

Pédoclimat, fertilisation et croissance des prairies permanentes au printemps.

III - Vitesse d'accumulation de la matière sèche et prévision de récolte à l'épiaison

M. Duru¹, I. Calvière^{1*}

L'aide à la conception de plans de campagne et à la maîtrise des systèmes fourragers demande de construire deux types de modèles (DURU et LANGLET, 1990). Les uns doivent permettre d'estimer les quantités de matière sèche auxquelles on peut s'attendre en fonction des facteurs du milieu et des intrants. L'une des sorties de ces modèles est une estimation de la surface nécessaire pour nourrir le troupeau durant une période donnée. Les autres modèles doivent avoir un caractère prédictif à court terme, à partir d'un diagnostic réalisé in situ. Ils doivent permettre d'anticiper rapidement les états du peuplement de façon à adapter les

* avec la collaboration de Y. Cransac², H. Ducrocq³, R. Roussel³, M. Rozières², L. Sos¹ et R. Viard¹.

MOTS CLÉS

Croissance, facteur limitant, fertilisation, hauteur d'herbe, nutrition, prairie permanente, prévision, sénescence.

KEY-WORDS

Fertilization, grass height, herbage growth, limiting factor, permanent pasture, plant nutrition, prediction, senescence.

AUTEURS

1 : I.N.R.A., Station d'agronomie, BP 27, F-31326 Castanet.

2 : Chambre d'agriculture de l'Aveyron, Carrefour de l'agriculture, F-12000 Rodez.

3 : E.N.I.T.A., Bd Olivier de Serres, F-21100 Quétigny.

techniques à mettre en œuvre aux particularités climatiques de la saison. Il doit être ainsi possible de prendre en compte les arrière-effets des modes d'exploitation et du climat que l'on sait mal modéliser.

La base commune à ces approches est que l'**accumulation de matière sèche peut être modélisée** en fonction du rayonnement intercepté (GOSSE et al., 1986), tant que la sénescence est négligeable. Toutefois, au printemps les températures étant fortement corrélées au rayonnement, et l'indice foliaire étant dépendant des températures, on peut utiliser cette dernière variable dans les situations où on ne dispose pas de mesures de rayonnement (LEMAIRE, 1985). Dans un article précédent, nous avons étudié la précocité du départ en végétation, définie par le moment où la plus grande partie du rayonnement est interceptée (DURU et al., 1993a). Deux hypothèses sont émises pour l'étude de la croissance au delà de cette première phase :

— En premier lieu, la pente de la relation entre la quantité de matière sèche et la somme de températures est principalement dépendante des niveaux de nutrition minérale, ainsi que de la nature des espèces présentes.

— En second lieu, le rendement à une date donnée sera d'autant plus élevé que le départ en végétation est précoce.

La sénescence d'un couvert herbager est continue. En effet, même en hiver, des feuilles apparaissent puis deviennent sénescentes (VINE, 1983 ; DURU, 1983 ; LEMAIRE, 1985). Toutefois, les feuilles qui apparaissent au printemps sont de plus en plus longues, en relation avec l'augmentation des températures, alors que celles qui disparaissent sont apparues en hiver et sont de ce fait plus courtes. La quantité de matériel sénescant est alors négligeable.

Notre objectif est de hiérarchiser les effets des pratiques et du milieu sur la vitesse d'accumulation de la masse d'herbe une fois la plus grande partie du rayonnement intercepté. Par ailleurs, on recherchera dans quelle mesure des observations en début de printemps permettent de prédire l'état de la prairie à l'épiaison des graminées.

Matériel et méthodes

1. Sites et parcelles

Ils ont été présentés de manière détaillée auparavant (DURU et al., 1993a et 1993b). Trois sites et deux parcelles sur chacun d'eux ont été retenus : Pyrénées centrales (1 250 m), Aubrac (900 à 1 000 m), vallée de l'Aveyron (600 à 800 m). Sur chaque site, les parcelles ont été échantillonnées de façon à recouvrir un gradient de nutrition P et K. Dans la suite du texte, les parcelles seront caractérisées

par les deux premières lettres indiquant le site (PY : Pyrénées, AU : Aubrac, VA : vallée de l'Aveyron). Une troisième lettre rendra compte globalement du niveau de nutrition PK en l'absence de fertilisation minérale (S : satisfaisant, D : déficient).

2. Traitements de fertilisation

Chaque traitement est caractérisé par un code. La lettre indique l'élément considéré, elle est suivie du chiffre 1 ou 0 selon que l'élément (P ou N) a été apporté ou non. Seulement une partie des données sont retenues pour cet article.

En Aubrac et dans la vallée de l'Aveyron, l'étude a duré 4 années (1988 à 1991) pour les deux traitements témoins différant par l'apport d'azote (P0N1 : 150 kg N/ha, P0N0 : pas d'apport). La fertilisation a été apportée début février (Aveyron), ou début mars (Aubrac). Le premier apport phosphopotassique a été effectué en 1989 ; il a été renouvelé sur les mêmes emplacements aux printemps 1990 et 1991. L'apport d'azote du traitement témoin est en revanche réalisé chaque année sur des emplacements différents.

Dans les Pyrénées, les deux parcelles sont situées à proximité l'une de l'autre. L'expérimentation a été initialisée en 1986 et a été poursuivie jusqu'en 1991, mais les mesures n'ont pas été effectuées en 1989 et 1990. Les traitements sont P0N0 (sans apport), P0N1 (apport d'azote seul de 120 kg/ha), P1N1 (apport de P et K avec azote) et P1N0 (seulement en 1991). Pour ces derniers traitements, les emplacements d'apports de P et K sont les mêmes chaque année.

