ou dispersé durant la période hivernale). Nous analysons ci-dessous le poids de chaque variable.

FIGURE 4
VARIATIONS DE L'INDICE DE RIGUEUR DE L'HIVER

(agnelage groupé : a, c, e, g ; agnelage dispersé : b, d, f, h)
 (indice énergie : a, b, c, d ; indice azote : e, f, g, h)



SE Stock espéré pour 200 brebis (t de MS)
 ICRA Indicateur de chaîne de récolte (jour/ha)
 ○ Moyenne de l'indice
 □ Ecart type de l'indice
 — Résultats obtenus rendement de 3,5 t MS/ha
 - - - " " " " de 5,5 t MS/ha

Capacité de la chaîne de récolte

Son effet est important sur la moyenne et l'écart type de l'indice de rigueur azote (figure 4e, f, g, h). Le fait de passer d'une chaîne de récolte peu performante (récolte à la motofaucheuse) à une chaîne de récolte plus efficace (type ensilage) diminue l'indice de rigueur de l'hiver d'un facteur 3. Par contre, cette variable a peu d'effet sur l'indice énergie (figure 4a, b, c, d).

Production à l'hectare et surface récoltée

Ces 2 variables doivent être étudiées conjointement, leur produit étant égal au stock espéré. La moyenne et l'écart type de l'indice énergie sont sensibles au stock espéré (105 à 210 kg M.S./brebis mère). Pour un stock donné, une plus grande surface fauchée avec un rendement faible conduit à des valeurs plus importantes de l'indice (moyenne et écart type) sauf pour des chaînes de récolte très performantes. Pour une surface donnée, les différences de rendement conduisent à des stocks disponibles par brebis variables. L'effet de la fertilisation est surtout important sur l'indice énergie.

Période d'agnelage

D'une manière générale, dans le cas de l'agnelage groupé à l'automne (figure 4a, c, e, g) les résultats sont bien meilleurs que pour l'agnelage dispersé durant tout l'hivernage (figure 4b, d, f, h). Ces différences se retrouvent quels que soient l'efficacité de la chaîne de récolte ou le stock disponible par brebis. Pour une chaîne de récolte donnée, les situations avec agnelage dispersé demandent plus de réserves de foin que dans le cas de l'agnelage groupé afin d'obtenir les mêmes valeurs de l'indice énergie. Si on considère l'indice azote, il est nécessaire d'avoir une chaîne de récolte plus performante dans le cas de l'agnelage dispersé pour obtenir des résultats voisins des situations à agnelage groupé.

Ces différences importantes sont dues principalement au fait que pour l'agnelage groupé (1^{er} octobre), la période de forts besoins arrive avant la période de début d'affouragement (25 octobre - 1^{er} décembre). En réalité, ces différences sont surestimées dans la mesure où les éleveurs tendent à commencer l'affouragement des mères dès l'agnelage.

2. Simulation d'ajustements saisonniers pour réduire la variabilité interannuelle de la rigueur de l'hiver

Dans le cas des situations les moins performantes, nous avons simulé l'effet d'ajustements visant à augmenter les ressources ou diminuer les besoins conjoncturellement. Dans le cas des situations les plus performantes, nous avons simulé une meilleure répartition des ressources en effectuant, dans le cas des années les plus favorables, des reports de foin pour les années suivantes.

a) Cas des situations les moins performantes

L'effet des ajustements sur la rigueur de l'hiver dépend des caractéristiques propres de l'ajustement considéré et du type d'année où il est mis en œuvre.

