

*CLIMAT, RYTHME DE COUPE ET CROISSANCE
D'UNE FÊTUQUE ÉLEVÉE
CYCLE REPRODUCTEUR ET REPOUSSES
VÉGÉGATIVES*

UNE MEILLEURE UTILISATION DE L'HERBE DANS LES EXPLOITATIONS D'ÉLEVAGE NÉCESSITE LA CONNAISSANCE DES DISPONIBILITÉS FOURRAGÈRES AUX DIFFÉRENTES SAISONS. Il ne s'agit pas seulement de la mise au point de « normes de croissance standards », ni de la connaissance des seuls « potentiels » : il faut encadrer le mieux possible les choix techniques et les compromis réalisés en permanence par les agriculteurs (dates et rythmes d'exploitation, niveaux et dates d'apport d'azote notamment) et en connaître les répercussions sur les disponibilités fourragères. Les caractéristiques propres aux espèces et aux variétés interviennent également mais les variations climatiques saisonnières représentent les facteurs les plus importants auxquels les agriculteurs doivent s'adapter.

La recherche de modèles « climat-production » représente l'une des démarches d'étude de ces problèmes. Différents types de modèles existent.

Les modèles « climat-morphogénèse-production » correspondent à des travaux assez lourds où beaucoup de connaissances restent encore à

acquérir avant de pouvoir envisager l'utilisation d'outils vulgarisables, adaptés à la prise en compte de différences de conduites techniques au sein d'exploitations agricoles (YU et al., 1975 ; de VRIES, 1983 ; TORSSELL et KORNER, 1983 ; KORNER et TORSSELL, 1983a ; TORSSELL, 1983 ; GILLET et al., 1984).

Les modèles statistiques font moins appel à l'explicitation des lois biologiques de la croissance, mais sont simples à utiliser. Ils sont le plus souvent uniquement corrélatifs entre une production de matière sèche et une ou plusieurs variables climatiques, pour un niveau d'intensification technique donné. On peut citer des modèles multivariés qui cherchent à traduire l'effet et la hiérarchie des facteurs climatiques sur la production de matière sèche, pour des temps de croissance en général assez longs (MERIAUX et DELECOLLE, 1980 ; de MONTARD, 1981, 1984). L'utilisation de courbes à points d'inflexion cherche à tenir compte des variations de vitesse de croissance au cours de différentes phases d'une repousse (WALLACH et GUTMAN, 1976 ; TORSSELL, 1984).

Mais il existe aussi des indices climatiques calculés chaque jour, ou semaine, ou décade, puis sommés sur des intervalles de temps variables pour rendre compte de différentes durées de croissance. Ainsi, les sommes de températures ($\Sigma \Theta$) sont utilisées pour les débuts de croissance printanière des graminées (LEMAIRE et SALETTE, 1981), tandis que les croissances estivales sont rapportées à un déficit hydrique ou au cumul des valeurs calculées de consommation d'eau (Σ E.T.R., Evapotranspiration Réelle), indice considéré comme intégrateur du rayonnement, de la température, de la consommation d'eau (de MONTARD, 1983 ; MORLON et al., 1985).

Par rapport aux travaux déjà publiés sur l'utilisation des indices $\Sigma \Theta$ ou Σ E.T.R., l'originalité de ce travail réside dans 4 points :

— l'étude de la courbe de croissance de la phase reproductrice en fonction des sommes de température, selon différentes modalités d'exploitation automnale ou de déprimage ;

— l'étude de l'ensemble des repousses végétatives de printemps, d'été ou d'automne en fonction de l'indice E.T.R., sans distinguer a priori de coupures saisonnières. En effet, la graminée est alors dans un même état

physiologique : croissance uniquement feuillue. Ces repousses sont étudiées en conditions non irriguées et correspondent à des durées de croissance variables : 2 à 10 semaines ;

— le test des relations ainsi obtenues sur d'autres modalités de coupes ;

— l'étude de l'effet de la variabilité de la nutrition azotée sur ces relations climat-production, selon les dates respectives de fertilisation et de coupe, mais surtout par l'examen des courbes de dilution de l'azote dans la matière sèche (SALETTE et LEMAIRE, 1981).

I - MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. Protocole

Les traitements expérimentaux ont été réalisés sur une fétuque élevée Manade à Auzeville (Toulouse). Les caractéristiques de l'ensemble des traitements sont rassemblées dans la tableau I. Chaque traitement a été réalisé sur des placettes de 1,2 m² avec 4 répétitions. Les emplacements des placettes ont été changés chaque année.

L'expérimentation principale a été conduite durant 4 années consécutives sans irrigation. En 1981, 1982, 1983, 5 séquences de coupes ont été réalisées : toutes les 2, 4, 6, 8 et 10 semaines (traitement T).

Chacune de ces séquences a été répétée avec un décalage de 2 semaines (traitement T') afin de mieux prendre en compte d'éventuelles interactions entre rythme de coupe et climat. En 1980, il n'a été réalisé que les séquences de 2, 4 et 6 semaines. Les repousses reproductrices ont été étudiées jusqu'en 1985.

La croissance de printemps en phase reproductrice a été étudiée par ailleurs (LEMAIRE et SALETTE, 1981). Nous n'avons étudié la croissance dans ces conditions que durant deux années, à titre de témoin. L'effort a été principalement mis sur l'étude de variantes du mode d'exploitation usuel : dates plus ou moins tardives de dernière exploitation d'au-

TABLEAU I
RÉCAPITULATIF DES DIFFÉRENTS TRAITEMENTS

	80	81	82	83	84	85
<u>Pousse reproductrice</u> (dates						
d'initialisation des cour-						
bes de croissance)						
• automne				5/11	4/10	25/10
					10/12	
• déprimage en février	6/02	25/2	1/02		6/02	06/02
• déprimage en mars	17/3	18/3	10/3	16/3		
<u>Repousses végétatives</u>						
• traitements de base						
T2	x	x	x	x		
T4 T4'	x	x	x	x		
T6 T6'	x	x	x	x		
T8 T8'		x	x	x		
T10 T10'		x	x	x		
• traitements complémen-						
taires						
Ts1, 2 - Tb1, 2			x	x		

T2, 4... 10 : coupe toutes les 2, 4... 10 semaines.

T4'... 10 : idem mais coupes décalées de 2 semaines par rapport au traitement T.

Ts1, 2 : rythme de coupe guidé par la croissance chaque fois qu'il y a 1 t MS sur pied (Ts1) ou 1.5 t (Ts2)

Tb1, 2 : rythme de coupe permettant d'assurer des besoins constants avec 2 dates d'initialisation (Tb1) et (Tb2).

tomne, déprimage courant février, déprimage courant février associé à une autre intervention vers la mi-mars.

Des données complémentaires ont été recueillies pour simuler des rythmes de coupe correspondant à différentes modalités de gestion : coupes à « stock constant » effectuées chaque fois qu'on estime avoir 1 t de M.S. sur pied (Ts1) ou 1,5 t (Ts2) ; coupes permettant d'assurer des besoins constants en kg M.S. avec deux dates d'initialisation (Tb1) ou (Tb2). Ces rythmes ont été simulés du début de printemps au milieu de l'été, en 1982 et 1983. Ils nous serviront à valider les modèles établis avec les données des traitements T2 à T10.

Les niveaux globaux de production selon les rythmes sont indiqués dans le tableau II.

TABLEAU II
COMPARAISON DES NIVEAUX ANNUELS DE PRODUCTION
SELON LES RYTHMES
(moyennes des résultats 1981, 1982, 1983, en t M.S./ha)

:	:	sec	:
:	:	moy.	éc.type
:	:	-----	:
: T2	:	6.30	0.36
: T4	:	9.07	0.74
: T6	:	11.20	1.77
: T8	:	12.43	1.88
: T10	:	11.45	:

Il a été apporté 150 kg N/ha en février puis 50 au début du mois de mai et 50 au moment du retour des pluies (fin août).

2. Contrôles réalisés et calculs des indices climatiques

L'indice $\Sigma \Theta$ est calculé à partir des moyennes quotidiennes des minima et des maxima, sommées sur les intervalles entre coupes.

L'indice Σ E.T.R. est calculé à partir de bilans élémentaires réalisés tous les 10 jours. Pour chaque décade, E.T.R. = 1,2 E.T.P. calculée par la formule de TURC (1963), si la quantité « pluie + état de la réserve en eau du sol en début de période » est supérieure ou égale à 1,2 E.T.P. Dans le cas contraire, E.T.R. = pluie + état de la réserve. En fin de décade, l'état de la réserve est donc ajusté selon la consommation qui vient d'être calculée.