Au sein de chaque parcelle, les emplacements nécessaires aux prélèvements d'herbe pour chaque date et année ont été délimités en début d'expérimentation pour chacun des traitements.

3. Mesures et caractérisation des parcelles

Les mesures de hauteur d'herbe ont été réalisées avec le "sward stick" (BIRCHAM, 1981), dont nous avons présenté de premiers résultats précédemment (DURU et BOSSUET, 1992).

Les mesures de biomasse ont été effectuées à 6 dates espacées d'environ 2 semaines pour les traitements témoins (sans apport de P et K) et de 4 à 6 pour les autres.

Ces données nous permettent de caractériser les niveaux de nutrition minérale de chacun des traitements selon la procédure décrite précédemment (DURU et al., 1993a). La composition botanique a été caractérisée chaque année par la méthode des points quadrats. En 1991, les pourcentages de graminées (calculés par la codification biomasse : on note le nombre totaux de contacts d'une même espèce) sont

en 1991 respectivement pour les traitements P0 et P1 de 61-62 (VA.S), 59-61 (VA.D), 59-73 (AU.S), 56-62 (AU.D), 36-40 (PY.S), 42-64 (PY.D). Les principales dicotylédones (autres que les légumineuses) sont *Ranunculus acris* (VA.S), *Centaurea jacea*, *Ranunculus acris* et *Taraxacum officinalis* (VA.D), *Ranunculus acris*, *Poligonum bistorta* et *Scorzonera humilis* (AU.S), *Cerastium fontanum*, *Narcissus pseudonarcissus*, *Plantago lanceolata* et *Elymus repens* (AU.D), *Chaerophyllum aureum*, *Ranunculus acris* (PY.S), *Sanguisorba minor*, *Rhinantus major* et *Plantago lanceolata* (PY.D).

4. Caractérisation du climat

L'ETP (Evapo-Transpiration Potentielle) a été calculée à partir de la formule de TURC (1961) pour les sites PY et VA.D pour lesquels nous disposons des durées d'insolation. Pour calculer le déficit climatique, nous avons considéré 1,2 ETP (DURU et LANGLET, 1986). Pour le site VA.D, nous avons un bon accord entre ces valeurs et l'ETP Penmann. Les valeurs décadaires cumulées des déficits climatiques sont indiquées dans le tableau 1. Pour les autres parcelles (VA et AU), on peut penser que les déficits sont égaux ou inférieurs compte tenu de la pluviométrie (DURU et al., 1993b). Les températures moyennes journalières, enregistrées pour chacune des parcelles, ont été présentées précédemment (DURU et al., 1993b).

5. Traitement des données

Le calcul des sommes de températures a été initialisé le 1^{er} février (DURU et al., 1993b). La valeur correspondant au ralentissement de l'accumulation de la masse d'herbe a été estimée par calcul de régression entre la masse d'herbe (matière sèche)

Mois Décade	février			mars			avril			mai			juin		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
PY - 1986										13	37	50	50	50	50
- 1987							29			22	20	50	50	29	50
- 1988															
- 1991				19	38	47	17				13		6	22	50
VAD - 1988							14	5					18	37	50
- 1989	10	9								32	50	50	23	50	50
- 1990							10						5		31
- 1991							11			27	50		30	24	50

TABLEAU 1 : Déficit hydrique cumulé (pluie - 1,2.ETP_{Turc}, en mm) pour une hypothèse de Réserve Utile de 50 mm dans les sites Pyrénées (PY) et Vallée de l'Aveyron (VA.D).

TABLE 1 : Cumulated water deficit (rainfall - 1.2 × "Turc" potential evapotranspiration) for a hypothetical soil water capacity of 50 mm ; Pyrénées (PY) and Aveyron Valley (VA.D) areas.

et la somme de températures aux différentes dates de mesure pour les traitements P0N1 et P0N0 pour lesquels le nombre de mesures est le plus élevé. On retient la date à partir de laquelle un changement significatif de pente est observé (diminution de la pente, sans réduction de la précision). Si un tel changement n'est pas observé, la somme de températures correspondant à l'observation la plus tardive est donnée par défaut.

Pour les pousses où le déficit en eau est faible ou nul, la quantité de matière sèche à un stade voisin de l'épiaison des graminées a été modélisée de deux manières compte tenu des objectifs annoncés en introduction. En premier lieu, nous avons déterminé les paramètres des relations entre les rendements et les niveaux de nutrition minérale (DURU, 1992), en privilégiant l'azote. En second lieu, nous avons recherché si une mesure précoce de hauteur d'herbe pouvait permettre de prédire le rendement à une date ultérieure.

Résultats et discussion

1. Estimation de la date de ralentissement de l'accumulation de matière sèche

• Comparaison des traitements et parcelles

A titre d'exemple, nous avons tracé les courbes des traitements P0N1 du site PY (figure 1). Pour la parcelle S, le ralentissement d'accumulation de matière sèche est observé entre 900 et 1 100 °.jour, excepté l'année 1986 où il est plus précoce. Pour la parcelle D, les valeurs sont supérieures à celles de la parcelle S en 1988 et 1991.

Dans le cas du traitement P0N0 de la parcelle S (tableau 2), ces durées sont identiques (1986 et 1988) ou supérieures (1987 et 1991) à celles observées en P0N1, et la valeur observée en 1986 est la plus faible. Pour le traitement P0N0 de la parcelle D, les estimations sont égales (1986, 1988) ou supérieures (1987, 1991) à celles du traitement P0N1.