Les résultats du tableau III montrent que l'apport d'azote au printemps (R1), l'achat de foin après une récolte médiocre (R3) réduisent très peu les moyennes et les écarts types des indices de rigueur : R1 est mise en

TABLEAU III
INDICES DE RIGUEUR DE L'HIVER POUR DIFFÉRENTES
HYPOTHÈSES DE STRUCTURE ET DE RÉGULATION
(Moyenne et écart-type)

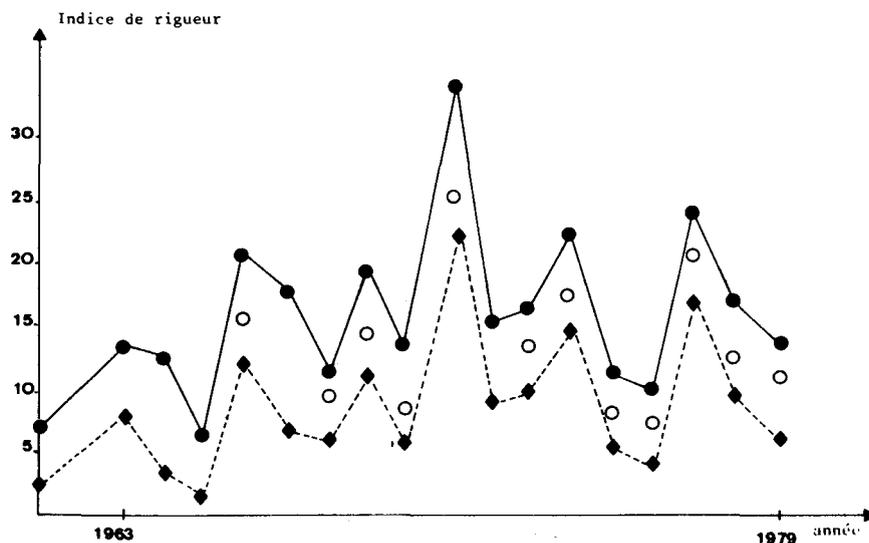
	Indice énergie			Indice azote		
	moyenne	écart-type	C.V. %	moyenne	écart-type	C.V. %
H1	16,6	6,8	41	17,2	6,9	40
H2	9,8	5,5	56	11,2	6,0	54
H1 R1	15,2	7,0	46	16,0	7,4	56
H1 R2	12,9	4,5	35	13,7	4,4	32
H1 R3	16,1	6,8	42	16,8	6,8	41
H1 R4	14,2	4,9	34	15,0	4,9	33
H1 R10	13,6	5,0	36	14,7	5,7	39

œuvre les hivers difficiles mais son effet est mineur. R3 est mise en œuvre pour des hivers moyens et difficiles mais son effet est dans tous les cas peu important.

L'achat de foin (R4) ou la réduction de la taille du troupeau (R2) en cas d'hiver précoce réduisent de manière notable les moyennes des indices énergie et azote et de manière très importante leur écart type. Comme le montre la figure 5, R2 et R4 sont déclenchées pour les 4 hivers les plus rigoureux mais ces hivers restent parmi les plus difficiles. On peut néan-

FIGURE 5
COMPARAISON DES INDICES DE RIGUEUR ÉNERGIE
POUR LES HYPOTHÈSES H1 (AVEC ET SANS RÉGULATION)
ET H2 (SANS RÉGULATION)

- H1 avec régulation
- H1 sans régulation
- ◆ H2 sans régulation



Modélisation de l'hivernage

moins affirmer qu'un achat de foin plus important réduirait plus fortement la variabilité interannuelle. La régulation R10 (combinaison de R1, R3, R4) donne des résultats voisins des régulations R2 et R4. Ces résultats montrent que la variabilité de l'indice de rigueur pour l'hypothèse H1 avec régulation est voisine de celle de l'hypothèse H2 sans intervention. Nous pouvons noter que dans le cas de l'hypothèse H1, la mise en œuvre de la régulation nécessite l'achat de 34 t de foin pour l'ensemble des années étudiées alors que le choix de l'hypothèse H2 revient à produire en moyenne 90 t supplémentaires pour les 18 années étudiées. D'une manière générale, les ajustements sont d'autant plus efficaces qu'ils sont mis en œuvre tardivement dans le déroulement de l'hivernage.

b) Cas des situations les plus performantes

La mise en réserve de 15 % de la récolte de foin lorsque cette récolte est bonne et que l'hiver est tardif réduit considérablement les variations des indices de rigueur pour les hypothèses H2 et H4 (figure 6). Cependant, une analyse plus détaillée des résultats montre que l'indice de rigueur est réduit pour un ou deux hivers difficiles. Dans les autres cas, le foin est mis en réserve 2 années consécutives ou lorsque l'hiver suivant est peu rigoureux.