La valeur à considérer pour la réserve en eau pose toujours un problème dans ce genre de travail, que la distinction « réserve utile » (R.U.) ou « réserve facilement utilisable » (R.F.U., souvent prise égale à 2/3 de R.U.) ne résoud pas sur le fond. En effet, on considère alors pour un lieu donné une valeur stable quelles que soient les caractéristiques climatiques de l'année (pluie P, E.T.P.) et une disponibilité constante de tout le stock d'eau pour le couvert végétal, quel que soit le degré d'épuisement de ce stock ainsi que l'extension et l'activité des racines. Compte tenu des objectifs de ces travaux, où l'on doit pouvoir tenir compte de types de sol différents au sein d'une même région, on ne peut intégrer de façon simple ces paramètres avec les connaissances actuelles. Il faudrait notamment pouvoir disposer de références permettant de faire varier la réserve en eau au cours de l'année, selon le type de sol, le bilan P-E.T.P. le plus fréquent de la région et le comportement du couvert végétal étudié.

A défaut, on est conduit à considérer des valeurs en général nettement plus faibles que la réserve déterminée par les données pédologiques sur la profondeur accessible par les racines (de MONTARD, 1983 ; MORLON et al., 1985), ce qui traduit l'idée d'un stock d'eau non totalement accessible à un moment donné. Cependant, dans la pratique, on examine souvent plusieurs valeurs de réserves et on choisit celle qui conduit au meilleur ajustement global vis-à-vis de la production ou de certains points particuliers (séquence climatique bien typée, par exemple). De faibles différences de réponse pour plusieurs valeurs de réserve donnent une certaine sécurité quant au choix de la valeur de référence.

La valeur retenue ici est de 125 mm. Elle est légèrement inférieure aux observations de dessiccation maximum d'une fétuque sur le même site, jusqu'à des profondeurs voisines de 2 m (MAERTENS, CABELGUENNE, 1971). Cette différence est acceptable puisqu'il s'agit de dispo-

ser ici d'une valeur de référence valable sur toute la durée de croissance et pour des années différentes.

II - RÉSULTATS

1. Cycles reproducteurs

a) Croissance et climat

La représentation de la production de matière sèche récoltable en fonction du temps et selon les modalités d'exploitation montre une forte variabilité interannuelle dans le cas de déprimage en février ou de dernière exploitation tardive à l'automne (figure 1b, c et d) et une variabilité plus réduite dans le cas d'un second déprimage en mars (figure 1a).

La mise en relation de ces productions avec les sommes de températures à compter de la date d'exploitation d'automne et de printemps montre une forte réduction de la variabilité (figure 2). Pour chaque modalité d'exploitation, on observe une courbe de croissance ayant l'allure d'une sigmoïde.

Les paramètres des régressions entre matière sèche récoltée et températures, $M.S. = b (\sum \Theta - a)$ pour les courbes de croissance initialisées à l'automne, en février puis en mars, sont rassemblés dans le tableau III. Pour ces calculs, nous n'avons considéré que le sous-ensemble de données correspondant aux contrôles qui précèdent le stade floraison. En effet, à ce stade, on observe alors un ralentissement de la vitesse de croissance. Dans ces conditions, les vitesses de croissance potentielle (« b ») sont voisines pour les deux modalités de déprimage en février puis février et mars (près de 9,0 kg M.S. par degré × jour). Pour les courbes de croissance initialisées en fin d'automne (1983 et 1985), on observe que les pentes sont voisines des courbes initialisées au printemps. Par contre, pour celles initialisées en début d'automne (1984 et 1985) les pentes sont très inférieures. Dans ce dernier cas, on note en fin d'hiver une proportion élevée de matériaux sénescents qui doit gêner l'interception du rayonnement par les bourgeons de talles. A ceci s'ajoutent des pertes de matière sèche par augmentation de la respiration de maintenance ainsi qu'un retour au sol important sous forme de litière.

FIGURE 1
COURBES DE CROISSANCE EN FONCTION DU TEMPS
ET SELON LES ANNÉES
 a : après déprimage en février
 puis début mars,
 b : après déprimage en février,
 c : après dernière coupe en fin d'automne,
 d : après dernière coupe en début d'automne
 (● 1980, ▲ 1981, ■ 1982, △ 1983, □ 1984, ○ 1985)

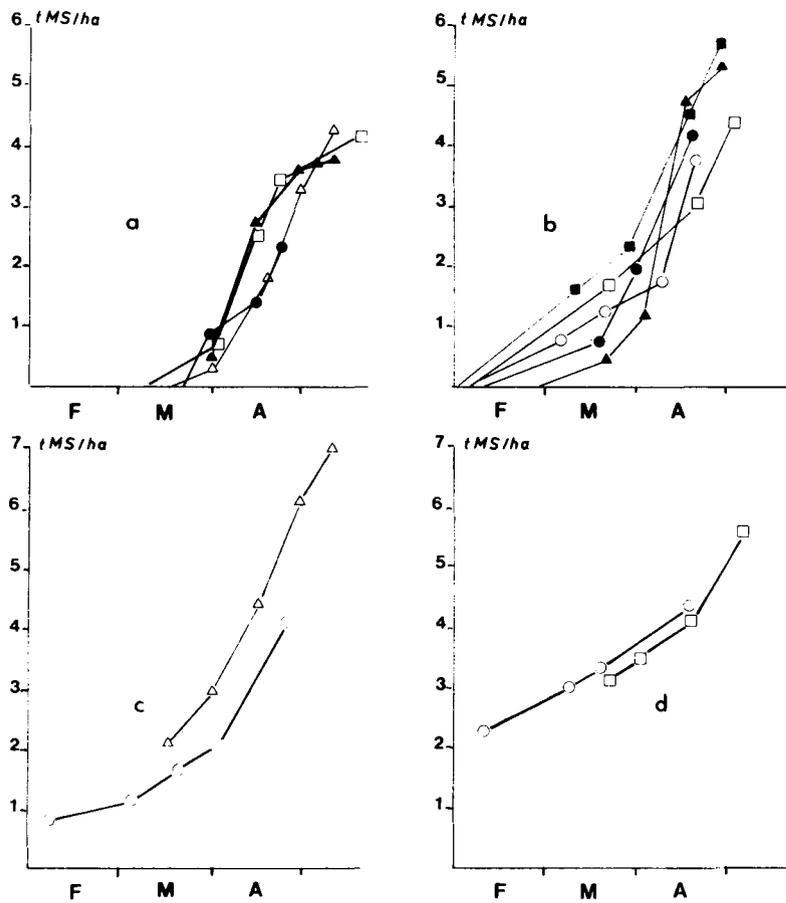
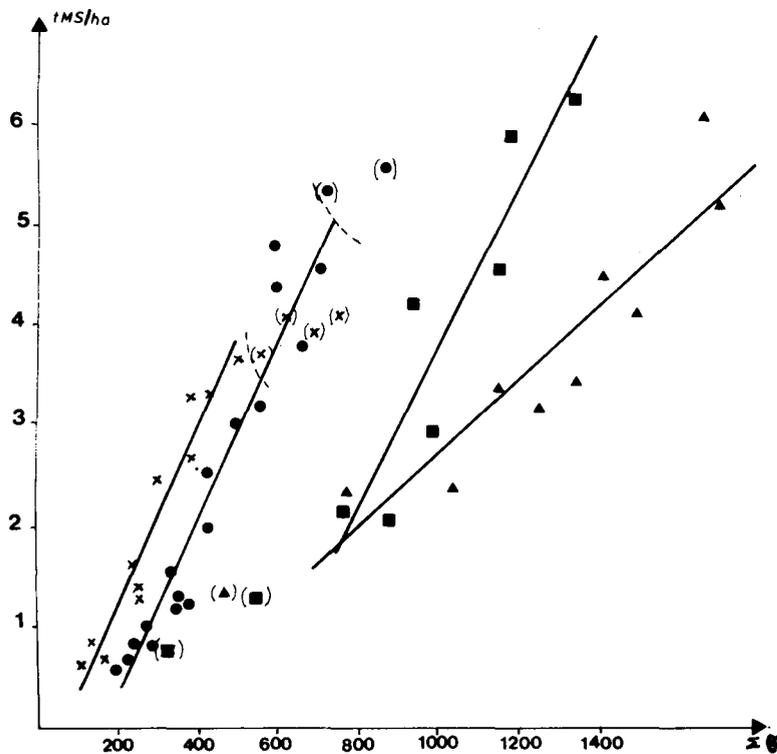


FIGURE 2
RELATION ENTRE CROISSANCE
ET SOMME DE TEMPÉRATURE DEPUIS LA DERNIÈRE COUPE
 × déprimage début mars, ● Déprimage début février,
 ■ fin automne, ▲ début automne.
 Points non pris en compte dans la régression :
 (▲, ■) début de croissance ;
 (●) contrôles postérieurs à la floraison



l'une fétuque élevée

TABLEAU III
PARAMÈTRES POUR LA POUSSE DE PRINTEMPS
DES RÉGRESSIONS LINÉAIRES ENTRE HERBE RÉCOLTÉE
ET SOMME DE TEMPÉRATURE : M.S. = b ($\Sigma \Theta$ -a)
(en kg M.S./ha)

	déprimage au printemps		dernière coupe en automne	
	en fév. puis mars	mars	fin aut. (nov.)	début aut. (oct.)
b	8.88	8.89	8.12	3.75
a	61	168	538	277
r	0.971	0.965	0.927	0.915
Nbre de données	16	14	7	10

