

MÉTÉOROLOGIE ET CROISSANCE PRINTANIÈRE DE LA PRAIRIE PERMANENTE EN LORRAINE

A. INTRODUCTION

1. Définition et utilisation des potentiels de croissance

POUR DÉTERMINER LES POSSIBILITÉS D'AMÉLIORATION D'UN SYSTÈME FOURRAGER, IL FAUT CONNAÎTRE LES QUANTITÉS DE FOURRAGES RÉCOLTABLES, C'EST-À-DIRE :

— Les possibilités de récolte : portance du terrain, séchage des foins...

— La croissance végétale, pour laquelle on peut établir plusieurs niveaux de références, suivant le nombre de facteurs limitants pris en considération : potentialités pédo-climatiques, techniques, agricoles... (AURICOSTE et al, 1983). Nous nous intéressons ici au potentiel pédo-climatique, défini par les conditions climatiques, le régime hydrique saisonnier et les caractéristiques permanentes du sol. *La fertilisation et l'exploitation y étant par définition non limitantes, ce potentiel ne représente pas le plus souvent un objectif à atteindre mais un maximum* que l'on ne peut dépasser que par changement radical du couvert végétal.

par P. Morlon,
F. Porquet,
B. Sermage et
E. de Vaubernier

Cela veut dire que :

— si la production obtenue sur une parcelle est proche du potentiel, un accroissement de fertilisation par exemple n'augmentera pas la croissance d'herbe ;

— si la production obtenue est sensiblement inférieure au modèle, son augmentation est techniquement possible en théorie ; mais la possibilité réelle et l'utilité en seront déterminées par l'accessibilité de la parcelle et les caractéristiques du système de production : besoins fourragers, équipement, calendrier de travail, trésorerie...

Dans le cas du pâturage, il est clair qu'après la mise à l'herbe des animaux la croissance de l'herbe est perturbée, et l'on ne peut donc déduire directement de « nouveaux » systèmes de pâturage à partir des potentiels de croissance non perturbée : les chargements et rythmes de passage calculés ne seraient pratiquement jamais réalisables. Il est par contre possible de comparer, en les situant tous par rapport au potentiel, différentes exploitations de la prairie : c'est ce que nous tenterons dans la dernière partie de cet article.

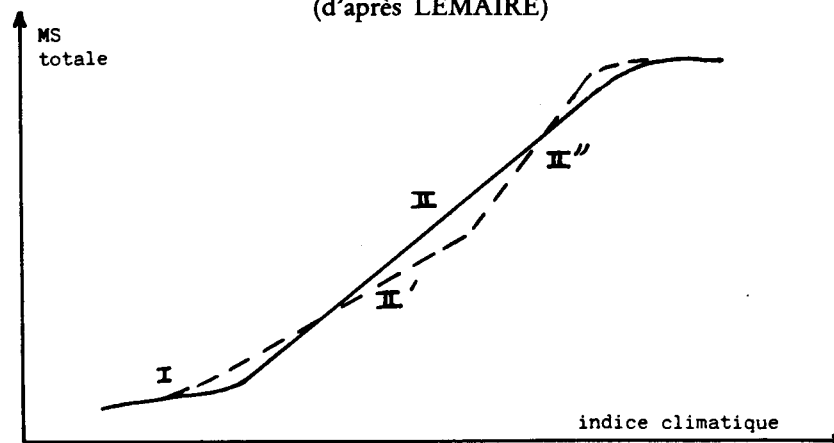
2. Forme du modèle de croissance

Dans la majorité des régions d'élevage du Nord-Est de la France (Franche-Comté, Lorraine, Ardennes, extrémité bourguignonne du Massif Central, Haute-Marne), la principale ressource fourragère est la prairie permanente, pour laquelle nous ne disposons pas de modèles de croissance élaborés dans la région. Nous nous sommes donc proposé de vérifier et d'adopter quelques-uns de ceux mis au point dans d'autres régions : l'Ouest de la France et le Massif Central.

Ce premier article, qui traite les données issues d'une seule localité (le Domaine I.N.R.A. de Mirecourt), est consacré à la pousse printanière dont l'utilisation est décisive pour l'alimentation du troupeau sur l'ensemble de l'année.

Pour les indices climatiques couramment utilisés (date, somme de températures, E.T.R. ⁽¹⁾ cumulées...) la forme de la croissance non perturbée peut se représenter suivant la figure 1, avec :

FIGURE 1
SCHÉMA DE LA COURBE DE CROISSANCE
 (d'après LEMAIRE)



Note : En peuplement monospécifique la phase II est composée de deux segments : croissance végétative II', et croissance reproductrice II'' ; LEMAIRE a montré qu'en prairie permanente la multiplicité des espèces ayant des dates d'épiaison différentes empêche de les distinguer.

- Phase I exponentielle (fin de l'hiver) : la croissance, augmentant l'indice foliaire, accroît l'interception du rayonnement qui est lui-même facteur de croissance.
- Phase II linéaire, lorsque l'interception du rayonnement ne peut plus être améliorée : couvert « fermé ».
- Phase III de maturation et de dessiccation après l'épiaison.

Nous ne nous intéressons ici pour l'instant qu'à la phase II, la plus importante quantitativement. C'est la pente de la droite qui représente la vitesse de croissance ; elle dépend de la saison.

*d'une prairie
 permanente lorraine*

Pour la pousse de printemps, nous disposons de deux modèles simples que nous chercherons à tester et à adapter :

— En fonction des sommes de températures (ΣT), depuis la dernière coupe d'automne (LEMAIRE, SALETTE et LAISSUS, 1982) :

$$\text{M.S.}_{\text{cumulée}} = b (\Sigma T - a), \text{ où :}$$

- b, vitesse de croissance, est très peu variable suivant les techniques ou d'un lieu à l'autre ; en Normandie, elle est de 10 kg M.S./ha/degré-jour ;
- a, qui fournit la date de départ apparent en végétation, dépend de l'exploitation de la prairie l'année précédente et des conditions hivernales (« mémoire » de la prairie).

— En fonction de l'évapotranspiration réelle (E.T.R.) (de MONTARD, 1981, 1983) :

$$\text{M.S.}_{\text{journalière}} = c (\text{E.T.R.} - d), \text{ où :}$$

- c, vitesse maximale de croissance, est très peu variable d'un lieu à l'autre : 50 kg M.S./ha/mm E.T.R. en Auvergne ;
- le facteur de correction d, dépendant de la flore et du sol (pH), peut varier de 0 (très bonne prairie) à environ 1,5.

En cumulant à partir d'une date déterminée, on obtient :

$$\text{M.S.}_{\text{cumulée}} = c (\text{E.T.R.} - dN - e), \text{ où :}$$

- N est le nombre de jours de croissance ;
- e indique le départ apparent en végétation.

En fait, les deux modèles sont équivalents tant qu'il n'y a pas de déficit hydrique car l'évaporation est liée à la température. La seule différence formelle réside dans l'influence des limitations liées à la flore et au sol car, dans le premier cas, elles réduisent la vitesse de croissance (qui a ainsi un caractère moins général) ; dans le second, elles sont isolées dans le facteur d.