IV - DISCUSSION

1. Conditions d'utilisation des résultats : validation

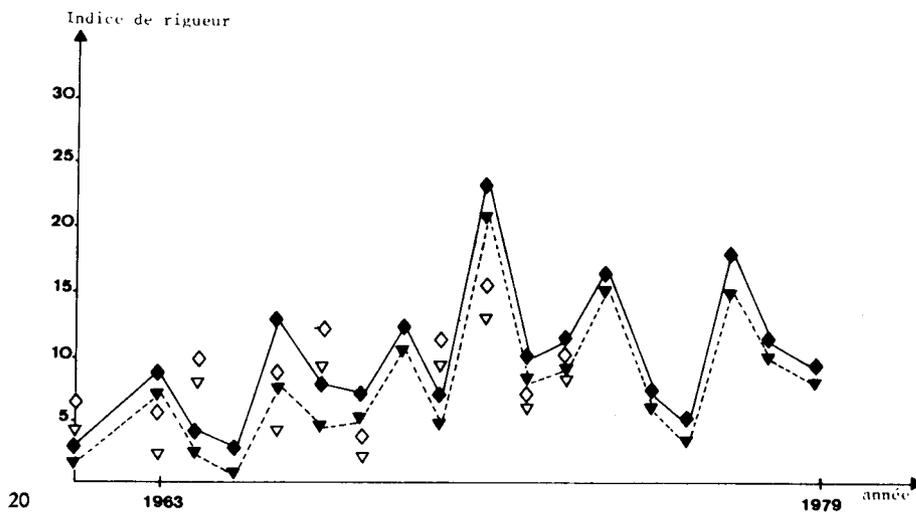
Les objectifs assignés au modèle ainsi que les méthodes employées pour le construire ne permettent pas d'effectuer une validation classique. Il importe néanmoins de s'assurer du caractère vraisemblable des indications fournies par ce modèle. Nous utiliserons pour cela deux résultats :

— d'une part, nous avons constaté par enquête qu'il y a accord entre les éleveurs et notre modèle sur le classement en rigueur des hivernages 1976/1977 à 1979/1980 ;

— d'autre part, les observations réalisées durant l'hiver 1979/1980 par A. GIBON (GIBON, 1981) dans une exploitation dont les structures et la

FIGURE 6
COMPARAISON DES INDICES DE RIGUEUR ÉNERGIE
POUR LES HYPOTHÈSES H2 ET H4,
SANS ET AVEC REPORT DE STOCK

HYPOTHESES	INDICE ENERGIE			INDICE AZOTE		
	moyenne	écart type	C.V.	moyenne	écart type	C.V.
H4 ▼	7.6	5.0	0.66	51	34	0.67
H4 R ▽	7.4	4.2	0.58	50	31	0.62
H2 ◆	9.3	5.3	0.57	106	59	0.56
H2 R ◇	9.3	4.4	0.47	106	51	0.48



Modélisation de l'hivernage

conduite technique sont voisines de notre hypothèse H1, et celles de G. BALENT (BALENT, GIBON, 1980), réalisées le même hiver, sur les parcours. Ces observations, regroupées dans le tableau IV avec les paramètres et les résultats d'une de nos simulations pour cette même année, montrent que s'il n'y a pas parfaite concordance entre l'observation et la simulation, l'écart entre les deux reste du domaine de l'acceptable. L'observation de la figure 3 nous montre que cet hiver 1979/1980 se situe dans les meilleurs. Par son caractère ponctuel, cette confrontation des résultats de notre modèle aux données réellement observées ne peut évidemment pas servir de validation. Néanmoins, le cadrage ainsi réalisé permet de porter a posteriori, sur certaines situations, un diagnostic de faisabilité de l'ajustement des ressources aux besoins et d'aider au raisonnement d'améliorations prioritaires.