Les coefficients « a » qui traduisent les sommes de températures correspondant au démarrage apparent de la végétation (SALETTE et LE-MAIRE, 1981) sont croissants en fonction de la précocité de la première exploitation. Dans le cas du déprimage en mars, a = 61 °C ; la valeur de ce coefficient peut s'expliquer par le fait qu'après une coupe, il faut attendre quelques jours pour que l'appareil foliaire soit pleinement efficace. Le fait qu'il faille 100 °C supplémentaires dans le cas du déprimage en février et environ 500 à 600 °C dans le cas d'une dernière coupe en fin d'automne montre que d'autres éléments interviennent. Nous interprétons ces écarts par une action différente de la température en début et en fin d'hiver. En effet, il a été montré à cette période un changement d'affectation des réserves glucidiques lors du passage de la plante de l'état végétatif à l'état reproducteur en relation avec la longueur du jour (PARSON et ROBSON,

1980). La différence de réponse à la température se situe au courant du mois de février. De ce fait, la croissance nette (production observée + sénescence) ne s'accélère qu'après cette période. Bien que nous n'ayons contrôlé que 2 années où la courbe de croissance est initialisée en fin d'automne, nous observons graphiquement une variabilité des sommes de température pour atteindre la même production récoltable au démarrage de la végétation (figure 2). LEMAIRE (1985) relie cette variabilité au nombre de talles présentes en fin d'hiver.

Considérer séparément les températures avant et après mi-février permet d'obtenir une relation unique pour l'ensemble des courbes de croissance, quelles que soient les modalités d'exploitation à l'automne et au printemps (sauf dans le cas de dernière coupe précoce en octobre) :

$$M.S. = 0,002 \Sigma \Theta a + 0,008 \Sigma \Theta p - 0,547 \quad r = 0,97 \text{ (38 données).}$$

$\Sigma \Theta a$ = température cumulée de la date d'initialisation de la coupe au 15/2

$\Sigma \Theta p$ = température cumulée du 15/2 à la date de contrôle.

Les coefficients traduisent bien statistiquement des effets différenciés de la température selon le statut physiologique de la plante. Le rapport de ces coefficients est du même ordre de grandeur que celui observé à partir de mesures de croissance tout au long de l'hiver dans d'autres conditions (DURU, 1985a et données non publiées ; FAIVRE et FELIX, 1984).

Ces ajustements statistiques ne doivent pas masquer la complexité des phénomènes en jeu et, en fait, la non-linéarité de l'effet des températures. En début et en milieu d'hiver, le bilan croissance-sénescence est quasiment nul ; par contre, le tallage croît avec la température mais si celle-ci devient trop élevée, elle provoque un allongement important des feuilles conduisant à un auto-ombrage et à une réduction du nombre de talles (LEMAIRE, 1985). En fin d'hiver, la croissance des feuilles est exponentielle et non linéaire en fonction de la température.

b) Croissance et azote

Des travaux antérieurs (SALETTE et LEMAIRE, 1981) ont montré qu'il existe une relation d'allométrie entre prélèvement d'azote et crois-

sance. En condition de nutrition azotée non limitante, cette relation est stable quelle que soit l'année (LEMAIRE et SALETTE, 1984).

Sur la figure 3, nous avons représenté les teneurs en azote en fonction de la croissance pour les différentes modalités de date de coupe ainsi que la courbe ajustée obtenue par LEMAIRE et SALETTE, 1984. Il apparaît que lorsque la coupe d'initialisation a eu lieu à l'automne ou en février, les données obtenues sont très voisines de celles de LEMAIRE et SALETTE. On observe de même en fin de cycle un ensemble de points pour lesquels la relation d'allométrie n'est plus stable et varie selon les années. Cette rupture dans la relation est interprétée comme une offre devenue limitante en azote.

Pour les courbes de croissance correspondant au déprimage de mars, on observe une variabilité importante des teneurs en azote pour une quantité de matière sèche donnée ; les différences avec les autres modalités de coupe étant surtout importantes en fin de croissance. Nous interprétons ces différences par le fait que la coupe de déprimage limite les quantités d'azote disponibles : les exportations par le déprimage représentent environ 50 kg N/ha de 1980 à 1983. Ces quantités sont importantes relativement aux quantités totales exportées sur le cycle (entre 110 à 120 kg). Un apport complémentaire d'azote après déprimage est donc nécessaire pour obtenir une offre d'azote non limitante.

c) *Discussion et conclusion sur la croissance de printemps*

L'analyse de la croissance en fonction du climat et des teneurs en azote permet de discuter la cinétique au cours du premier cycle.

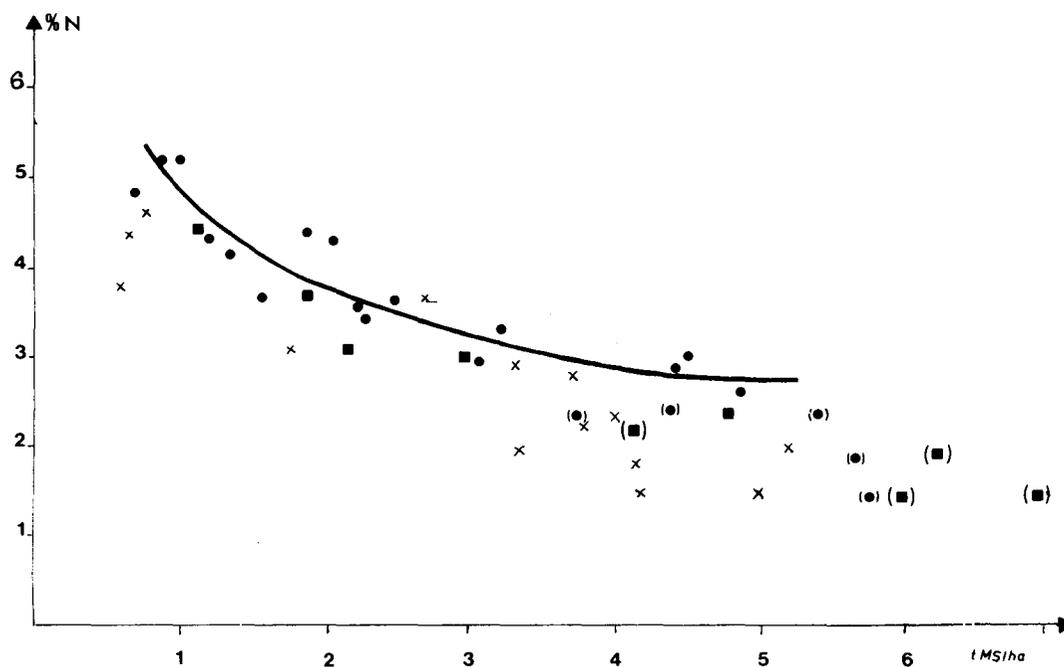
La somme de températures nécessaire pour le *démarrage apparent de la végétation* dépend en premier lieu de la période de la date de coupe correspondant à l'initialisation du cumul des températures. D'après les équations établies ci-dessus, pour obtenir 1,5 t M.S., il faut $a = 230$ °C pour une date postérieure à mi-février (donc après le passage de l'état végétatif à l'état reproducteur). Par contre, pour une date de fin d'automne, a est de l'ordre de 700 °C. Dans ce dernier cas, la variabilité observée entre années dépend du nombre de talles en fin d'hiver et peut atteindre 100 °C (LEMAIRE, 1985).

*Modèles de croissance
d'une fétuque élevée*

FIGURE 3
RELATION ENTRE TENEUR EN AZOTE
ET DEGRÉ DE CROISSANCE DES POUSSES REPRODUCTRICES
DE PRINTEMPS

× après déprimage en mars,
 ● après déprimage en février,
 ■ après coupe de fin d'automne.

courbe de référence obtenue par SALETTE et LEMAIRE 1981 ;
 (●, ■) ensemble des points pour lesquels la relation d'allométrie
 n'est plus stable et varie selon les années



Pendant la *période de forte croissance*, la vitesse de croissance est peu affectée par les modalités d'exploitation en automne et au printemps (déprimage) en conditions de nutrition azotée non limitante sauf en cas de dernière coupe précoce en automne ou lorsque des épis sont cisailés au printemps (GILLET, 1980). Notons que la vitesse potentielle de croissance observée est inférieure d'environ 20 % à celle observée par LEMAIRE et SALETTE (1981). Nous émettons l'hypothèse que cette différence provient d'une faible densité de peuplement lié à l'âge de cette fétuque.