Modélisation de la croissance printanière

B. LES DONNÉES UTILISÉES ET LEUR TRAITEMENT

Nous nous sommes trouvés devant *l'alternative très fréquente* :

— ou bien attendre (plusieurs années) d'avoir les résultats d'un dispositif expérimental permettant l'analyse d'une cinétique de croissance, c'est-à-dire avec à la fois des mesures de matière sèche suffisamment rapprochées pour construire une courbe, et un traitement où les doses d'azote sont suffisamment élevées pour être, à *coup sûr*, non limitantes ;

— *ou bien utiliser les données existantes, tirées d'autres expérimentations qui, n'ayant pas pour objectif de répondre à la question ainsi posée, ne satisfont pas à ces conditions, même si elles s'en rapprochent.*

Cette alternative se présentant très fréquemment dans la pratique, aussi bien aux chercheurs qu'aux agents de développement, il nous a paru intéressant de l'exploiter au maximum pour montrer aussi bien les résultats obtenus moyennant certaines hypothèses et précautions, que les questions posées qui restent sans réponse.

1. Données météorologiques

Les données utilisées sont celles de la station du Domaine de Mirecourt, relevées depuis 1972 selon le protocole I.N.R.A. et stockées sur bande magnétique par le S.T.E.F.C.E. à Avignon.

La station météo est située à 1 km de la parcelle expérimentale, en situation topographique similaire. Les données de type synoptique sont donc représentatives des conditions de l'essai. Par contre, les données locales (température à 10 cm dans le sol, qui pourrait être plus explicative de la croissance) ne le sont pas forcément. De toutes façons, l'objectif d'obtenir un modèle utilisable régionalement implique l'utilisation des seules données synoptiques.

2. Production d'herbe

Les données choisies, car se prêtant le mieux à notre objectif, proviennent de l'expérimentation « Productivité de la prairie permanente en fonction du rythme d'exploitation et de la fertilisation azotée » menée à partir de 1974 sur la parcelle « Domvallier O » du Domaine I.N.R.A. de

TABLEAU I
RENDEMENTS EN PREMIÈRE COUPE
SUIVANT LES DOSES ANNUELLES D'AZOTE

Années	DEPRIMAGE 15 AVRIL		PATURE PRECOCE 20 AVRIL			PATURE TARDIVE 1er MAI			FAUCHE PRECOCE 1er Juin		FAUCHE MOYENNE 10 Juin	
	E1	E2	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	D1	D2
	80N	160N	80N	160N	240N	80N	160N	240N	80N	160N	80N	160N
1974	1,29	1,80	1,68	1,72	1,60	2,15	1,86	2,12	4,69	4,89	4,01	4,93
1975	0,31	0,42	0,63	1,03	1,48	1,80	2,08	2,91	4,93	7,01	5,52	6,51
1976	0,40	0,88	0,50	0,61	0,78	0,92	0,92	1,39	1,57	2,87	1,48	3,01
1977	0,92	1,41	0,68	1,46	1,60	1,94	1,76	2,22	5,55	6,80	6,71	7,59
1978	0,69	1,03	0,30	0,46	0,41	1,70	1,69	2,47	4,70	6,09	5,64	6,58
1979	0,32	0,55	0,32	0,35	0,78	0,73	0,95	1,73	2,67	3,77	3,93	4,59
1980	0,23	0,42	0,77	0,94	1,71	0,91	1,09	1,88	4,28	5,48	5,17	7,25
1981	0,80	1,00	1,08	1,22	1,63	1,37	1,74	2,44	2,69	3,25	3,50	3,55

La fumure azotée de début de printemps étant identique pour ces trois traitements, les différences de rendements dès la 2^e année mettent en évidence un effet de la fumure de l'année précédente.

Note : En 1975, le rendement décroît de C2 à D2. Étant donnés les rendements élevés en C (et dès B) cette année-là, on a supposé qu'il y a eu verse et donc supprimé la donnée D2 dans certains calculs ; le point correspondant figure entre parenthèses sur les graphiques.

Mirecourt⁽¹⁾. Cette expérimentation visait à estimer les quantités de matière sèche récoltables (tableau I) en simulant différents types d'exploitation courants dans la région (le pâturage étant simulé par *des fauches au rythme du pâturage*) :

- A = pâturage avec mise à l'herbe au 20 avril,
- B = pâturage avec mise à l'herbe au 1^{er} mai,
- C = fauche type foin précoce au 1^{er} juin,
- D = fauche moyenne au 10 juin,
- E = déprimage au 15 avril puis fauche tardive au 20 juin.

(1) Voir l'annexe. La description détaillée en est donnée par ailleurs dans un document plus complet, à paraître dans la série « Études et Recherches » de l'Unité de Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement de Versailles-Dijon-Mirecourt.

La fumure de fond (100 P - 100 K par an), constante et identique pour tous les traitements, paraît suffisante compte tenu de la richesse du sol en potasse.

Trois doses d'azote ont été utilisées :

N1 : 80 unités par an, dont 40 début mars (tous rythmes),

N2 : 160 unités par an, dont 40 début mars (A et B),
80 début mars (C, D et E),

N3 : 240 unités par an, dont 40 début mars (A et B seulement).

Nous nous trouvions ainsi devant la double difficulté :

— des fertilisations azotées qui n'étaient pas à coup sûr non limitantes,

— pour l'étude de la croissance non perturbée (excluant les repousses), nous disposions ainsi chaque année de *seulement cinq points irrégulièrement espacés*, situés à 2 ou 3 jours près aux dates suivantes :

15 avril,	20 avril,	1 ^{er} mai,	1 ^{er} juin,	10 juin,
E	A	B	C	D

et ces points, représentant des traitements différents, ne pouvaient a priori être reliés pour construire une courbe de croissance !

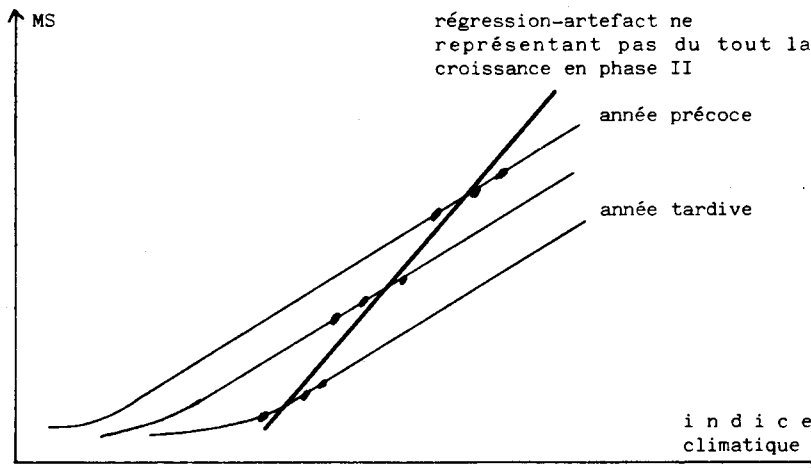
Trois possibilités s'offraient donc :

a - Comparer individuellement les points obtenus par rapport aux modèles établis par LEMAIRE et de MONTARD. Cependant, s'il y a un écart par rapport au modèle, on ne peut expliquer s'il est dû à une vitesse de croissance plus faible ou bien à une croissance plus tardive.

b - Calculer, comme cela est fait dans de nombreuses études, des régressions directement sur l'ensemble des points. Mais des calculs de régressions effectués sans précaution sur *des nuages de points isolés* peuvent donner des pentes soit inférieures à la pente réelle de la phase II (si l'on inclut sans le savoir des points des phases I et III), soit supérieures lorsque l'on mélange des années de précocités différentes (figure 2).

c - Réaliser les calculs *comme si les traitements n'induisaient pas des croissances différentes*, c'est-à-dire, entre autres, comme si la fertilisation

FIGURE 2
RÉGRESSION ABERRANTE INCLUANT DES ANNÉES
DE PRÉCOCITÉS DIFFÉRENTES



azotée n'était pas limitante, et comparer les résultats obtenus aux implications logiques de la définition du potentiel pédo-climatique et de la forme du modèle. C'est ce que nous ferons ici.