Dans la vallée de l'Aveyron, le ralentissement de l'accumulation de matière sèche est observé à partir de 895 °.jour pour la parcelle S. Pour deux années, il est borné supérieurement à 950 et 1 110 °.jour. Dans le cas du traitement P0N0, les estimations sont inférieures (1989), égales (1990, 1991) ou supérieures (1988). Pour la parcelle D, les estimations sont toujours supérieures à 1 000 °.jour, sauf pour le traitement P0N0 en 1988.

En Aubrac, les estimations sont supérieures à 934 °.jour pour les deux traitements de fertilisation de la parcelle S. Dans le cas de la parcelle D, elles sont

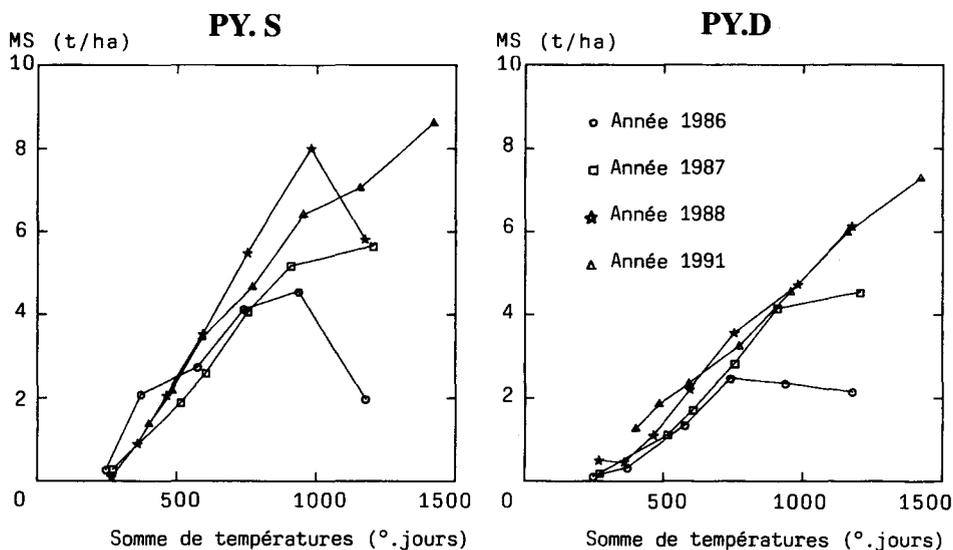


FIGURE 1 : Accumulation de matière sèche pour les traitements P0N1 des parcelles S et D dans les Pyrénées.

FIGURE 1 : Dry matter accumulation for treatments P0N1 of plots S and D in the Pyrénées area.

comprises entre 901 et 1 131 °.jour, excepté pour les deux traitements en 1989 et pour le traitement P0N0 en 1991, pour lesquels l'estimation n'est pas bornée supérieurement.

• Facteurs de variation et interprétation

Hormis un déficit hydrique, deux groupes de facteurs peuvent influencer le ralentissement d'accumulation de matière sèche :

— La nature des espèces intervient par leur phénologie et l'importance du type de ramet (végétatif ou reproducteur). Concernant la phénologie, d'une part il y a arrêt d'émission des feuilles à la floraison pour les espèces à floraison terminale, d'autre part la durée de vie des feuilles, estimée par le nombre de °.jour écoulés entre l'apparition d'une feuille et le début de sa sénescence, peut-être très variable selon les espèces. Elle est plus faible pour les graminées (450, 520 °.jour environ respectivement pour le dactyle et la fétuque élevée) que pour les dicotylédones (800 °.jour pour la renoucle bulbeuse et la sanguisorbe, plus de 1 000 °.jour pour le plantain lancéolé), (CALVIÈRE et DURU, 1992).

— Le deuxième facteur pouvant influencer la sénescence est l'auto-ombrage (WARNDORFF et al., 1987). On peut penser qu'une meilleure nutrition minérale peut accélérer la date de début d'accumulation de matériel sénescant en relation avec

un indice foliaire plus élevé. Enfin, l'alimentation en eau interviendra principalement sur la taille des feuilles plutôt que sur leur vitesse de sénescence (NORRIS, 1982).

La comparaison de l'ensemble des résultats montre que les valeurs les plus basses sont observées en 1986 pour le site PY (tableau 2). C'est vraisemblablement la sécheresse qui en est à l'origine (tableau 1).

La comparaison systématique des traitements P0N1 et P0N0 (23 couples de données) fait apparaître des durées supérieures pour le traitement P0N0 dans 6 cas, inférieures dans 2 cas et équivalentes dans les autres. Les valeurs inférieures sont a priori contraires à l'hypothèse émise. Pour ces deux couples de données (VAS.89, VAD.88), on note que l'écart de rendement entre les deux traitements est très impor-