TABLEAU IV
COMPARAISONS DES OBSERVATIONS ET DES SIMULATIONS
POUR L'HIVER 1979/1980

	Structure	Croissance agneaux	Variation réserve corporelle brebis	Prélèvement au pâturage	
				UF	MAD (g)
Observations A.GIBON	Voisine de H1	200 g	oui	0,6-0,8	40-60
Observations G.BALENT					
Simulation agnelage groupé	H1	200 g	oui	0,77	65
Simulation agnelage dispersé	H1	200 g	oui	0,87	76

2. Intérêt de la modélisation relativement aux diagnostics sectoriels

Un premier résultat de ce travail a été de hiérarchiser les principales contraintes intervenant sur la difficulté de l'hivernage qui avaient été répertoriées à partir d'enquêtes sur le terrain. Ainsi, à côté des contraintes usuelles liées à la conduite technique et aux structures des exploitations apparaît l'importance de la variabilité climatique interannuelle. L'étude des liaisons entre l'indice de rigueur de l'hiver et les différentes variables climatiques a permis par ailleurs de les hiérarchiser. Le nombre de jours d'enneigement au sol ainsi que les dates de premières neiges et gelées apparaissent comme les variables climatiques les plus déterminantes (CHARPENTEAU, DURU, 1983). Ces variables sont donc à prendre en compte prioritairement pour corriger les effets défavorables du climat, soit a posteriori, soit par anticipation.

Il apparaît par ailleurs qu'il n'existe pas de contraintes et de solutions générales. Les priorités d'améliorations sont donc à raisonner en tenant compte des spécificités des exploitations considérées et des moyens disponibles (financement, augmentation de surfaces, maîtrise de la conduite collective des troupeaux). Pour le premier aspect, le fait que les interactions entre l'ensemble des variables soient prises en compte dans le modèle, permet de donner des indications intéressantes sur les voies à privilégier a priori pour augmenter les performances et/ou réduire leur variabilité interannuelle, compte tenu de la situation actuelle de l'exploitation.

A titre d'exemple, nous allons illustrer cette démarche en utilisant les graphiques correspondant à la moyenne des indices énergie et azote dans le cas de situations à agnelage groupé et dispersé (figure 4 a, b, e, f). Cette analyse serait à compléter avec l'étude de l'effet des régulations.

Nous considérons une situation de départ S1 (indice énergie = 24, indice azote = 32) et testons les différentes voies possibles pour arriver à S'1 (indice énergie = 17, indice azote = 17) et S''1 (indices énergie et azote environ égaux à 10). Les résultats de cette analyse sont consignés dans le tableau V et montrent, à partir de caractéristiques de départ connues d'une exploitation, quelles sont les améliorations potentiellement efficaces ou non pour atteindre un objectif donné.

TABLEAU V
COMBINAISONS POSSIBLES DES VARIABLES
POUR ATTEINDRE DES VALEURS
DES INDICES DE RIGUEUR U.F. ET M.A.D.
VOISINES DE 17 (S'1) OU DE 10 (S''1)
(Chaîne de récolte : voir le calcul de l'indice Annexe 2, tableau b)

Hypothèses	Agnelage	Chaîne de récolte	MS/HA	Surface	Stock espéré	Indice	
						UF	MAD
S ₁	dispersé	4	3,5	6,8	24	24	32
S'1 groupage de l'agnelage	groupé	4	3,5	6,8	24	17	18
amélioration de la chaîne de récolte	dispersé	.7	3,5	6,8	24	impossible	
augmentation du rendement	dispersé	4	4,5	6,8	30,6	17	impossible
augmentation de surface	dispersé	4	3,5	8,7	30,6	17	impossible
augmentation du rendement + chaîne de récolte	dispersé	3	4,5	6,8	30,6	17	17
S''1 groupage (A.G) agnelage							
A.G + amélioration de la chaîne de récolte	groupé	.7	3,5	6,8	24	impossible	10
A.G + augmentation de surface	groupé	4	3,5	9,1	32	10	impossible
A.G + augmentation du rendement	groupé	4	4,6	6,8	31	10	impossible
A.G + augmentation du rendement + chaîne de récolte	groupé	3	4,3	6,8	29	10	10