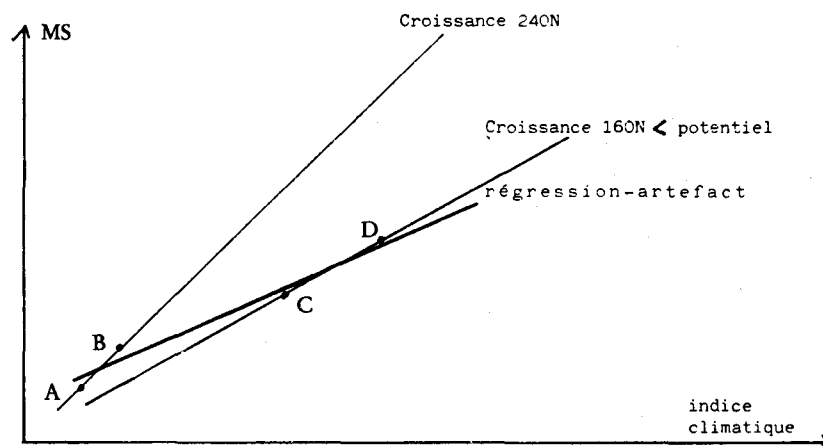
3. Critères de jugement

Si l'azote n'est pas limitant, les courbes de croissance obtenues pour différents traitements ou années doivent être pour la phase II des *droites parallèles dont la pente est supérieure à celle de toute autre courbe obtenue en conditions limitantes*. Ce sera pour nous le principal critère de jugement. En outre, la *concordance numérique* de la pente de la droite avec les modèles établis ailleurs en France est un critère confirmant le premier (cf. de MONTARD, 1981, p. 50).

Par contre, si l'azote est limitant pour les traitements N 160 (seules données disponibles en juin pour les rythmes C et D), la pente de leur

*Modélisation de la
croissance printanière*

FIGURE 3
RISQUES D'ERREURS SI L'AZOTE À N160 EST LIMITANT



courbe de croissance est inférieure à celle des traitements à N 240, et l'on obtiendra donc en reliant A, B, C et D (figure 3) :

- si l'on prend pour A et B les productions à N 160, la courbe de croissance à N 160 qui est inférieure au potentiel ;
- si l'on prend pour A et B les productions à N 240, une régression aberrante de pente encore plus inférieure à celle du potentiel.

Dans les deux cas, il n'y a aucune raison pour que les courbes obtenues soient des droites parallèles dont la pente concorde avec les modèles établis ailleurs.

Cependant, nous ne pourrions ainsi vérifier que la *vitesse de croissance* de la prairie : nos données ne permettent pas de modéliser le départ apparent en végétation et donc de calculer la date à laquelle est atteinte une production suffisante, par exemple pour la mise à l'herbe. *D'autres expérimentations seront de toutes façons nécessaires pour étudier la variabilité du départ en végétation suivant l'utilisation de la prairie à l'automne et l'effet de l'hiver.*

C. RÉSULTATS : CROISSANCE EN FONCTION D'INDICES CLIMATIQUES

1. Première étape

Nous avons représenté sur les figures 4, 5 et 6 les courbes de croissance et les régressions établies en fonction des sommes de températures (seuil 0 °C depuis le 1^{er} janvier) et d'E.T.R. (seuil 1,2 mm/jour, depuis le 1^{er} janvier), ainsi que la date (nombre de jours depuis le 15 avril), les résultats numériques figurant au tableau II.

Malgré des coefficients de corrélation hautement significatifs et qui expliquent plus des deux tiers de la variance⁽¹⁾, ces résultats ne sont pas satisfaisants car les indices météo n'apportent pratiquement rien par rapport à la date seule, et surtout :

- les courbes annuelles ne peuvent pas toutes être assimilées à des droites parallèles,
- les dispersions non uniformes des résidus supposent l'existence d'au moins un facteur non pris en compte,
- les écarts des valeurs réelles à la prévision atteignent 2 000 kg/ha de M.S. par excès comme par défaut, ce qui n'est pas acceptable pour la pratique.

On constate que peuvent être séparées, de la même façon pour les trois indices, quatre années « favorables », tant sur le plan de la production que de la modélisation (*droites parallèles* et de pentes similaires aux équations proposées par ailleurs), et quatre années « défavorables » assez dispersées. Nous supposons, en accord avec nos hypothèses de départ, *que les quatre années favorables qui forment l'enveloppe supérieure des données, correspondent au potentiel recherché et que pour les quatre années défavorables est intervenu au moins un facteur limitant non ou mal pris en compte dans les indices climatiques calculés*, ce qui conduit aux étapes suivantes :

(1) Le fait que l'on travaille en cumulant à la fois les matières sèches et les indices climatiques produit *automatiquement* des corrélations élevées.