Traitement	P0N1		P0N0	
	ΣT	MS	ΣT	MS
VA.S 1988	950-1110	7,4	>1110	5,7
1989	>1084	5,1	919-1084	2,7
1990	>997	8,3	>997	6,3
1991	895-948	7,6	895-948	6,3
VA.D 1988	>1091	9,1	901-1091	5,4
1989	>1006	5,6	>1006	4,9
1990	>1098	8,1	>1098	6,3
1991	>1035	9,4	>1035	6,5
AU.S 1988	>1070	9,7	>1070	8,5
1989	>934	8,2	>934	5,8
1990	>1077	10,0	>1077	9,5
AU.D 1988	912-1131	5,0	912-1131	3,4
1989	>973	6,1	>973	5,0
1990	1038-1110	6,4	1038-1110	5,5
1991	901-1014	5,7	>1014	4,0
PY.S 1986	740-936	4,1	740-936	2,4
1987	908-1204	5,2	>1204	3,9
1988	911-1173	8,0	911-1173	5,9
1991	954-1157	6,4	1157-1421	7,4
PY.D 1986	740-936	2,5	740-936	1,5
1987	908-1204	4,2	>1204	3,9
1988	>1173	7,3	>1173	5,5
1991	1157-1421	6,1	>1421	4,1

TABLEAU 2 : Somme de températures (à compter du 1^{er} février, ΣT en °.jours) à partir de laquelle la vitesse d'accumulation de matière sèche diminue, et production de matière sèche correspondante (MS, t/ha).

TABLE 2 : Cumulated temperatures (ΣT, °C.days, from 1st February), when dry matter accumulation begins to decrease, and corresponding dry matter yield (MS, t/ha).

Traitement	P0N1	P0N0	P1N1	P0N0/P0N1	P0N1/P1N1
VA.S 1988	10,2	9,5		0,93	
1989	6,3	3,9		0,62	
1990	11,9	9,5	12,5	0,80	0,95
1991	13,3	10,3	13,9	0,77	0,96
VA.D 1988	9,4	7,2		0,77	
1989	7,6	7,5		0,99	
1990	10,1	8,9	13,0	0,88	0,78
1991	10,6	8,1	15,2	0,76	0,70
AU.S 1988	10,1	7,5		0,74	
1989	11,3	9,8		0,87	
1990	13,3	11,4	13,9	0,86	0,96
1991					
AU.D 1988	6,9	4,5		0,65	
1989	10,0	8,8		0,88	
1990	10,7	8,7	12,4	0,81	0,86
1991	6,4	4,5	9,1	0,70	0,70
PY.S 1986	6,0	4,5		0,75	
1987	7,8	5,0		0,64	
1988	11,3	8,7	12,2	0,77	0,93
1991	8,9	8,0	14,8	0,90	0,60
PY.D 1986	4,9	2,7		0,55	
1987	6,3	4,3		0,68	
1988	6,6	6,0	9,8	0,91	0,67
1991	6,1	4,0	13,0	0,66	0,47

TABLEAU 3 : Vitesse d'accumulation de la matière sèche pour les différents sites (kg/°.jour) et rapports entre les traitements.

TABLE 3 : Dry matter accumulation rate (kg/degree-days) in different areas, and ratios between treatments.

tant. On peut penser alors que la déficience en azote a été trop importante pour assurer une croissance soutenue du traitement N0. En définitive, l'effet de la nutrition par auto-ombrage n'apparaît pas très important dans nos conditions d'étude.

Les écarts entre les traitements PON1 des parcelles de types S et D peuvent résulter des différences de composition botanique et d'auto-ombrage en relation avec la surface foliaire (ou la quantité de matière sèche). En vallée de l'Aveyron, on peut considérer que les valeurs sont plus élevées 2 années sur 4 pour la parcelle D alors que l'importance des graminées est similaire (cf. matériel et méthode), et les quantités de matière sèche à partir desquelles le ralentissement d'accumulation est observé sont plus élevées en D. En Aubrac, elles sont similaires. Dans les Pyrénées, les valeurs sont plus élevées pour la parcelle D, 2 des 3 années où n'a pas été observé un déficit hydrique élevé. On peut considérer que c'est la situation où les différences entre les parcelles de types S et D sont les plus marquées. D'une part, les rendements sont les plus faibles pour la parcelle D (moins d'auto-ombrage), d'autre part sa composition botanique est très différente. Sachant que sur cette parcelle dominant *Sanguisorba minor* (date de floraison précoce), *Rhinantus major* (date de floraison intermédiaire) et *Plantago lanceolata* (pas d'arrêt d'émission de feuilles à la floraison), et qu'en S la date de floraison de *Chaerophyllum aureum* est tardive, on ne peut conclure à un effet de la composition botanique. Cependant, pour une espèce donnée intervient la proportion de chacun des types de ramets, végétatif ou reproducteur, qui, nous l'avons montré précédemment pour le dactyle (DURU, 1989), peut varier en fonction des conditions de milieu.

Ces résultats gagneraient en précision si de telles observations étaient réalisées. Par ailleurs, la séparation du matériel vert du matériel sénescant n'a pas été effectuée. La vitesse d'accumulation que nous calculons dépend donc des vitesses d'apparition de nouveau matériel, mais aussi de la vitesse de transformation du matériel sénescant en litière. De ce fait, un ralentissement de l'accumulation de matière sèche peut avoir deux origines que nous ne pouvons quantifier dans cette étude.

De manière générale, les données de durée de vie des feuilles de différentes espèces indiquent que les ralentissements d'accumulation de matière sèche sont survenus après qu'une feuille apparue début février ait commencé sa sénescence, du moins pour les graminées. Les dynamiques d'accumulation observées au niveau du couvert peuvent s'interpréter par le fait que les premières feuilles apparues sont moins longues que les suivantes, notamment en relation avec l'augmentation des températures et de la quantité de rayonnement intercepté (PARSONS, 1988). En revanche, il est remarquable de constater des valeurs assez semblables entre sites et années. Ces valeurs sont par ailleurs du même ordre de grandeur que celle observée dans l'ouest de la France (1 000 °.jour; LEMAIRE et al., 1982).