Cette analyse permet donc de choisir des voies d'amélioration *cohérentes* entre elles et ainsi de déterminer des priorités, compte tenu du poids de chaque hypothèse testée relativement au résultat visé. De cette manière, pour une situation donnée, une large gamme d'hypothèses peut être prospectée puis raisonnée en connaissant les moyens des exploitations et d'autres contraintes non prises en compte dans ce travail.

V - CONCLUSION

Un premier résultat des simulations testées a été de montrer que, en l'absence d'ajustements saisonniers, les effets des variations du climat sur la variabilité de la rigueur de l'hivernage sont importants, quelles que soient les caractéristiques des exploitations.

Les ajustements saisonniers, à savoir d'une part des reports de stocks dans le cas des exploitations disposant de quantités de foin en moyenne suffisantes et, d'autre part, l'achat de foin ou des réductions d'effectifs hivernés dans les cas plus critiques, permettent de réduire efficacement la variabilité de la rigueur de l'hivernage. Un certain nombre de contraintes s'opposent à l'accession au premier cas de figure. En premier lieu, l'utilisation collective de l'espace interdit souvent la maîtrise individuelle des périodes de reproduction du fait de la présence de béliers en estive (GIBON, 1981). Par ailleurs, le blocage foncier (rareté des ventes et locations verbales) est souvent un handicap à l'augmentation de la surface de fauche. Face à ce blocage, la panoplie des réglementations en vigueur est peu efficace (GUIMET, 1980). Enfin, la faible capacité d'investissement des exploitations limite l'adoption de chaînes de récolte plus performantes. La faiblesse de la trésorerie constitue aussi une contrainte pour les avances nécessaires à l'achat d'engrais ou de foin dans le cas d'hivers difficiles.

Selon les caractéristiques des exploitations, les simulations permettent de tester les voies les plus efficaces ou celles, au contraire, impossibles pour parvenir à une amélioration donnée. Les propositions issues de ces simulations devront être discutées compte tenu des contraintes spécifiques à l'exploitation et à son environnement.

24 La démarche développée ici vise à porter un diagnostic d'ensemble sur les points clés du fonctionnement technique d'exploitation afin de dépasser

les diagnostics propres à des sous-ensembles (niveau de rendement en foin, valeur fourragère, conduite du troupeau...). Il ne s'agit donc en aucun cas de définir des situations optimales mais plutôt d'évaluer le poids de ces différentes variables et de leur déterminants sur un indicateur de résultat technique ou économique.

Comme prévu, notre modèle n'a pas fourni de solutions quantifiées immédiatement applicables sur le terrain. Les résultats des simulations constituent néanmoins un guide pour le raisonnement des améliorations des systèmes fourragers de cette zone.

M. DURU*, J.L. CHARPENTEAU**,
avec la collaboration technique
de L. SOS* et R. VIARD*,
*I.N.R.A., *Station d'Agronomie et **Laboratoire de Biométrie,
Unité Régionale sur les Systèmes Agraires et le Développement,
Toulouse (Haute-Garonne).*

LISTE DE MOTS-CLÉS

Contrainte climatique, hivernage, modélisation, montagne, ovins, petits ruminants, Pyrénées, système fourrager, système d'exploitation, variation annuelle.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BALENT G. et GIBON A. (1980) : *Le pâturage hivernal dans les Pyrénées Centrales. Recherches sur l'élevage en Pyrénées*, Ronéo 95 p., I.N.R.A. Toulouse.
- CHARPENTEAU J.L. et DURU M. (1983) : « Simulation of some strategies to reduce the effect of climatic variability on farming systems. The case of Pyrénées mountains », *Agric. Systems*, 11, p. 105-125.
- DURU M. (1981) : « Mode d'exploitation des prés de fauche dans les Pyrénées Centrales (références expérimentales, pratiques des agriculteurs) », *Fourrages*, n° 87, p. 53-90.