FIGURE 4
 COURBES DE CROISSANCE EN FONCTION DE LA DATE
 DE COUPE ET DISPERSION DES RÉSIDUS

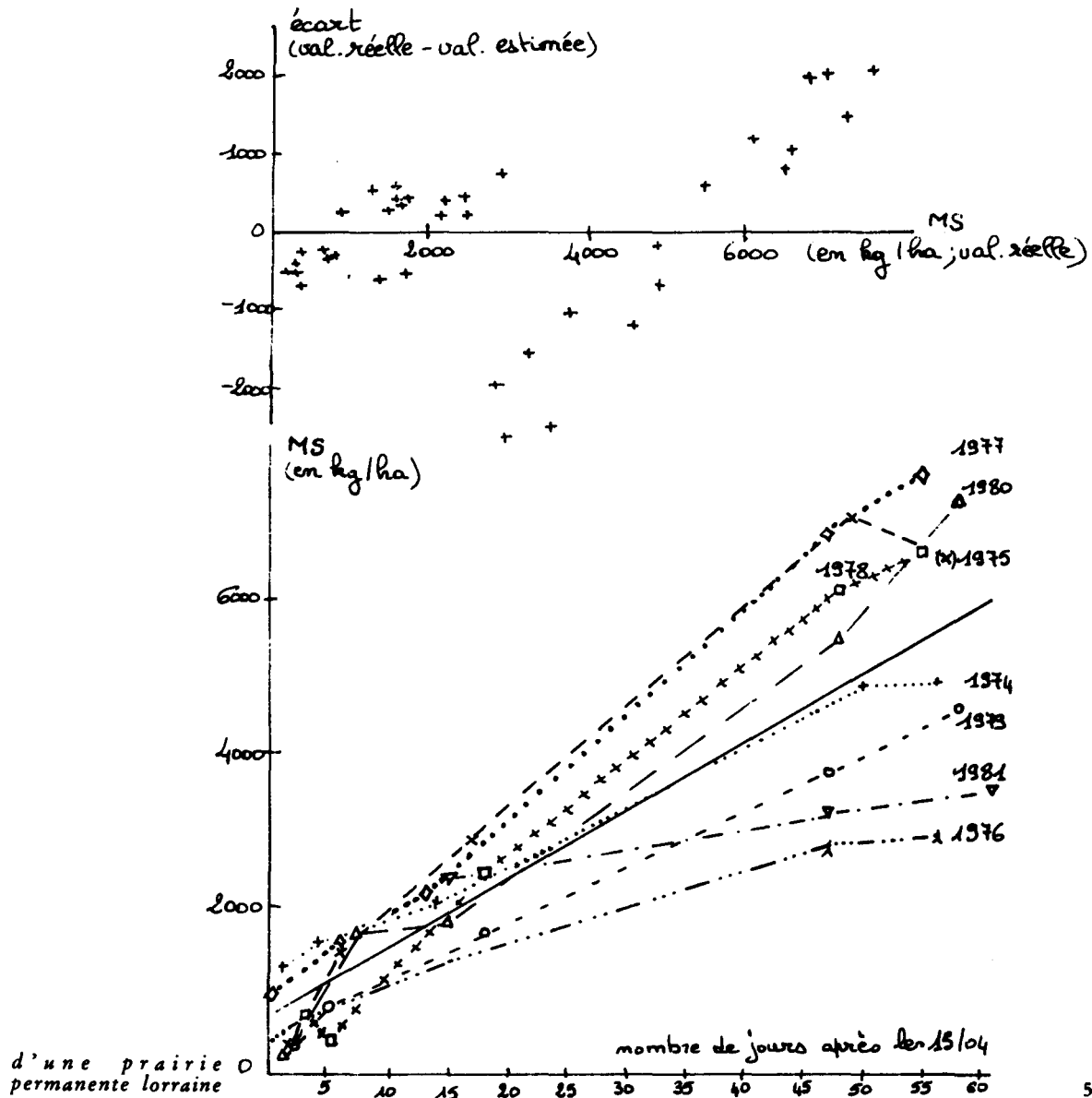


FIGURE 5
COURBES DE CROISSANCE EN FONCTION DES SOMMES
D'E.T.R. (SEUIL 1,2 mm/j, DEPUIS LE 01/01)
ET DISPERSION DES RÉSIDUS

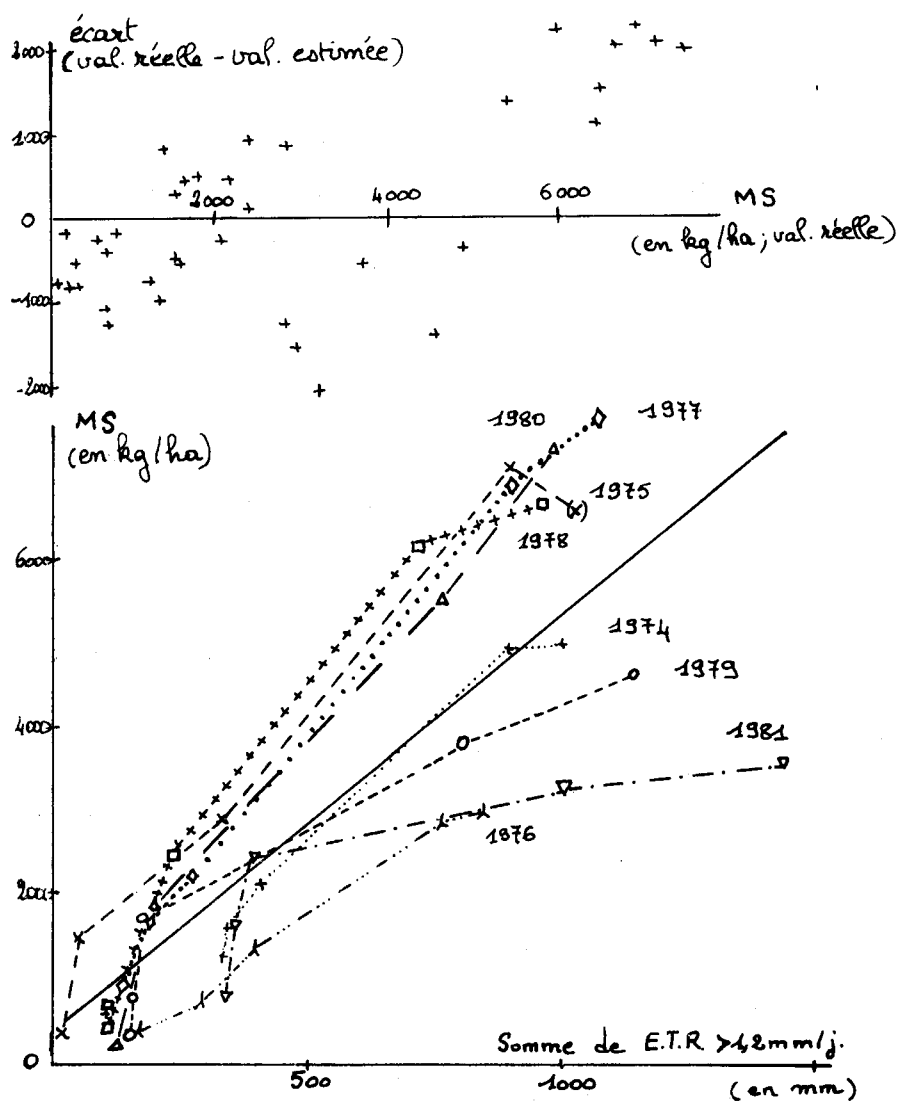
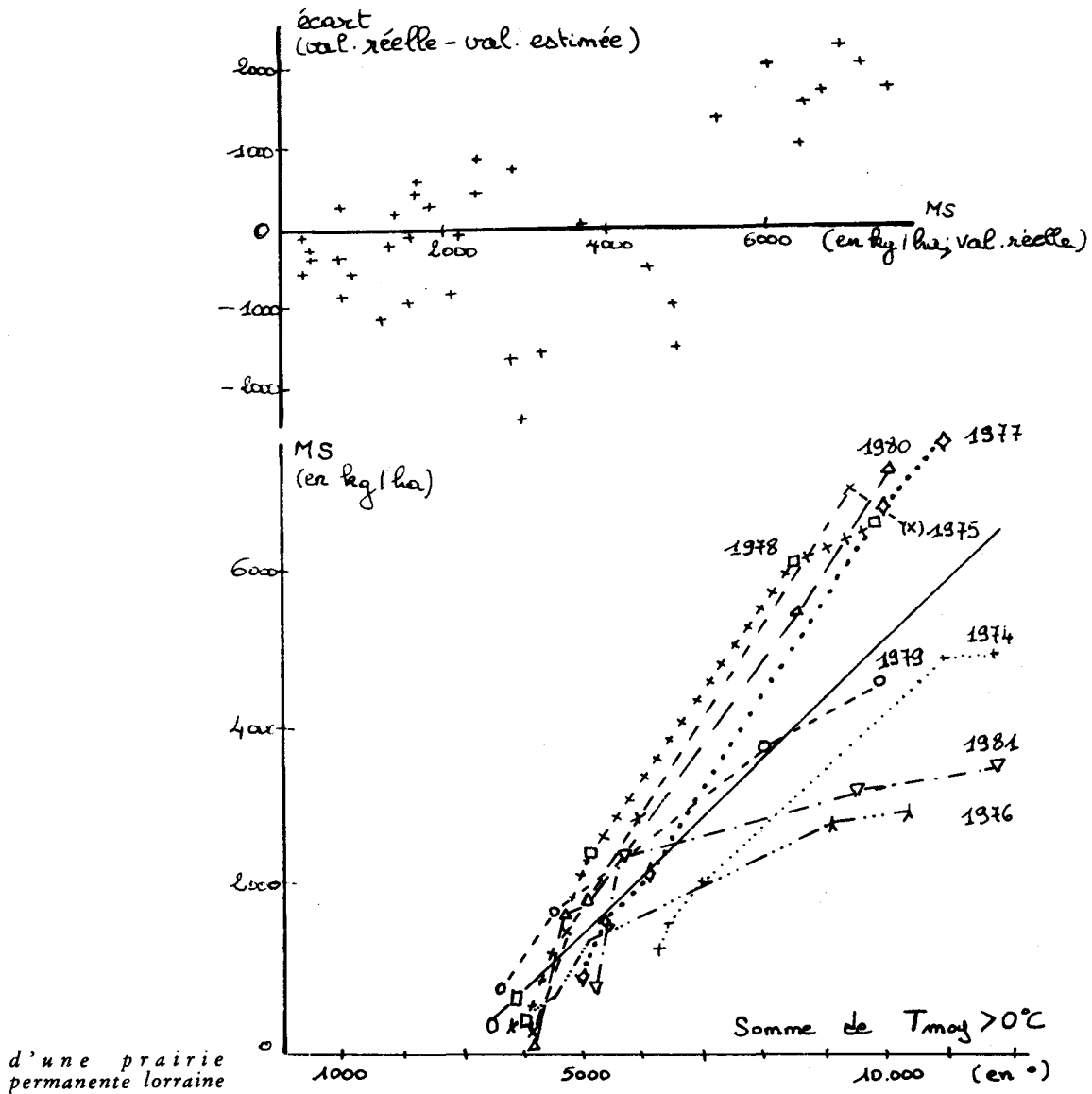