2. Vitesse d'accumulation de la matière sèche

• Effets des traitements

Dans les Pyrénées, la comparaison des différentes années montre que les valeurs de pente sont les plus élevées en 1991 (traitement P1N1) et 1988 (traitements P0N1, P1N1), les plus faibles en 1986 pour les deux parcelles (tableau 3). Le rapport des valeurs des traitements P0N0 et P0N1 varie de 0,55 à 0,91. Il est le plus faible en 1986 (parcelle D) et en 1987 (parcelle S). Le rapport le plus élevé est observé en 1991 (parcelle S) ou 1988 (parcelle D). L'effet de l'apport de phosphore est marqué, particulièrement en 1991 (ratio P0N1/P1N1 de 0,47 et de 0,60).

En vallée de l'Aveyron, les vitesses sont les plus élevées en 1990 et 1991. Sans apport d'azote, la diminution des valeurs est très variable (ratio de 0,62 à 0,99). L'apport de P a l'effet le plus important pour la parcelle D (ratio P0N1/P1N1).

En Aubrac, les valeurs les plus élevées sont observées en 1990. L'effet de l'apport d'azote apparaît le plus important en 1988.

La comparaison de l'ensemble des données pour le traitement P1N1 montre que les valeurs maximales observées ne sont pas très différentes entre sites : 15,2 pour la vallée de l'Aveyron, 13,9 en Aubrac et 14,8 en Pyrénées.

Le fait que l'on observe presque toujours le même classement entre années, pour les parcelles et les traitements d'un même site, nous amène à formuler l'hypothèse d'une origine climatique à cette variabilité. Deux types de variables peuvent être invoqués. L'un concerne l'alimentation hydrique, l'autre la nutrition azotée en relation avec les fournitures par le sol. Concernant la comparaison des sites et des parcelles, une hypothèse supplémentaire, à savoir l'effet de la composition botanique, doit être prise en compte.

• Effet de la nutrition minérale sur la vitesse d'accumulation de la matière sèche

Les valeurs les plus basses observées pour chacun des sites (tableau 3) correspondent souvent aux années où un déficit hydrique a été observé (tableau 1). Il s'agit principalement des années 1986 et 1987 dans les Pyrénées, mais aussi de l'année 1991, surtout pour la parcelle D où la réserve en eau est la plus faible. Pour le site VA.D, le déficit climatique de la période début mars - mi-mai est le plus élevé en 1989, ainsi qu'en fin de période en 1991.

Pour les années 1988 et 1991 (PY), 1990 et 1991 (sites AU et VA), pour lesquelles au moins les deux conditions suivantes étaient réunies (faible déficit climatique et présence des traitements P1 et P0), nous avons étudié les relations entre

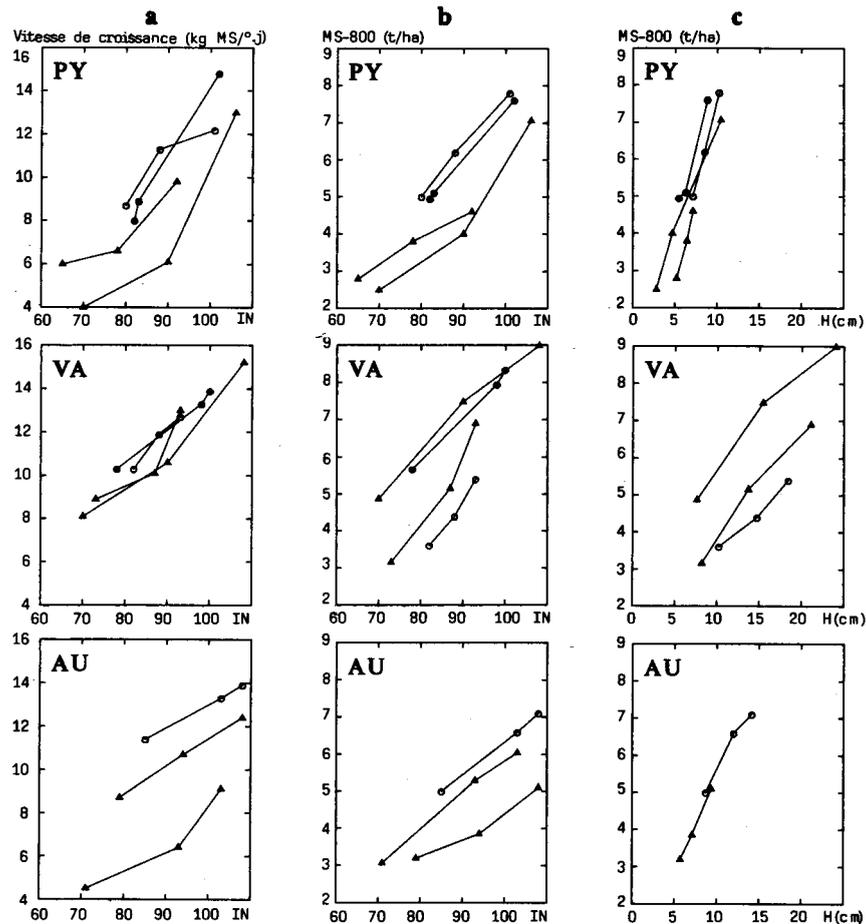


FIGURE 2 : Relations entre a) la vitesse de croissance et l'indice de nutrition azotée, b) la quantité de matière sèche à 800 °.jour et l'indice de nutrition azotée, c) la quantité de matière sèche à 800 °.jour et une mesure précoce de hauteur d'herbe pour les sites des Pyrénées (PY), de la Vallée de l'Aveyron (VA) et de l'Aubrac (AU). Chaque courbe relie les valeurs des traitements PON0, PON1 et PIN1, de gauche à droite. Les symboles blancs correspondent à l'année 1988 (PY) ou 1990 (AU, VA) ; les symboles noirs à l'année 1991 ; les ronds concernent les parcelles de type S et les triangles les parcelles de type D.