En fin de croissance, nous observons un ralentissement de la croissance relativement à l'indice climatique à partir de la floraison. La croissance des tiges est alors terminée (GILLET, 1980). Ceci correspond à des dates voisines pour des placettes déprimées en février ou mars mais à des quantités de matière sèche plus faibles dans le second cas étant donné que les tiges sont plus courtes.

2. Repousses végétatives (printemps, été, automne)

Pour une espèce non alternative, une fois les épis coupés, les repousses ne sont que végétatives (GILLET, 1980). Compte tenu des rythmes de coupe étudiés ici et du fait que Manade est une variété très précoce, on est en présence de repousses végétatives dès la fin mars, jusqu'au début de l'hiver, longue période pendant laquelle les rapports entre rayonnement, températures, disponibilités hydriques varient de façon importante.

a) Production de matière sèche et indice climatique E.T.R.

Dans quelle mesure, l'indice climatique Σ E.T.R. peut-il rendre compte des productions constatées sur cette période selon les différents rythmes d'exploitation ? Rappelons que les points considérés ici ne correspondent pas à l'établissement de courbes de croissance : il s'agit des disponibilités obtenues sur des mêmes placettes de coupe pour chaque temps de repousse. Sur l'ensemble des points, il y a une forte hétérogénéité des niveaux réels de nutrition azotée qui tiennent à deux faits : d'une part chaque coupe, surtout pour les rythmes courts, n'est pas obligatoirement accompagnée d'un apport d'azote ; d'autre part au moment des coupes, le rapport « teneur en azote/M.S. » n'est pas le même du fait des différences de temps de repousse.

Pour tenter d'ordonner cette hétérogénéité des points selon leur nutrition azotée, 4 ensembles ont été distingués :

— N VAR., ensemble de tous les résultats, où la nutrition azotée réelle est la plus variable ;

— N APP., résultats obtenus sur des coupes qui suivent immédiatement un apport d'engrais azoté ;

— NC. 1 et NC. 2 (N Contrôlé) où les données sont choisies en référence à une gamme de dilution « teneur en azote/M.S. » (figure 4), (LEMAIRE, SALETTE, non publié). Les deux niveaux considérés ici correspondent chacun à un niveau d'isodilution, NC. 1 correspondant à une alimentation azotée plus importante. Ces niveaux sont constatés a posteriori, après analyse des récoltes ; ils ne correspondent pas à une pratique définie de fumure azotée.

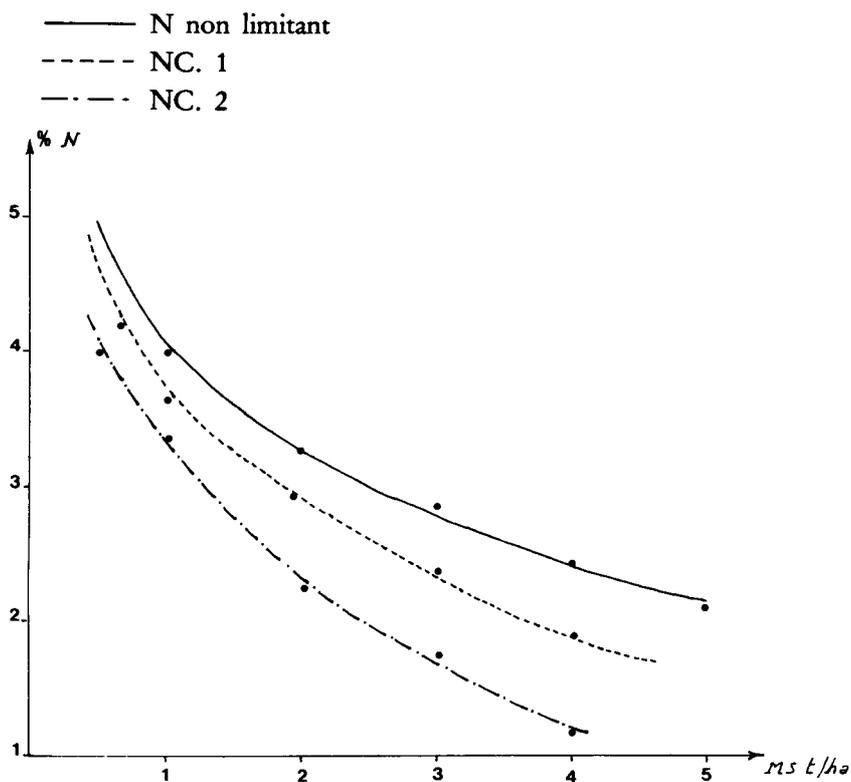
Les ajustements obtenus entre les productions de matière sèche et E.T.R. sont rassemblés dans le tableau IV. La figure 5 permet de visualiser le nuage de points correspondant à l'ensemble N APP., tandis que la figure 6 rassemble sur le même graphique les équations d'ajustement calculées pour chaque combinaison possible rythme de coupe-azote.

Enfin, les équations calculées ici correspondent à des équations linéaires. Tous les calculs ont également été faits avec une forme sigmoïde non symétrique (équation de GOMPERTZ ; HUNT, 1982) pour tenir compte des variations de vitesses de croissance selon les durées de repousse et améliorer de futures interpolations. Comme les résultats ne sont pratiquement pas différents, il est évidemment plus simple de ne conserver que la forme linéaire.

Les résultats ne concernent pas ici le rythme T2 : l'indice E.T.R. devrait être calculé sur un pas de temps plus court que la décade pour que les résultats soient interprétables.

Pour les autres rythmes (tableau IV), on peut constater que les taux d'explication sont en général bons, surtout pour les rythmes T6 et T8, ou bien lorsque l'hétérogénéité de la nutrition azotée est moins importante (N APP). Ce point sera discuté plus loin. L'augmentation de la pente de la régression d'un rythme à l'autre s'explique en considérant l'influence de la

FIGURE 4
SCHÉMATISATION DES COURBES DE DILUTION RETENUES
POUR L'ÉTUDE A POSTERIORI DE 2 NIVEAUX
DE NUTRITION AZOTÉE



durée de repousse sur la vitesse moyenne de croissance. Les valeurs de « a », abscisse à l'origine, correspondent aux valeurs d'E.T.R. pour lesquelles la production est nulle. Il est difficile dans cet essai de les interpréter en tant que telles : elles paraissent plutôt fonction des pentes des droites représentatives de chaque rythme de coupe.

TABLEAU IV
PARAMÈTRES POUR L'ENSEMBLE DES REPOUSSES FEUILLUES
DES RÉGRESSIONS LINÉAIRES ENTRE HERBE RÉCOLTÉE
ET INDICE E.T.R.

$MS = b(\sum ETR - a)$					
MS en Kg/ha ; ETR en mm					
	b	a	r	Nbre de points	
N. VAR					
T4	14.7	6.56	0.65	42	
T6	18.2	17.23	0.81	29	
T8	19.2	11.95	0.78	20	
T10	13.8	- 12.42	0.84	14	
N. APP					
T4	23.1	22.5	0.81	11	
T6	23.6	23.9	0.88	11	
T8	25.2	32.3	0.91	11	
Tous rythmes confondus					
N. VAR	17	12	0.82	143	
N. APP	21.4	20.4	0.87	45	
N.C.1.	20.4	7.7	0.94	13	
N.C.2.	16.1	15	0.87	23	

d'une fétuque élevée

FIGURE 5
RELATION ENTRE PRODUCTION RÉCOLTÉE
EN CONDITION SÈCHE ET E.T.R. (CALCULÉE)
POUR LES DIFFÉRENTS RYTHMES DE COUPE
(● T2, ○ T4 et T'4, △ T6 et T'6, × T6N, ▲ T8 et T'8, □ T10).
NIVEAU DE NUTRITION AZOTÉE N.APP