FIGURE 6
 COURBES DE CROISSANCE EN FONCTION DES SOMMES
 DE TEMPÉRATURES (SEUIL 0 °C, DEPUIS LE 01/01)
 ET DISPERSION DES RÉSIDUS



- diversification et amélioration des calculs d'indices climatiques afin de « recoller » années défavorables et favorables (§ 2 ci-dessous) ;
- lorsque ce n'est pas possible, recherche de facteurs limitants non inclus dans les indices climatiques (partie D) ;
- détermination des modèles les plus « performants » sur les années favorables.

2. Recherche de meilleurs indices climatiques

Nous avons d'une part essayé d'autres indices : heures d'ensoleillement, indice de Geslin $T \sqrt{Rg}$ (figure 7) et d'autre part testé de très nombreuses variations possibles des modes de calcul de chaque indice :

TABLEAU II
PRÉSENTATION DE QUELQUES RÉSULTATS
(Légende et explications)

Données prises en compte

- Sauf indication MAX qui indique les rendements maximaux ou à dose d'azote maximale (très voisins entre eux), il s'agit des doses 160 kg N/an ;
- sauf indication contraire, toutes les bases ou seuils de calcul sont 0 ;
- E signifie qu'en plus des résultats des traitements A, B, C et D (4 points/an) ont été pris en compte les rendements du déprimage du traitement E (soit 5 points/an) ;
- [90, 50] : la R.U. (Réserve Utile) et la R.F.U. (Réserve Facilement Utilisable) prises en compte sont respectivement 90 et 50 mm.

Remarque

Afin de ne pas trop alourdir le tableau, nous avons sélectionné ici un petit nombre de régressions sur l'ensemble de celles qui ont été calculées en faisant varier dates de départ des sommations, seuils, niveaux de réserve utile... Pour la même raison, nous ne présentons pas ici les intervalles de confiance.

Unités

Y en kg /ha de matière sèche

ΣT , degrés-jour en °C

$\Sigma T \sqrt{Rg}$ indice de Geslin en °C (MJ/m²)^{1/2}

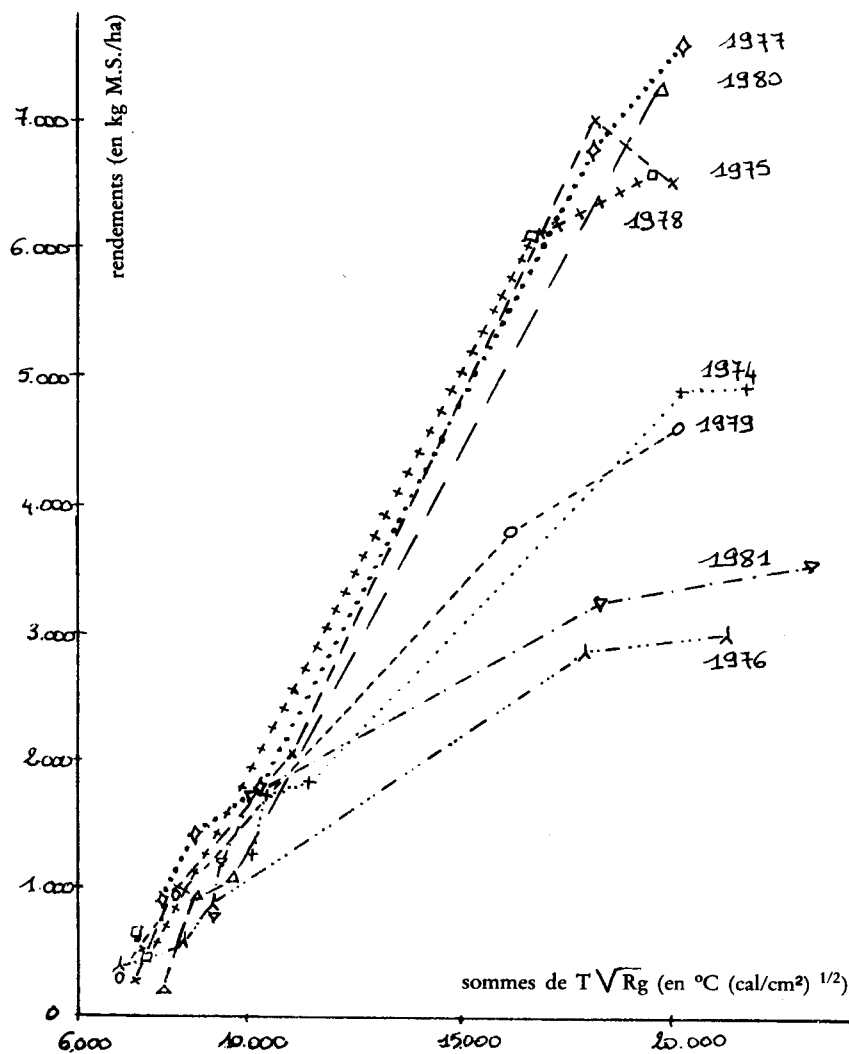
E.T.R.c en mm.