FIGURE 2 : Relationships between a) herbage accumulation rate and herbage nitrogen nutrient index, b) amount of dry matter at 800 degree-days and herbage nitrogen nutrient index, c) amount of dry matter at 800 degree-days and early sward height measurements for Pyrénées (PY), Aveyron Valley (VA) and Aubrac (AU) areas. Each curve links the values of (from left to right) PON0, PON1 and PIN1. Open symbols are for year 1988 (PY) or 1990 (AU, VA) ; closed symbols are for year 1991 ; circles represent S type plots and triangles D type plots.

la vitesse de croissance et l'indice de nutrition azotée. Pour les trois traitements d'une même parcelle, on note une relation croissante entre les deux variables (figure 2a). La comparaison des deux parcelles d'un même site une année donnée montre des courbes ayant une ordonnée à l'origine nettement inférieure pour la parcelle de type D dans le cas des Pyrénées et de l'Aubrac. En revanche, les deux ensembles de points sont voisins dans la vallée de l'Aveyron. Pour cet ensemble des données, nous avons 69% de la variance expliquée par les variables I_n et I_p ($p < 0,001$), l'écart-type résiduel étant égal à 1,7.

Pour les parcelles de type S des trois sites, les valeurs sont similaires pour un niveau de nutrition azoté donné. Les vitesses de croissance varient alors de 8 à 10 kg par degré-jour pour un indice de 80, à plus de 13 kg pour un indice de 100. 79% de la variance est expliquée par la variable I_n ($p < 0,001$; écart-type résiduel de 1). Les valeurs indiquées sont tout à fait similaires à celles obtenues dans le centre-ouest de la France pour des prairies de dactyle et de fétuque élevée (LEMAIRE, 1985).

Les valeurs plus faibles observées pour les parcelles de type D des sites PY et AU doivent avoir pour origine une dominante d'espèces dont les potentiels de croissance sont plus faibles, puisque les niveaux de nutrition ont été pris en compte dans l'établissement des régressions. Pour le site VA, nous avons émis l'hypothèse dans l'article précédent (DURU et al., 1993b) que les températures étaient sans doute surestimées en VAS.

3. Prévision du rendement avant sénescence

A cette fin, on compare les parcelles, les traitements et les sites avant qu'il y ait ralentissement de la vitesse de croissance. Nous choisisons le seuil de 800 °.jour qui correspond approximativement au stade épiaison des graminées fréquemment rencontrées comme le dactyle. Les valeurs ont été estimées à partir des modèles linéaires entre masse d'herbe et sommes de températures.

Pour comparer les différents traitements et parcelles, on fait l'hypothèse que les effets de la nutrition minérale et de la composition botanique de la prairie sont similaires pour les deux phases de la croissance que nous avons paramétrées (durée écoulée avant le départ en végétation et vitesse de croissance ultérieure).

• Relations entre masse d'herbe et niveaux de nutrition minérale : aide à la conception de plans de campagne

Pour les Pyrénées, on note des courbes d'allure croissante, avec une nette distinction entre les deux parcelles (figure 2b). La moins bonne efficacité de l'azote pour la parcelle D peut s'interpréter par l'effet de la limitation en phosphore (DURU

et al., 1993a) et par la nature des espèces présentes (traitements P0N1 et P0N0). Pour le traitement P1N1 de la parcelle D, la réduction de l'écart à la parcelle S en 1991 provient d'une évolution favorable de la composition botanique (BALENT et DURU, non publié). Les valeurs des deux années sont similaires alors que l'étude de la précocité du départ en végétation a montré que l'hiver 1990-1991 était le plus favorable (DURU et al., 1993b), mais nous avons vu qu'une légère sécheresse a pu réduire cette avance.

Dans la vallée de l'Aveyron et en Aubrac (parcelle D), on note pour chacune des parcelles une quantité de matière sèche supérieure en 1991, pour un niveau de nutrition azoté donné. Pour le site VA, il s'agit d'un départ en végétation plus précoce en 1991 (DURU et al., 1993b), alors que pour le site AU, ce sont les différences de vitesse de croissance qui sont à l'origine des écarts entre années. Nous interprétons comme précédemment les valeurs plus faibles de la parcelle S du site VA par un effet de la nature du sol, long à réchauffer, notamment en début du printemps, de telle sorte que tout se passe comme si les températures aériennes étaient surestimées (DURU et al., 1993b).

Pour les parcelles de type S, on note une relation similaire entre les trois sites. A 800 °.jour, la masse d'herbe varie de 5 t/ha pour un indice de nutrition azotée de 80 à 7-7,5 t pour un In de 100. Les déficiences en phosphore et la composition botanique qui lui est souvent associée se traduisent par un rendement inférieur d'environ 1,5 t.

L'établissement d'une corrélation entre la masse d'herbe, fonction de l'indice azoté, et un niveau d'alimentation en eau (2 classes étant définies : niveau 1 pour l'année la plus déficitaire, 2 pour l'autre, d'après les données du tableau 1) permet d'expliquer 72 % de la variance ($p < 0,001$; écart-type résiduel de 884). Pour les parcelles de type S, à base de graminées et avec peu ou pas de déficience en P, 83 % de la variance est ainsi expliquée ($p < 0,001$; écart-type résiduel de 577).