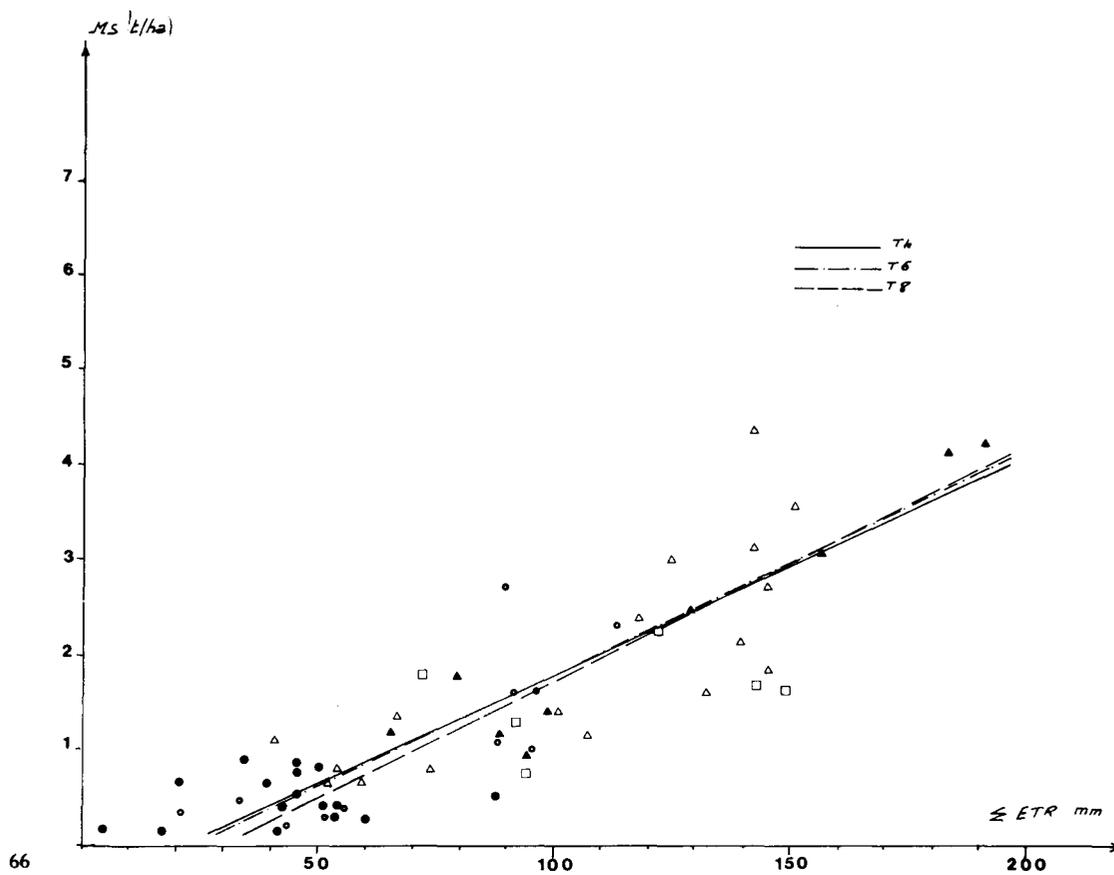
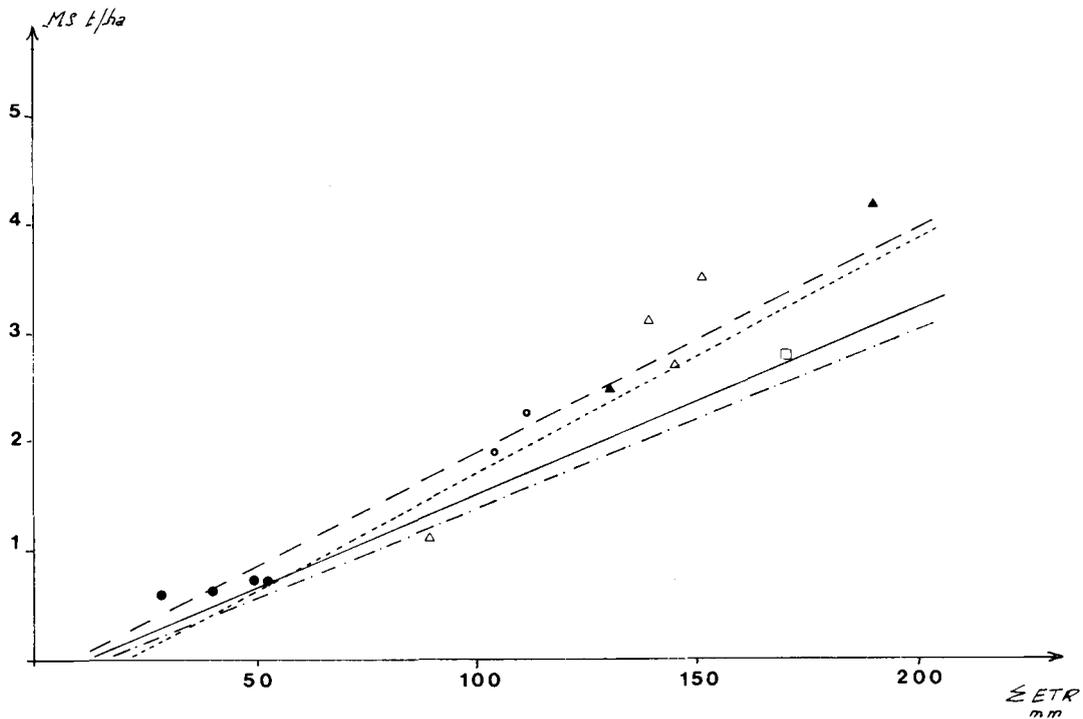


FIGURE 6
TRACÉS DES ÉQUATIONS DE RÉGRESSION
ENTRE CROISSANCE ET E.T.R. EN SEC
POUR LES DIFFÉRENTS NIVEAUX DE NUTRITION AZOTÉE.
 — N. VAR. ; - - - - N. APP. — - - - NC. 1 ; - - - - NC. 2 ;
 pour NC. 1 on indique les points des différents rythmes de coupe :
 ● T2, ○ T4 et T'4, △ T6 et T'6, ▲ T8 et T'8, □ T10.



Cependant, les valeurs observées pour b et a pour chacun des deux groupes de points N VAR., N APP conduisent finalement à des droites peu différentes d'un rythme de coupe à l'autre (figure 5). Il peut y avoir là un élément de simplification important sur un plan pratique.

b) Discussion

— Effet de l'azote

A durée de repousse équivalente, on constate que les pentes des régressions et la part de variation expliquée par l'E.T.R. sont systématiquement augmentées si on compare les points N VAR. aux points N APP., où la nutrition azotée est a priori plus élevée et plus homogène (tableau IV). Cette amélioration est particulièrement nette pour le rythme T4. En ce qui concerne le rythme T10, on peut penser que le nombre de couples peu élevé (6) est responsable de l'absence de relation, surtout en regard de la relation obtenue avec l'ensemble des points (N VAR.) pour le même rythme.

Si maintenant on se réfère aux courbes d'isodilution NC. 1 et NC. 2, on remarque la très grande qualité des ajustements obtenus (tableau IV). Il ne s'agit cependant pas là de courbes de croissance, mais d'une représentation de l'effet de la sécheresse sur la production de repousses de durées variables, mais à nutrition azotée comparable. Ces courbes sont à comparer à celles de même nature, mais construites avec les points N VAR. et N APP. (tableau IV) : la précision des ajustements augmente notablement de N VAR. à NC. 2 et surtout de N APP. à NC. 1., comparaisons que l'examen de la figure 6 suggère d'effectuer.

Sur cette figure on remarque également l'absence de répartition préférentielle des points NC. 1 et NC. 2 selon la saison de production, ce qui suggère là aussi le rôle prépondérant de l'azote vis-à-vis de la réponse à l'eau pour chaque saison.

— Effets saisonniers

Il est souvent mis en avant une moins bonne efficacité de l'eau pour les graminées fourragères en été (MARTY et PUECH, 1971). Bien qu'ici nous ne disposons pas de mesures de consommations d'eau in situ, mais seulement de bilans calculés, l'examen détaillé des nuages de points correspondant à chaque rythme de coupe n'a pas montré de répartition préférentielle selon les saisons. Cette constatation a été faite également sur des repousses feuillues de fétuque irriguée, sur le même terrain, avec le même protocole, observations que rejoignent également des travaux en cours sur

dactyle (courbes de croissance de repousses feuillues de juin à octobre, avec mesures de consommation d'eau et contrôle de la nutrition azotée par examen des courbes de dilution ; DURU et LANGLET, en cours).

Dans l'état actuel de nos données, nous ne pouvons aller plus loin que ce constat mais indiquer quelques points qui apparaissent essentiels pour l'étude de cette question :

— comparer des réponses à l'eau pour des états physiologiques analogues : croissance reproductrice ou repousses feuillues ;

— connaître les niveaux réels de nutrition azotée et se situer à des niveaux comparables ; nous avons vu en effet que la dispersion de nos points se réduisaient au fur et à mesure que la nutrition azotée était plus homogène et plus élevée ;

— observer des courbes de croissance et les différents états du couvert végétal. En effet, comme d'autres auteurs (MERIAUX et DELECOLLE, 1980) nous constatons bien que l'eau et l'azote sont les facteurs principaux expliquant les écarts de production, mais leur mode d'action sur la morphogénèse du couvert végétal est mal connue.

Enfin, des travaux récents (NIQUEUX et ARNAUD, 1985) ont mis en évidence une moins bonne explication par l'E.T.R. de la production des repousses végétatives qui suivent immédiatement la coupe de la pousse reproductrice. Nous ne retrouvons pas ce phénomène ici, sans que nous puissions interpréter ce constat.