TABLEAU II
PRÉSENTATION DE QUELQUES RÉSULTATS

Nombre d'années	Indice	Date de départ du cumul	Données et mode de calcul	Régression	r
8	DATE (nb jours)	15 Avril 1er Février	E - MAX	Y = 87 x + 676 Y = 92,7 x - 6463	0,880 0,857
	Σ T	1er Janvier 1er Novembre 1er Novembre Tsol à 10cm > 0°C	E - MAX E	Y = 7,2 x - 2111 Y = 7,87 x - 4544 Y = 7,895 x - 4598 Y = 6,37 x - 1648	0,85 0,890 0,909 0,829
	Σ T √Rg	1er Novembre 1er Novembre T air > - 5°C	E	Y = 1,80 x - 9820 Y = 1,84 x - 10720 Y = 1,70 x - 7330	0,834 0,869 0,808
	ETRc Turc	1er Janvier	E seuil 1,2mm / (100,100) MAX	Y = 49 x + 376	0,82
	ETRc Penman	1er Novembre 1er Novembre Tsol 10cm > 0°C T air > - 3°C	seuil 0,6mm / (90,50) E / (90,50) / (90,50) / (90,50)	Y = 37,57 x - 2328 Y = 37,09 x - 3289 Y = 36,43 x - 2303 Y = 35,99 x - 2378	0,897 0,909 0,907 0,899
6 Sauf 1979 et 1981	DATE	1er Février		Y = 102,3 x - 7204	0,880
	Σ T	1er Novembre 1er Novembre	MAX	Y = 9,02 x - 5560 Y = 8,28 x - 4606	0,907 0,894
	Σ T √Rg	1er Novembre		Y = 2,05 x - 12380	0,857
	ETRc Penman	1er Décembre 1er Novembre dernière coupe automne 1er Décembre	seuil 0,4mm / (60,36) / (90,50) / (60,36) MAX / (60,36)	Y = 50,95 x - 4307 Y = 46,21 x - 3809 Y = 50,37 x - 5065 Y = 47,31 x - 3552	0,981 0,968 0,974 0,978
4 Années favorables	DATE	15 Avril 1er Février 1er Février	E - MAX MAX	Y = 117 x - 504 Y = 129,3 x - 9510 Y = 118,5 x - 8110	0,985 0,981 0,982
	Σ T	1er Janvier 1er Décembre 1er Novembre Vitesse de croissance : recalage sur départ apparent en végétation	E - MAX MAX MAX	Y = 10,5 x - 3643 Y = 11,43 x - 5762 Y = 10,52 x - 6314 Y = 11,35 x	0,985 0,987 0,989 0,991
	Σ T √Rg	1er Novembre 1er Novembre Vitesse de croissance : recalage sur départ apparent en végétation	MAX	Y = 2,81 x - 19440 Y = 2,57 x - 14850 Y = 2,79 x	0,992 0,993
	ETRc Turc	1er Janvier	E - MAX-seuil 1,2mm / (100,100)	Y = 69 x + 280	0,984
	ETRc Penman	1er Novembre 1er Novembre Vitesse de croissance	MAX / (60,36) MAX / (60,36) / (60,36)	Y = 51,53 x - 4895 Y = 46,89 x - 3843 Y = 51,50 x	0,981 0,981 0,988

d'une prairie permanente lorraine

FIGURE 7
 COURBES DE CROISSANCE EN FONCTION DES SOMMES
 DE L'INDICE DE GESLIN
 (Mirecourt 160N, sommes depuis le 1/11)



— dates de départ des sommations : les mêmes pour toutes les années, ou depuis la dernière coupe d'automne, ou choisies à partir du moment où la température de l'air ou du sol n'est plus inférieure à un seuil déterminé ;

— seuils de prise en compte et mode de sommation des indices :

- Σx les jours où $x \geq \text{seuil}$,
- $\Sigma (x - \text{seuil})$ lorsque $x - \text{seuil} > 0$ ⁽¹⁾ ;

— et surtout, les niveaux de disponibilité en eau dans le sol : en effet, le calcul initial des E.T.R. avec une réserve utile de 100 mm (évaluation du B.R.G.M. ⁽²⁾ pour une profondeur de 80 cm sur le sol considéré) et l'hypothèse implicite que l'eau est disponible sans restriction jusqu'à épuisement de la réserve utile (soit : R.F.U. = R.U. = 100 mm) conduisaient à un cumul d'E.T.R. pour 1976 jusqu'à des dates et des quantités élevées et proches des autres années, ce qui est manifestement faux car nous savons que la prairie a souffert très tôt de la sécheresse cette année-là. Nous avons également remplacé, pour des raisons pratiques, l'E.T.P. Turc avec le coefficient cultural de 1,2 propre aux prairies de fauche, par l'E.T.P. Penman avec coefficient cultural de 1, ce qui est peu différent (SEGUIN, 1975).

Les meilleures régressions obtenues (écarts-types des résidus les plus faibles), regroupées sur le tableau II, mettent en évidence que :

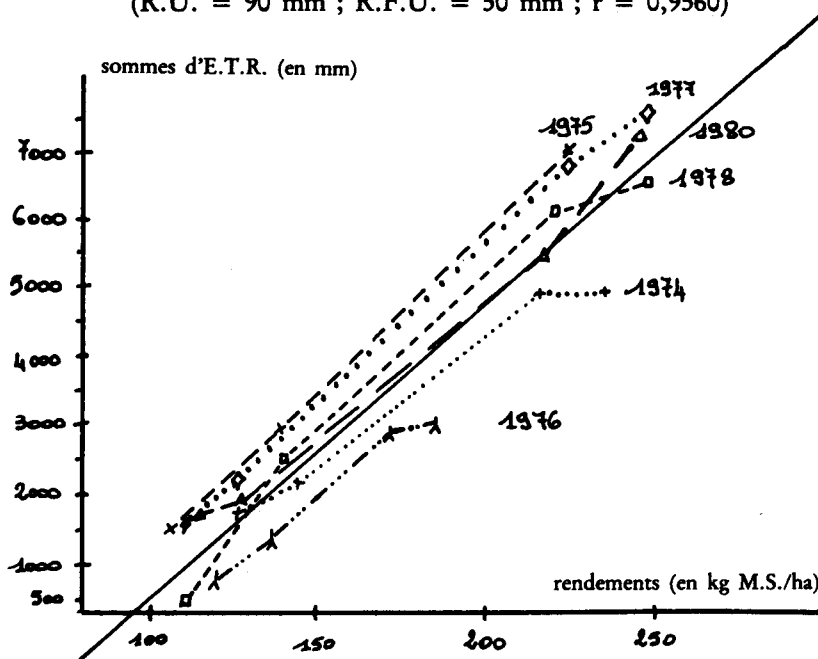
— En général, *les coefficients de corrélation* les plus élevés correspondent aux *pentés* les plus élevées, en accord avec notre première hypothèse (potentiel = enveloppe supérieure des données disponibles).