- DURU M. et CHARPENTEAU J.L. (1981) : « The farming system in the Pyrénées : a model of the constitution and utilisation of hay stocks », *Agric. Systems*, 7, p. 137-156.
- FORRESTER J.W. (1980) : *Principes des systèmes*, Presses Universitaires de Lyon.
- GIBON A. (1981) : *Pratiques d'éleveurs et résultats d'élevages dans les Pyrénées Centrales. Logique de la conduite des troupeaux et possibilités d'amélioration*, thèse de docteur ingénieur, 105 p.
- GUIMET L. (1980) : *L'agriculture de montagne - Perspectives et réalités*, *C.R. Ac. Agric. France*, 66 (6), 554-564.
- I.N.R.A. (1978) : *L'alimentation des ruminants*, I.N.R.A. - Publications, Versailles.
- TURC L. (1972) : « Indice climatique de potentialité agricole », *Science du sol*, 2, p. 81-101.

ANNEXE 1

ENSEMBLE DES ÉQUATIONS DU MODÈLE

Le détail et les justifications agronomiques de ces relations sont décrits ailleurs (DURU M., CHARPENTEAU J.L., 1981, et CHARPENTEAU J.L., DURU M., 1983). L'ensemble des sigles et abréviations est récapitulé en annexe 3.

1 - Calculs annuels

• Récolte de foin

$$QMS = \frac{RDT}{50} \times (1 \times ITURC + 29) \times S$$

avec :

QMS : quantité de matière sèche récoltée (t)
RDT : rendement moyen de la parcelle (t/ha)
ITURC : indice de TURC
S : surface fauchée (ha)

• Qualité du foin

$$TENUF = 72.25 - 0.0022 \text{ TREP} - 0.0018 \text{ TREP}^2$$

$$TENAD = - 0.909 \text{ TREP} + 122.3$$

avec :

TENUF : teneur en énergie (UF/kg)
TENAD : teneur en matière azotée digestible (t/kg)
TREP : nombre de jours de repousse du foin

L'algorithme de calcul de TREP à partir des jours avec et sans pluie est donné ci-dessous. Dans ce calcul, l'intervention de la structure de l'exploitation se fait à travers le paramètre NECES : nombre de jours nécessaires à la récolte d'une quantité fixée de foin.

• Nombre de rations :

$$NBRAT = (NJO \times 2) + (NJI \times 3)$$

avec :

NBRAT : nombre de rations
NJO : nombre de jours sans neige sur le sol
NJI : nombre de jours avec neige.

• Poids de la ration

Pour tenir compte des pratiques observées chez les éleveurs nous distinguons les cas d'agnelage groupé et dispersé.

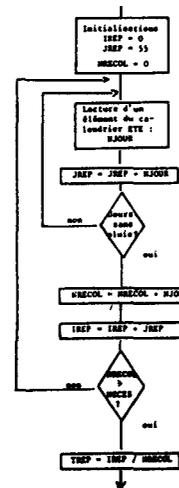
En cas d'agnelage dispersé :

$$PRAT = QMS / NBRAT / EFF$$

où

EFF : est l'effectif du troupeau

Calcul du nombre de jours de repousse de la récolte
(signification des variables : annexe 2)



En cas d'agnelage groupé on calcule :

$$X = QMS / (1.325 \times NRAT1 + NRAT2) / EFF$$

et on donne :

PRAT = X x 1.325 avant le 01 mars et

PRAT = X après

(NRAT1 et NRAT2 sont respectivement le nombre de rations nécessaires avant et après le 01 mars).