— *Interaction avec d'autres variables climatiques*

Dans l'analyse des relations climat-production fourragère, de MONTARD (1981, 1984) a montré la hiérarchie et le rôle de différents facteurs climatiques, ainsi que de l'arrière-effet de déficits hydriques. Dans cet esprit, l'indice agroclimatique de TURC (1967) représente une combinaison décadaire de la température, du rayonnement incident, de l'insolation, de l'alimentation en eau, avec intégration d'arrière-effets éventuels de ce facteur. Utilisé antérieurement par certains auteurs (FELIX et RAUZY, 1971 ; METTAUER, 1978 ; LANGLET et al., 1979 ; DURU, 1981), son calcul a été informatisé et transformé, notamment vis-à-vis de la prise en

compte du rayonnement pour une utilisation régionale et pour intégrer un facteur tenant compte de l'humidité relative de l'air (LANGLET, DURU, RELIER non publié). Sur nos données, son utilisation apparaît équivalente à Σ E.T.R., qui est évidemment plus simple à utiliser.

La prise en compte des niveaux d'alimentation hydrique (E.T.R./E.T.M.) de la période précédant la repousse étudiée n'a pas non plus conduit à de meilleurs résultats.

On peut objecter à cette démarche que les pondérations des différents facteurs climatiques de l'indice seraient à étudier, ou que la forme choisie pour exprimer la contrainte hydrique (E.T.R./E.T.M.) n'est pas la seule possible. En réalité, il ne faut pas oublier :

— que l'objectif dans ce travail est de tester la validité d'un indice climatique simple à utiliser localement pour les repousses feuillues et suffisamment souple pour pouvoir être utilisé pour des durées de croissance variables ;

— qu'enfin, sur un plan plus physiologique, il semble difficile d'aller plus loin par la seule démarche statistique, sans disposer d'observations des différents états et des croissances des couverts prairiaux en relation avec un mode d'action connu ou hypothétique de ces facteurs sur la morphogénèse et la production de ces couverts. On peut penser qu'un besoin de ce type de connaissance est nécessaire pour disposer d'outils qui puissent rester simples à utiliser, tout en étant suffisamment représentatifs de diversités écologiques et techniques, ce qui correspond aux réalités régionales agricoles.

III - VALIDATION DES MODÈLES ET DISCUSSION

1. Validation

Nous disposons de deux sources de données indépendantes pour valider les modèles établis ci-dessus en condition sèche. Il s'agit d'une part des traitements complémentaires (coupe chaque fois que la croissance atteint 1 ou 1,5 t M.S., Ts1, Ts2 et coupes permettant d'assurer une récolte journalière

lière d'un niveau donné Tb1, Tb2) réalisés en 1982 et 1983 et d'autre part, des repousses végétatives en 1980 (coupes de 2 à 6 semaines : T2 à T6).

a) Traitements complémentaires : croissances reproductrices de la sortie d'hiver à début juillet

Nous avons utilisé les équations des repousses reproductrices correspondant au déprimage de février pour les premiers prélèvements et celles de mars pour les deuxièmes. Pour les repousses végétatives, nous avons utilisé d'une part la régression générale, sans tenir compte des niveaux de nutrition azotée, puis la régression correspondant aux repousses ayant reçu un apport d'azote. Les rythmes de coupe considérés correspondent à des temps de repousse compris le plus fréquemment entre 20 et 30 jours (extrêmes : de 13 à 59).

Pour l'ensemble des points nous avons :

$$MSm = 0,870 MSc + 135,3 \quad r = 0,912 \text{ (39 données).}$$

Pour les repousses ayant reçu une fertilisation azotée :

$$MSm = 0,916 MSc + 100,4 \quad r = 0,957 \text{ (16 données) avec :}$$

$MSm = \text{matière sèche mesurée et } MSc = \text{matière sèche calculée (figure 7).}$

b) Repousses végétatives

Les productions calculées relativement aux productions mesurées sont représentées sur la figure 8. Nous avons pour l'ensemble des points :

$$MSm = 1,21 MSc - 355,1 \quad r = 0,884 \text{ (28 données)}$$

et pour les coupes ayant reçu de l'azote :

$$MSm = 1,21 MSc - 196,9 \quad r = 0,983 \text{ (8 données).}$$

Nous notons que les écarts les plus importants entre MSm et MSc correspondent aux données postérieures à juillet. Nous interprétons la surestimation le plus souvent importante de la croissance du fait de la nutrition azotée. L'année 1980 se caractérise par le déficit hydrique le plus tardif et le plus faible de telle sorte que les effets d'une insuffisance d'apport d'azote sont accrus comparativement aux autres années où le

FIGURE 7
RELATIONS ENTRE PRODUCTION MESURÉE (MSm)
OU CALCULÉE (MScal) POUR LES RYTHMES DE COUPE Ts1, 2
et Tb1, 2 ; ● pousses reproductrices,
○ repousses végétatives

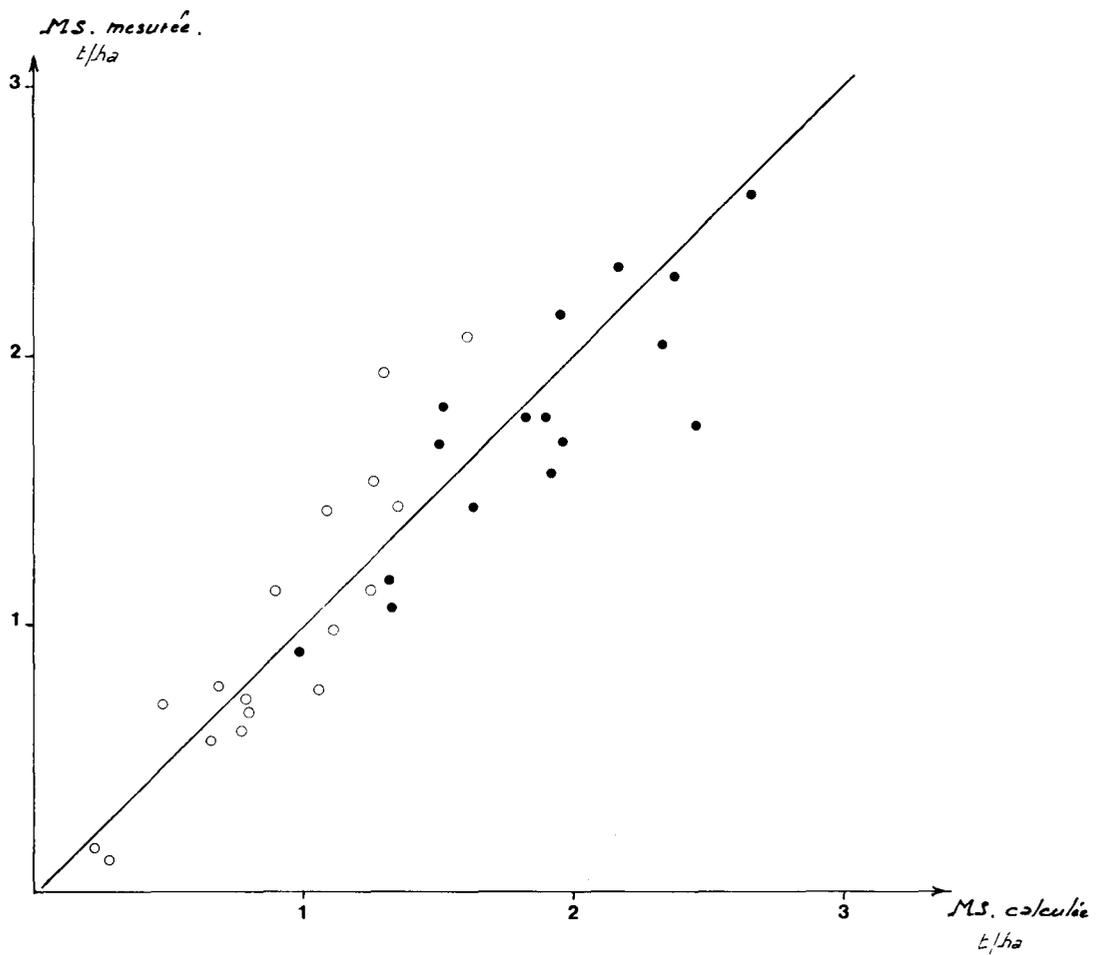
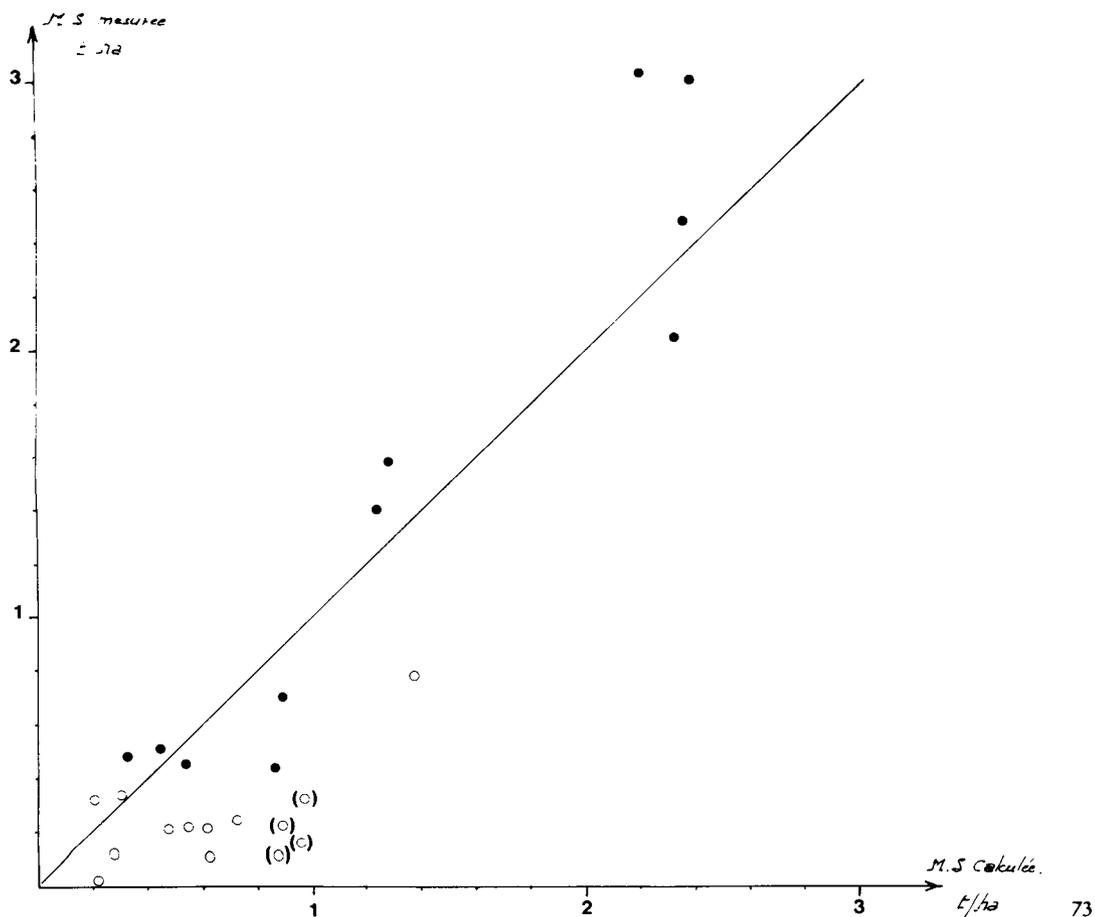