— Mais la quasi-totalité des variations de dates ou de seuils, dont certaines compliquent le calcul, n'apporte aucune amélioration significative sur le plan statistique ou pratique : *nous choisirons donc le mode de calcul le plus simple, soit le seuil 0 pour tous les indices et une date de départ de*

(1) A la différence de de MONTARD qui somme les E.T.R. pour les jours où la température est supérieure au zéro de végétation (6 °C), nous avons sommé les E.T.R. supérieures à différents seuils. L'E.T.R. et la température étant liées, cela n'est pas très différent en pratique.

(2) Bureau de Recherche Géologique et Minière.

FIGURE 8
COURBES DE CROISSANCE EN FONCTION DES SOMMES
D'E.T.R. (depuis le 1/11)
 (R.U. = 90 mm ; R.F.U. = 50 mm ; $r = 0,9560$)



sommation fixe (la meilleure étant suivant les cas le 1^{er} novembre ou le 1^{er} décembre).

— La seule amélioration sensible concerne le mode de calcul de l'E.T.R., qui fait passer la proportion de variance expliquée de 80 % à 95 % et donne aux droites de 1974 et 1976 une *pente parallèle à celles des années « favorables »* (figure 8), montrant que le facteur limitant pour ces deux années-là a bien été le déficit hydrique. En supposant que les valeurs les plus proches de la réalité sont celles qui donnent les meilleurs résultats statistiques, nous considérerons donc pour cette prairie les valeurs moyennes suivantes :

R.U. = 60 mm,
R.F.U. = 36 mm (calcul sur les 6 années).

— Les années 1979 et 1981 restent toujours en-dessous des autres et nous devons rechercher d'autres facteurs limitants : nutrition minérale, en particulier azotée ; excès d'eau ; effet de l'hiver sur la prairie.

3. Détermination des modèles les plus performants (Méthodologie)

Nous ne considérons, pour chaque indice, *que les années « favorables » pour lesquelles les courbes de croissance sont des droites parallèles de pente supérieure à celle des années « défavorables », soit 6 ans pour l'E.T.R. et 4 ans pour les autres indices.*

Deux modes de calcul sont alors possibles :

— I : Choix du coefficient de corrélation le plus élevé sur le *nuage de points non modifié* (comme tous les calculs antérieurs).

— II : Pour éliminer l'effet de départs en végétation plus ou moins précoces par rapport à l'indice considéré, *pour chaque droite annuelle on prend comme origine des coordonnées le point où est atteint le seuil de production choisi comme départ en végétation* (1000 ou 1500 kg/ha), et on effectue le calcul sur les données ainsi recalées.

Ce mode de calcul, qui en théorie approche le mieux la vitesse de *croissance potentielle*, donne dans le cas traité ici des résultats peu différents du calcul sur données non recalées ; *pour d'autres expérimentations faites dans la région, il améliore très sensiblement le coefficient de corrélation en rapprochant les droites parallèles les unes des autres.*

Les meilleurs résultats (dispersion des résidus la plus satisfaisante) obtenus suivant les deux modes de calcul sont comparés sur le tableau III avec les modèles de LEMAIRE et de de MONTARD : on constate la remarquable similitude des vitesses de croissance (mais attention, les cumuls d'E.T.R.c ne sont pas faits de la même façon).

Cependant, lorsqu'on ne considère que les quatre années « favorables », la date seule est un prédicteur presque aussi bon que les indices climatiques (tableau II) : le seul intérêt de ces derniers serait de

TABLEAU III
COMPARAISON DES MODÈLES LES PLUS PERFORMANTS
AVEC CEUX ÉTABLIS PAR LEMAIRE ET DE MONTARD

(même légende que pour le tableau II)

INDICE	NOMBRE D'ANNEES	PENTE DE LA DROITE	COEFFICIENT DE CORRELATION	DONNEES PRISES EN COMPTE - MODE DE CALCUL ET DATE DE DEPART	AUTEUR
DATE	4	117	0,985	I - E - N maximal	
SOMME DE TEMPERATURES	4	10,52	0,989	I - rendement maximal-1er Novembre	
	4	11,35	0,991	II - 160 N	
SEUIL O°	3	10,0	0,980	- N NON LIMITANT - 1ER NOVEMBRE	LEMAIRE et al (Normandie)
INDICE DE GESLIN	4	2,57	0,993	I - rendement maximal-1er Novembre	
SEUIL O	4	2,79	0,992	II - 160 N	
		3,3		FÉTUQUE ÉLEVÉE CLARINE	LEMAIRE et al (Lusignan)
ETRc Penman	6	50,95	0,981	I - 160 N/60,367 - 1er Décembre	
Coeff. cultural 1	4	51,53	0,981	I - 160 N/60,367 - 1er Novembre	
SEUIL O	4	51,30	0,988	II - 160 N/60,367	
ETRc Turc		50		N NON LIMITANT	de MONTARD (Massif Central)
Coeff. cuRural 1,2					

MS en kg/ha - T en °C, seuil O° - ETRc en mm - Indice de Geslin en °C / (MJ/m²)^{1/2}, seuil O - N jours

« recoller » d'autres années sur les quatre années favorables ; ce n'est le cas que de l'E.T.R.c pour 1974 et 1976 et nous choisirons donc ce modèle. Pour les deux années restantes, il faut vérifier si d'autres facteurs limitants ont pu intervenir, nous en examinerons deux : la nutrition azotée et l'effet de l'hiver sur la prairie.

D. RECHERCHE D'AUTRES FACTEURS LIMITANTS

1. La nutrition azotée

La définition même du potentiel climatique suppose une alimentation minérale, en particulier azotée, non limitante : c'est donc la première condition à vérifier soit sur les causes possibles d'un manque d'azote, soit

Modélisation de la croissance printanière

sur ses *symptômes*. Les lecteurs intéressés trouveront dans la version complète de cette étude la discussion sur ce point, trop longue pour figurer ici.

2. Conditions météorologiques non prises en compte dans les modèles

Conditions hivernales

L'existence de conditions hivernales « destructrices » pour la végétation est apparue tôt dans l'étude comme une hypothèse pouvant expliquer les années défavorables qui sont par exemple les seules où la température est descendue, qui plus est brusquement, en-dessous de -15°C .

Bien qu'un tel seuil n'ait pas de signification absolue sans tenir compte de l'endurcissement, et qu'en première analyse la destruction d'un certain nombre de talles ou organes végétatifs par une gelée forte n'ait d'influence que sur la durée de la phase I et non sur la pente de la phase II (figure 1), trois hypothèses peuvent être faites :

— Une destruction de talles affectant préférentiellement les graminées productives favoriserait lors de la compétition printanière les plantes moins productives (plantes à rosettes dont beaucoup sont des vestiges de la flore sibérienne des glaciations). Mais nous ne disposons pas de descriptions floristiques avec pourcentages de recouvrement chaque année, et les analyses chimiques de fourrages sont difficilement interprétables dans ce sens. Comme pour les deux hypothèses suivantes, il paraîtrait utile de pouvoir évaluer l'état de la prairie à la sortie de l'hiver.