2 - Calculs journaliers ou quasi journaliers

• Besoins des animaux

En cas d'agnelage dispersé, les besoins d'une brebis fictive ont été pris :

$$BESUF = 1.11 \text{ (UF)}$$

$$BESMAD = 111 \text{ (g de MAD)}$$

(INRA, 1978)

ENSEMBLE DES ÉQUATIONS DU MODÈLE (suite)

En cas d'agnelage groupé, nous avons les formules suivantes :

$$\begin{aligned} \text{BESUF} &= (-0.0052\text{NJ}^2 + 0.0307\text{NJ} + 142.85)/100(\text{UF}) \\ \text{BESMAD} &= -0.006\text{NJ}^2 + 0.231\text{NJ} + 231.158 \text{ (g de MAD)} \end{aligned}$$

pendant les 5 mois qui suivent l'agnelage avec NJ : nombre de jours écoulés depuis l'agnelage.

Si NJ > 150 nous avons :

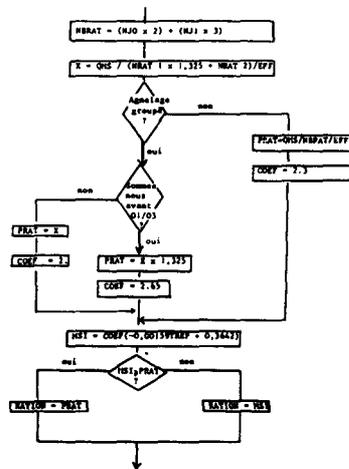
$$\begin{aligned} \text{BESUF} &= 0.7 \text{ (UF)} \\ \text{BESMAD} &= 54 \text{ (g de MAD)}. \end{aligned}$$

• Ingestion de matière sèche par les animaux

$$\text{MSI} = \text{COEF} \times (-0.00159 \text{ TREP} + 0.3642)$$

où

MSI : matière sèche ingérée en kg
TREP : caractérise comme précédemment la qualité du foin
COEF : vaut 2.65 dans les 5 mois après l'agnelage et 2.0 ailleurs.
L'ensemble des calculs relatifs au poids de la ration et à son ingestion est représenté sur l'algorithme de la figure ci-après.



Calcul du poids de la ration ingérée
(signification des variables : annexe 2)

• Calcul de l'indice de rigueur de l'hiver

Le déficit global est calculé de la façon suivante :

$$\text{DEF} = (\text{QMS} \times \text{TENUF}) - \sum (\text{RATIO}_j \times \text{TENUF})$$

où RATIO est la quantité de matière sèche effectivement ingérée le jour j. On a bien sûr une formule équivalente pour calculer le déficit en azote.

La composante journalière, elle, est calculée de la façon suivante :
Soit DEF_j le déficit en énergie ou en azote le jour j, nous calculons pour les jours où ce déficit est positif ou nul la quantité :

$$\text{COMPJ} = \sum \text{DEFJ} (j) / \text{NJO}$$

où

COMPJ est la composante journalière de l'indice de rigueur et NJO le nombre de jours sans neige.

L'indice de rigueur de l'hiver est donc égal à :

$$\text{IRH} = \text{DEF} \times \text{COMPJ}$$

Cet indice est calculé pour l'énergie (UF) et pour l'azote (MAD).

3 - Les régulations : règles de décision et mise en oeuvre

• Fertilisation azotée au printemps (R1)

On décide d'épandre 50 unités d'azote le 15 mai si l'indice de TURC cumulé du 1er janvier au 15 mai est inférieur ou égal à 2.

Cette opération permet d'augmenter le rendement potentiel de 0,6 T de matière sèche à l'hectare.

• Achat de foin au vu de la récolte (R3)

On décide d'acheter du foin si l'indice de TURC cumulé du 1er mai au 25 juin est inférieur ou égal à 9.