FIGURE 8
RELATIONS ENTRE PRODUCTION MESURÉE (MSm)
ET CALCULÉE (MScal)
POUR LES REPOUSSES VÉGÉTATIVES (1980) ;
 repousses antérieures ● et postérieures ○ à juillet ;
 (○) données pour lesquelles l'apport d'azote a été très postérieur
 au retour des pluies en fin d'été



potentiel de croissance a été moindre à la même période. Par ailleurs, c'est en 1980 que l'apport d'azote de fin d'été a été le plus décalé par rapport au retour des pluies. Ces remarques renforcent les conclusions précédentes concernant la nécessité du contrôle de la nutrition azotée pour interpréter les relations croissance-climat.

2. Interaction, rythme de coupe, nutrition azotée

Étant donné la diminution de la teneur en azote au cours de la croissance, les besoins en azote pour des coupes fréquentes sont plus importants que pour des rythmes plus espacés. Néanmoins, même en conditions de nutrition azotée non limitante, les productions sont inférieures dans le cas des rythmes de coupe élevés.

Dans le tableau V sont rassemblés des éléments de bibliographie sur les

TABLEAU V
DIFFÉRENCES RELATIVES DE PRODUCTION $(T_j - T_i)/T_j$
SELON LA FRÉQUENCE D'EXPLOITATION
ET L'APPORT D'AZOTE
(i et j fréquences de coupe en semaines ; en %)

références et couvert végétal	années	rythmes comparés	azote apporté (kg/ha)				
			0	225-330	530-670	900-1000	1200-1500
- Frame (fêtuque en association)	1973	T3/T6	28	28	16	-	-
- Wilman et al. (ray-grass Anglais et d'Italie)	1976	T3/T8	48	34	27	-	-
- Chestnutt et al. (ray-grass d'Italie)	1977	T3/T8 T2/T8	-	32 45	25 34	-	-
- Bartholomew and Chestnutt (ray-grass d'Italie)	1977	T3/T10	58	42	28	23	20
- Sibma et Alberta (ray-grass Anglais)	1980	T1/T7 T2/T6	-	- 53	31 24	31	-
- fêtuque Auzeville (81 à 83) production globale	sec	T2/T8	-	49	-	-	-
	sec	T4/T8	-	23	-	-	-
production après la floraison du 1er cycle	sec	T2/T8	-	64	-	-	-

interactions rythmes de coupe, nutrition azotée. On observe que les différences entre rythmes sont d'autant plus importantes que d'une part la quantité d'azote apportée est faible et d'autre part le rythme de coupe adopté par rapport au rythme témoin est fréquent. Avec des fertilisations azotées élevées, on peut faire l'hypothèse que les niveaux de nutrition azotée sont voisins selon les rythmes, on observe des différences relatives de niveaux de production de -25 % et -34 % entre respectivement T3/T8 et T2/T8. La moyenne (1981 à 1983) des résultats obtenus sur fétuque concorde bien avec ces éléments de bibliographie compte tenu des apports d'azote totaux effectués. Notons que si l'on effectue ces comparaisons non plus globalement sur l'année mais après la floraison du 1^{er} cycle, les écarts entre rythmes sont accentués.

CONCLUSION

Les résultats de croissance aux différentes saisons en relation avec le climat confirme l'hypothèse émise par GILLET et al. (1984) : il existerait des programmes potentiels de croissance aérienne liés à des états d'induction différents.

En mode reproducteur, et en condition de nutrition azotée non limitante, la vitesse de croissance au printemps est peu dépendante des modalités d'exploitation d'automne et de printemps, du moins dans une gamme assez large. Par contre, la date de démarrage apparent dépend fortement des modalités d'exploitation de printemps et d'automne (interaction entre date d'exploitation, nutrition azotée et climat, sur le nombre de talles).

En repousse végétative, nous n'avons pas observé de différences d'efficacité en fonction de la saison (printemps, été, automne). On peut penser que le « creux de production estival » est avant tout climatique (alimentation en eau) et ne découle pas d'un comportement physiologique différent en été, au printemps et à l'automne lorsque la fétuque est en croissance végétative. Cette hypothèse serait à confirmer avec des mesures de consommation d'eau et non par un calcul à partir d'un indice climatique.

Il apparaît que l'indice Σ E.T.R. peut être utilisé à l'échelle locale pour connaître la disponibilité fourragère en fonction des disponibilités

hydriques pour une gamme assez étendue de durée de repousses feuillues : de 4 à 8 semaines sur l'ensemble de l'année. En situation hydrique non limitante (E.T.M., ou à son voisinage), des premières analyses non présentées ici indiquent que cet indice climatique est insuffisant, ce qui vient renforcer le besoin déjà constaté d'une connaissance plus analytique des relations climat-production.

La prévision du climat et des fournitures en azote par le sol n'étant actuellement pas possibles, les études climatiques fréquentielles permettent seulement de définir des stratégies de conduite des surfaces fourragères compte tenu des caractéristiques pédoclimatiques et des potentiels de croissance des espèces : choix des espèces et des variétés, de l'assolement, de l'importance des stocks relativement au pâturage pour une campagne. Mais le problème reste entier au niveau de la gestion à court terme une fois ces stratégies définies. Dans ce cas, il faut faire coïncider les ressources fourragères et les besoins du troupeau en utilisant les variations possibles de surface, de fertilisation azotée, de rythme d'exploitation. Les combinaisons possibles entre ces moyens d'adaptation étant nombreuses et variées, on peut définir a priori un rythme d'exploitation optimum.

Les travaux à poursuivre doivent avoir pour objectif de connaître à chaque instant les potentiels de croissance des différents couverts prairiaux, ainsi que leurs états repères correspondant à telle ou telle situation écologique ou technique. En effet, ceci doit permettre d'évaluer le degré de réalisation de ce potentiel, d'étudier comment l'atteindre, ou d'une manière plus générale comment se rapprocher d'un objectif donné de production. La connaissance des lois de dilution de l'azote, l'observation du tallage au début et en fin d'hiver permettent de progresser dans cette voie. Mais notre connaissance est moins avancée en ce qui concerne les repousses végétales.