• Préviation par une mesure précoce de hauteur d'herbe : aide aux ajustements de campagne

Nous avons montré précédemment (DURU et BOSSUET, 1992) que la quantité de matière sèche était significativement corrélée à une hauteur d'herbe mesurée à la même date. On peut faire alors l'hypothèse que des mesures précoces de hauteur sont un moyen de classer les parcelles quant à la quantité de matière sèche, non seulement à la période de mesure, mais aussi à une date ultérieure. En effet, plus élevée sera la hauteur, plus rapide sera l'interception du rayonnement. Ce caractère prédictif ne sera robuste qu'en l'absence de stress hydrique. On fait par ailleurs l'hypothèse que les niveaux de nutrition minérale sont stables au cours du temps. En outre, il faut que la mesure de hauteur soit suffisamment précoce pour

qu'elle ait un réel caractère prédictif, mais pas trop tôt non plus de façon à ce que les différences entre traitements puissent s'exprimer. Il importe en particulier qu'il y ait un délai après la fertilisation. Enfin, il faut rappeler que tout changement de la date de mesure de la hauteur se traduira par un changement de pente de la relation entre le rendement et la hauteur (même valeur d'ordonnée et changement d'abscisse).

Nous avons retenu les deux années de chaque site durant lesquelles les contraintes hydriques étaient nulles ou faibles. Sur la figure 2c, on note des relations linéaires croissantes entre les deux variables pour les trois traitements d'une même parcelle et année. Ces données confirment que, pour toutes les situations étudiées, les différences de hauteur d'herbe observées tôt en saison se traduisent ultérieurement par des différences de quantité de matière sèche.

Pour les Pyrénées où les mesures de hauteur ont été effectuées à la même date les deux années, on note une relation dont l'ordonnée à l'origine est légèrement supérieure en 1991. Pour 4 des 6 valeurs concernées, nous interprétons ces écarts par des indices de nutrition azotée plus élevés en 1991. Pour la parcelle D de la vallée de l'Aveyron, les valeurs sont nettement supérieures en 1991. De même que précédemment, on constate que ces différences s'interprètent dans 5 cas sur 6 par des différences de nutrition azotée.

Conclusion

En l'absence de déficience en eau, le ralentissement de l'accumulation de la matière sèche aérienne apparaît entre 900 et 1 100 °.jour après le 1^{er} février. Ce ralentissement peut provenir d'une croissance plus lente ou bien de la transformation du matériel sénescant en litière. Durant la période précédant ce ralentissement, les vitesses de croissance sont comprises entre 13 et 15 kg MS/°.jour en absence de limitation minérale. Les déficiences en azote se traduisent par des pentes de 50 % inférieures. En conditions de nutrition P limitante et de composition botanique défavorable, elles ne dépassent pas le tiers des valeurs de référence.

La quantité de matière sèche aérienne avant la phase de ralentissement de la vitesse d'accumulation peut être modélisée de deux manières, le choix du modèle dépendant de l'objectif poursuivi :

— Le premier modèle concerne la prévision du rendement en fonction des niveaux de nutrition présumés. La quantité de matière sèche dépend de la précocité du départ en végétation et de la vitesse de croissance ultérieure, deux phases de l'accumulation de matière sèche pour lesquelles nous avons montré l'influence prédominante de la nutrition minérale, azotée en particulier. Par ailleurs, nous avons déduit de nos observations que, dans les conditions d'étude, la nutrition minérale

a plus d'effet sur la précocité du départ en végétation que les modes d'exploitation et le climat d'automne. Ces différents résultats nous permettent de modéliser l'accumulation de matière sèche en fonction du niveau présumé de nutrition minérale. On peut expliquer une grande partie des variations de rendement, au stade épiaison par exemple, par la nutrition minérale, azotée en particulier.

— Le second modèle est basé sur le fait que, sauf accident climatique (sécheresse en particulier), plus tôt est le départ apparent en végétation (interception plus importante du rayonnement incident), plus élevé est le rendement ultérieur. De ce fait, la discrimination précoce des situations culturales par un indicateur comme la hauteur d'herbe permet de prévoir le classement de ces situations du point de vue de la quantité de matière sèche à des dates ultérieures. Les différences de niveaux de nutrition minérale entre situations culturales s'expriment très souvent dès le départ en végétation.

Accepté pour publication, le 30 juin 1993.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BIRCHAM J.S. (1981) : *Herbage growth and utilization under continuous stocking management*, Ph. D. thesis, University of Edinburgh.
- CALVIÈRE I., DURU M. (1992) : "Comparaison des caractéristiques morphogénétiques de quelques graminées et dicotylédones", *L'extensification fourragère, Fourrages*, n° hors série, 92-93.
- DURU M. (1983) : "Caractérisation de la pousse hivernale des prairies permanentes dans les Pyrénées centrales", *Agronomie*, 3 (5), 461-472.
- DURU M. (1989) : "Dynamique de tallage et type de talles au printemps. Cas du dactyle de prairies permanentes", *Fourrages*, 117, 17-28.
- DURU M. (1992) : "Diagnostic de la nutrition minérale de prairies permanentes au printemps. I- Etablissement de références", *Agronomie*, 12, 219-233.
- DURU M., LANGLET A. (1986) : "Climat, rythme de coupe et croissance d'une fétuque élevée. Cycle reproducteur et repousses végétatives", *Fourrages*, 107, 49-80.
- DURU M., LANGLET A. (1990) : "Modélisation of permanent grasslands growth in spring. Indicators for diagnosis and forecasting of dry matter yield", *1st Congr. European Soc. of Agron.*, Paris 5-7 déc, 2 pp.
- DURU M., BOSSUET L. (1992) : "Estimation de la masse d'herbe par le "sward-stick". Premiers résultats", *Fourrages*, 131, 283-300.
- DURU M., LANGLET A., CALVIÈRE I., BALENT G. (1992a) : "Pédoclimat, fertilisation et croissance des prairies permanentes au printemps. II- Précocité du départ en végétation", *Fourrages*, 133, 43-58.