• Interventions au début de l'hiver

Si l'hiver débute avant le 16 novembre on décide soit de diminuer l'effectif du troupeau de 25 % (R2) soit de porter le stock de foin à 120 % de la récolte (R4).

• Régulation combinée (R10)

Le décideur a à sa disposition toutes les possibilités d'intervention (sauf la variation d'effectif du troupeau) décrites ci-dessus. Les décisions sont prises en "temps réel" et l'achat de foin se fait 1 fois au maximum.

• Gestion des stocks, mise en réserve

On décide de mettre 15 % de la récolte en réserve pour l'année suivante si l'hiver débute après le 22 novembre et si la récolte est au moins égale à 120 % de la moyenne.

Le tableau ci-dessous récapitule les fréquences d'interventions des différentes régulations envisagées.

Fréquence d'intervention des régulations

Année	61	62	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	Tot.
R1									x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	6
R2					x								x	x	x	x	x	x	7
R3																			3
R4					x								x	x	x	x	x	x	7
R10									x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	12
Stock	x	x	x	x	x	x	x	x											5

ANNEXE 2

CHAMP DE VARIATION DES COMMANDES DU SYSTÈME

a) Rendement x surface fauchée = stock espéré (pour 200 brebis)

Rdt	Stock							
	21	24	27	30	33	36	39	42
3,5	6,0	6,8	7,7	8,6	9,4	10,2	11,1	12,0
4,5	4,7	5,3	6,0	6,7	7,3	8,0	8,7	9,3
5,5	3,8	4,4	4,9	5,4	6,0	6,5	7,1	7,6

b) Indicateurs de chaîne de récolte utilisés dans le modèle et leur signification en terme de matériel et de main-d'oeuvre

Indicateur de chaîne de récolte en jour/ha	MATERIEL	Main-d'oeuvre en unité travailleur
0,7	Ensilage-Séchage en grange	3
2	2 tracteurs - 1 presse	2
3	1 tracteur - 1 presse	2
4	Motofaucheuse - 1 presse	2
5	Motofaucheuse vrac	2

c) Taille du troupeau

EFF = 200 brebis

d) Dates d'agnelage

groupé : toutes les brebis agnèlent le 1er octobre

dispersé : distribution uniforme de l'agnelage sur tout l'hiver.

ANNEXE 3

SIGNIFICATION DES SIGLES ET DES ABRÉVIATIONS

BESHAD Besoin en matière azotée digestible en g/animal/jour
 BESUF Besoin énergétique en unité fourragère/animal/jour
 COEF Coefficient de calcul
 COMPJ Composante journalière de l'indice de rigueur
 DEF Déficit global sur l'hiver
 DEFJ Déficit journalier
 EFF Effectif du troupeau en brebis mères
 ITURC Indice climatique de potentialité agricole cumulé du 01/05 au 05/07
 IRH Indice de rigueur de l'hiver
 MAD Matière azotée digestible
 MSI Quantité de matière sèche ingérable par l'animal pour une ration
 MBRAT Nombre de rations nécessaires pour un animal pendant l'hiver
 NECES Nombre de jours nécessaires à la récolte d'une quantité de foin
 NJ Nombre de jours écoulés depuis l'agnelage

NJO Nombre de jours sans neige
 NJ1 Nombre de jours avec neige
 NRAT1 Nombre de rations nécessaires entre le début de l'hiver et le 01/03
 NRAT2 Nombre de rations nécessaires après le 01/03
 NRECOL Nombre de jours de récolte effective
 PRAT Poids possible d'une ration de foin
 QMS Quantité de matière sèche récoltée
 RAT10 Poids de la ration effectivement distribuée
 RDT Rendement moyen d'une surface en tonnes de matière sèche/ha
 S Surface fauchée en ha
 TEMAD Teneur d'un fourrage en matière azotée digestible en g/kg
 TENUF Valeur énergétique d'un fourrage en UF/kg
 TREP Nombre de jours de repousse moyen d'une quantité de foin
 UF Unité fourragère (1730 K cal.)