Michel DURU (*,**) et Alain LANGLET (*,**),
avec la collaboration de Roger VIARD () et Louis SOS (*)*
I.N.R.A. - Centre de Recherches de Toulouse
Station d'Agronomie () et Unité de Recherche sur*
*les Systèmes Agraires et Développement (**)*
(Haute Garonne).

LISTE DE MOTS-CLÉS

Courbe de croissance, déprimage, évapotranspiration réelle, *Festuca arundinacea*, fétuque élevée, gramineae, indice climatique, Midi-Pyrénées, modélisation, nutrition azotée, repous-ses, rythme de coupe, saison, sécheresse, somme de températures.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARTHOLOMEW P.W. et CHESTNUTT D.M.B. (1977) : « The effect of a wide range of fertilizer nitrogen application rates and defoliation intervals on the drymatter production, seasonal response to nitrogen, persistence and aspects of chemical composition of perennial ryegrass », *J. Agric. Sci., Camb.* (88), 711-721.
- CHESTNUTT D.M.B., MURDOCH J.C., HARRINGTON F.J. et BINNIE R.C. (1977) : « The effect of cutting frequency and applied nitrogen on production and digestibility of perennial ryegrass », *J. of Br. Grassland Soc.*, (32), 177-183.
- DURU M. (1981) : « Mode d'exploitation des prés de fauche dans les Pyrénées Centrales. Références expérimentales, pratique des agriculteurs », *Fourrages*, n° 87, 53-90.
- DURU M. (1985) : « Winter and spring growth variability of grazed permanent meadow. The case of the Pyrenees mountains », *XV^e Intern. Grass. Cong. Kyoto*, 24-31/8/1985 (à paraître).
- FAIVRE C. et FELIX I. (1984) : *Contribution à l'étude de la production printanière des prairies dans le marais de Rochefort. Exemple d'utilisation : la mise à l'herbe*, mémoire de stage I.N.A.-P.G., 91 p, (sous la direction de DAVID G., LEMAIRE G., PONS Y.).
- FELIX L. et RAUZY G. (1971) : « Contribution à la prévision de la production de plantes cultivées au moyen d'un indice agroclimatique local », *Fourrages*, n° 45, 71-92.
- FRAME J. (1973) : « The yield response of a tall fescue/white clover sward to nitrogen rate and harvesting frequency », *J. Br. Grassland Soc.*, (28), 139-147.
- GILLET M. (1980) : *Les graminées fourragères. Description, fonctionnement, application à la culture de l'herbe*, Coll. « Nature et Agriculture », Gauthier Villars, Paris, 306 p.

- GILLET M., LEMAIRE G. et GOSSE G. (1984) : « Essai d'élaboration d'un schéma global de la croissance des graminées fourragères », *Agronomie*, 4 (1), 75-82.
- HUNT R. (1982) : *Plant growth curves. The functional approach to plant growth analysis*, Edward Arnold, London, 248 pages.
- KORNHER A. et TORSSELL B.W.R. (1983a) : « Estimation of parameters in a yield prediction model for temporary grassland using regional experimental data », *Swedish J. Agric. Res.*, 13, 139-144.
- KORNHER A. et TORSSELL B.W.R. (1983b) : « Simulation of weather-management interactions in temporary grasslands in Sweden », *Swedish J. Agric. Res.*, 13, 145-155.
- LANGLET A., FLAMANT J.-C., MOLENAT G. et OSTY P.-L. (1979) : « Les parcours des Grands Causes : contraintes et possibilités techniques d'une mise en valeur par l'élevage ovin », *Utilisation par les ruminants des pâturages d'altitude et des parcours méditerranéens*, 257-334, Versailles, I.N.R.A. Publications, 574 p.
- LEMAIRE G. et SALETTE J. (1981) : « Analyse de l'influence de la température sur la croissance de printemps de graminées fourragères », *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 292, série III, 843-846.
- LEMAIRE G. et SALETTE J. (1984) : « Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I. Étude de l'effet du milieu », *Agronomie*, 4 (5), 423-430.
- LEMAIRE G. (1985) : *Cinétique de croissance d'un peuplement de fétuque élevée (Festuca arundinacea Schreb) pendant l'hiver et le printemps. Effet des facteurs climatiques*, thèse, Université de Caen, U.E.R. de Sciences Naturelles, 96 p.
- MAERTENS C., CABELGUENNE M. (1971) : « Influence des modalités de la fourniture d'eau par le sol sur l'alimentation hydrique de culture de fétuque et de luzerne », *C.R. Acad. Agr. France*, 920-926.
- MARTY J.-R. et PUECH J. (1971) : « Efficience de l'eau en production fourragère », *C.R. Acad. Agr. France*, 938-949.
- MERIAUX Suzanne (1980) : « Effects of climate on the yield response of two fescue species to water and nitrogen application », *Irrigation Science*, 1, 233-239.
- MERIAUX Suzanne, DELECOLLE R. (1980) : « Hiérarchie entre les facteurs physiques du milieu intervenant sur le taux de conversion de l'énergie solaire pour quelques graminées fourragères », *C.R. Acad. Agr. France*, 18, 1559-1575.

- METTAUER H. (1978) : « Contribution à l'étude des potentialités climatiques du massif vosgien », *Ann. Agron.*, 29 (6), 603-623.
- de MONTARD F.X. (1981) : « L'action des facteurs climatiques sur la croissance de l'herbe. Exemple d'une prairie à *Agrostis tenuis* et à *Poa pratensis* des Monts d'Auvergne », *Fourrages*, n° 85, 39-52.
- de MONTARD F.X. (1983) : « Climat et potentialités herbagères », *La Margeride, la montagne, les hommes*, 439-455, I.N.R.A. Publications.
- de MONTARD F.X. (1984) : « Integration of climatic factors in analysing experimental results in grassland and forage plant production », *Hill Land Symposium*, Galway 9-12/10/1984, 100-117, Ed. M.A. Toole, An Foras Taluntais, Irlande.
- MORLON P., PORQUET F., SERMAGE B et de VAUBERNIER E. (1985) : « Météorologie et croissance printanière de la prairie permanente en Lorraine », *Fourrages*, n° 101, 47-83.
- NIQUEUX M. et ARNAUD R. (1985) : « Étude du rythme de végétation des graminées fourragères : cas de la moyenne montagne », *Fourrages*, n° 103, 31-54.
- PARSON A.J. et ROBSON M.J. (1980) : « Seasonal changes in the physiology of S24 perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). 1. Response of leaf extension to temperature during the transition from vegetative to reproductive growth », *Ann. Bot.*, 46, 435-444.
- SALETTE J. et LEMAIRE G. (1981) : « Sur la variation de la teneur en azote des graminées fourragères pendant leur croissance : formulation d'une loi de dilution », *C.R. Acad. Sc. Paris*, t 292, série III, 875-878.
- SIBMA L. et ALBERTA Th. (1980) : « The effect of cutting frequency and nitrogen fertilizer rates on dry matter production, nitrogen uptake and herbage nitrate content », *Neth. J. agric. Sci*, 28, 243.
- TORSSELL B.W.R. et KORNER A. (1983) : « Validation of a yield prediction model for temporary grasslands », *Swedish J. Agric. Res.*, 13, 125-135.
- TORSSELL B.W.R. (1984) : « Descriptive and explanatory models for predicting grassland production », *10th E.G.F. Proceeding*, 494-504.
- TURC L. (1961) : « Évaluation des besoins en eau d'irrigation. Évapotranspiration potentielle », *Ann. Agron.*, 12, 13-49.
- TURC L. (1967) : « Incidence des facteurs macroclimatiques sur les productions végétales », *Fourrages*, n° 31, 10-35.

- de VRIES F.W.T. (1983) : « Modeling of growth and production », *Encyclopedia of plant physiology. New series*, Volume 12 D. Physiological plant ecology IV. Ecosystem processus : mineral cycling, productivity and man's influence, 117-150. Ed. by LANGE O.L., NOBEL P.S., OSMOND C.B., ZIEGLER H., Berlin Springer. Verlag. Cent. for Agrobiol. Res. 67000 AA Wageningen Netherlands.
- WALLACH D. et GUTMAN M. (1976) : « Environment dependant logistic equations applied to natural pasture growth curves », *Agr. Met.*, 16, 389-404.
- WILMAN D., DROUSHIOTIS D., KOOCHEKI A., LWOGA A.B. et SHIM J.S. (1976) : « The effect of interval between harvests, and nitrogen application on the proportion and yield of crop fractions in four ryegrass varieties in the first harvest year », *J. Agr. Sci. Camb.*, 86, 189-201.
- YU O., GINTZBURGER G. et GOUNOT M. (1985) : « Modèle de fonctionnement d'un peuplement de dactyle (*Dactylis glomerata* L.) en phase végétative. Approche morphogénétique », *Ecol. Plant*, 10 (2), 107-139.