- DURU M., COLLOMB B., CRANSAC Y., FARDEAU J.C., JULIEN J.L., ROZIERE M. (1992) : "Pédoclimat, fertilisation et croissance des prairies permanentes au printemps. I- Evolution pluriannuelle de la nutrition minérale", *Fourrages*, 133, 23-42.
- GOSSE G., CHATIER M., BONHOMME R., ALLIRAND M., LEMAIRE G. (1986) : "Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal", *Agronomie*, 6, 47-56.
- LEMAIRE G. (1985) : *Cinétique de la croissance d'un peuplement de fétuque élevée (Festuca arundinacea Schreb) pendant l'hiver et le printemps. Effet des facteurs climatiques*, thèse de Doctorat d'Etat, Université de Caen, 96 pp.
- LEMAIRE G., DENOIX A. (1987) : "Croissance estivale en matière sèche de peuplement de fétuque élevée et de dactyle dans l'Ouest de la France. II- Interaction entre les niveaux d'alimentation hydrique et de nutrition azotée", *Agronomie*, 7 (6), 381-389.
- LEMAIRE G., SALETTE J., LAISSUS R. (1982) : "Analyse de la croissance d'une prairie naturelle normande au printemps. I- La production et sa variabilité", *Fourrages*, 91, 3-16.
- NORRIS I.B. (1982) : "Soil moisture and growth of contrasting varieties of Lolium, Dactylis and Festuca species", *Grass and For. Sci.*, 37, 273-283.
- PARSONS A.J. (1988) : "The effects of season and management on the growth of grass swards", *The grass crop*, Ed. M.B. Jones and A. Lazenby, 129-178.
- TURC L. (1961) : "Evaluation des besoins en eau d'irrigation. Evaporation potentielle", *Ann. Agron.*, 12, 13-49.
- VINE D.A. (1983) : "Sward structure changes within a perennial ryegrass sward leaf appearance and death", *Grass and For. Sci.*, 38 (4), 231-242.
- WARNDORFF M., DOWRAT A., KIPNIS T. (1987) : "The effect of tiller length and age on herbage quality of hybrid pennisetum canopies", *Netherland of Agric. Sci.*, 35, 21-28.

RÉSUMÉ

A partir de la comparaison de prairies situées dans différentes conditions pédoclimatiques et soumises à différents régimes de fertilisation, nous étudions le moment où la vitesse d'accumulation de biomasse aérienne ralentit au cours de la pousse de printemps. Ce changement apparaît entre 900 et 1 100 °.jour après le 1^{er} février.

Durant la période précédant ce ralentissement, les vitesses de croissance en absence de limitation minérale sont comprises entre 13 et 15 kg MS/° .jour. Les déficiences en azote se traduisent par des valeurs de 50% inférieures. En condition de nutrition P limitante et de composition botanique défavorable, elles ne dépassent pas le tiers des valeurs de référence.

La modélisation de la quantité de matière sèche aérienne au voisinage de l'épiaison des graminées (avant la phase de ralentissement de la vitesse d'accumulation) est réalisée de deux manières. Le premier modèle concerne la prévision du rendement en fonction des niveaux de nutrition présumés. 83% de la variance est expliquée en prenant en compte la nutrition azotée, le type de prairie et l'alimentation hydrique. Le second modèle est basé sur le fait que, sauf accident climatique (sécheresse en particulier), plus tôt est le départ en végétation (interception plus importante du rayonnement incident), plus élevé est le rendement ultérieur. De ce fait, la discrimination précoce des situations culturales par un indicateur comme la hauteur d'herbe permet de prévoir le classement de ces situations du point de vue de la quantité de matière sèche à des dates ultérieures.

SUMMARY

Soil, climate, fertilisation and growth of permanent pastures in Spring. III- Rates of dry matter accumulation and forecast of yields near ear emergence.

From data gathered from permanent pastures under various conditions of soil and climate, and subjected to different policies, the time was studied at which accumulation of above-ground dry matter begins to decrease in Spring. This occurs between 900 and 1 100 °C.day, starting from 1st February.

Before that time, and when mineral nutrition is not limiting, growth rates are between 13 and 15 kg DM/°C.day ; they are lower by half in case of nitrogen shortage, and lower by about 70% when P nutrition is inadequate and the botanical composition unfavourable.

Modelisation of the amount of dry matter accumulated near the stage of ear emergence of the grasses has been attempted by two methods. The first consists in predicting the dry matter yield from the presumed nutritional level ; 83 per cent of the variance is explained by the nitrogen supply, the pasture type and the water supply. The second method is based on the fact that, unless there are weather hazards such as drought, the earlier the start of growth (because of the interception of a larger proportion of incident radiation), the higher the final dry matter yield will be. Early observations of pasture features such as sward height make it possible to predict the ranking of productivities of these pastures later on.