— Une destruction des talles ayant subi l'induction primaire (GILLET, 1980, pp. 116-119), celles-ci sont ainsi remplacées par des talles ne l'ayant pas subie et qui ne monteront donc pas, réduisant ainsi la croissance reproductrice des espèces affectées.

— Un prolongement de la phase I entraînant un départ en végétation tardif par rapport au climat du moment permettrait une réorganisation de l'azote apporté en mars et qui serait ensuite insuffisamment disponible pour la croissance (décalage dans le temps entre disponibilités et besoins).

Il restait à définir les « conditions hivernales destructrices » ou plutôt à tester différentes définitions possibles (tableau IV) :

TABLEAU IV
CONDITIONS HIVERNALES

années	HIVER							
	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81
Favorables D	Défavorables F	D	F	F	D	F	D	
Nb jours où $t_{\max}(\text{abri}) \leq -5^{\circ}\text{C}$ en l'absence de neige au sol	0	0	0	4	1	6	5	1
Nb jours où $t_{\min}(\text{sol}) \leq 0^{\circ}\text{C}$	3	0	27	6	12	32	10	33
Sommes de températures au 1 ^{er} Mars	324	359	188	247	219	197	264	109

- le nombre de jours où, *en l'absence de neige au sol*, la température maximale sous abri a été inférieure ou égale à -5°C ;
- le nombre de jours où la température minimale à 10 cm dans le sol a été inférieure ou égale à 0°C ;
- le cumul des sommes de températures du 6 décembre (date de départ des sommations qui est statistiquement la plus explicative du départ apparent en végétation) au 1^{er} mars.

Les deux derniers critères font apparaître comme nettement plus rigoureux les hivers 1975-1976, 1978-1979 et 1980-1981 qui précèdent trois années « défavorables ». On se rappellera par ailleurs que l'hiver 1978-1979 est celui au cours duquel la température a brusquement chuté la nuit de la Saint-Sylvestre : après trois semaines très douces, la température minimale sous abri passe de $+8^{\circ}\text{C}$ le 31 décembre à -11°C le 1^{er} janvier.

Comme il arrive très souvent, l'année d'implantation de l'essai est particulière car il n'y a pas d'arrière-effet des traitements de l'année précédente. Cela peut expliquer que l'efficacité de l'azote des doses annuelles les plus élevées soit nulle, alors que sur les analyses de fourrages cette année est la seule où apparaît clairement une déficience... De toute façon, malgré

les gelées hivernales comme en 1976, le modèle basé sur l'E.T.R. ne distingue pas ces deux années des années favorables (figure 8) : il y a seulement un retard relatif au départ en végétation.

Les années 1979 et 1981 sont par ailleurs les seules où les rendements pour C et D (160N) ne figurent pas sur l'enveloppe supérieure de toutes les données disponibles : en effet (figures 11 et 12), ils sont inférieurs à la fois aux cumuls de repousses des traitements A et B (240N), et aux rendements d'ensilage sur d'autres parcelles ; on se trouve donc apparemment dans le cas prévu à la figure 3, l'azote à 160N a pu être limitant ces deux années, en interaction avec un « effet hiver ».

Conditions du printemps

Après un hiver déjà très pluvieux, le printemps de 1979 connaît des précipitations nettement supérieures à la moyenne, pouvant être cause d'excès d'eau et d'asphyxie.

3. Conclusion

Les résultats qui précèdent soulignent *l'intérêt d'une description de l'état de la prairie à la sortie de l'hiver ou bien d'une définition sûre des conditions hivernales destructrices qui permettraient des prévisions à l'avance pour la gestion du système fourrager.*

E. VÉRIFICATION DU MODÈLE ET COMPARAISON AVEC DES PRODUCTIONS EN CONDITIONS RÉELLES D'EXPLOITATION

1. Démarche utilisée

A la réserve près des deux années 1979 et 1981, nous avons ainsi établi des modèles *apparemment* satisfaisants sur les données d'une *expérimentation en petites parcelles*. L'utilisation pratique de l'un quelconque de ces modèles dans la région demande leur vérification (sur d'autres parcelles, dans d'autres localités...) et leur comparaison avec des productions économiques en grandes parcelles, ce que nous ferons en plusieurs étapes :

- vérification avec d'autres données du même type (*petites parcelles ou mesures en placettes*) à Mirecourt ;
- comparaison à des rendements de *grandes parcelles* à Mirecourt ;
- vérification de leur domaine régional de validité et établissement éventuel de modèles différents pour d'autres petites régions : ce dernier point fera l'objet d'un article ultérieur.

Vérification

Le potentiel climatique étant défini par l'absence d'autres facteurs limitants, le modèle doit, s'il représente réellement ce potentiel, constituer *l'enveloppe supérieure de toutes les données disponibles*, c'est-à-dire que :

- aucune mesure ne doit être significativement *supérieure* au modèle - on peut pour cette vérification utiliser des cumuls de repousses, qui sont *a priori* inférieurs à la croissance non perturbée - ;
- les productions doivent être *égales* au modèle lorsque l'on a des raisons de supposer que seules les conditions climatiques sont limitantes - c'est souvent le cas des coupes d'ensilage -.

Comparaison avec des productions économiques ⁽¹⁾

On sait que les potentiels agronomiques et les optimums technico-économiques coïncident rarement. Par exemple, dans les conditions climatiques de la région de Mirecourt, si l'on fertilisait abondamment les coupes à foin, on pourrait rarement sécher les quantités de foin récoltées... D'autre part, la signification même des mesures n'est pas la même, car outre d'éventuelles différences dans les techniques de fauche et de ramassage, les productions en grandes parcelles intègrent des hétérogénéités (bordures, etc.), supposées éliminées en petites parcelles.

La vérification et la comparaison posaient un certain nombre de questions :

(1) Les données de productions économiques utilisées ici proviennent des cahiers de J. VERON, responsable du Domaine de Mirecourt.

— *Fauche/pâturage* : Un vieux débat... dans lequel nous n'avons pas voulu rentrer : nous avons utilisé *toutes* les données que nous avons pu réunir sur le Domaine de Mirecourt : les conclusions seront faites au vu des résultats.

— *Définition de la prairie permanente* : Nous avons constaté que, sauf pour de rares mesures (points entre parenthèses sur les figures 9 à 12), il était impossible de différencier prairies permanentes et temporaires *dans les conditions d'exploitation du Domaine* où les prairies permanentes sont *intensives*. (Nous disposons de l'histoire de chaque parcelle : fertilisation et exploitations depuis 1963).

— *Comparaison aux modèles* : A la suite de l'étude qui précède, nous avons estimé qu'il suffisait d'utiliser un seul modèle, celui bâti sur l'E.T.R.c, *bien que celui-ci soit le seul qui dépende en principe de la parcelle* (par l'intermédiaire du couple R.U., R.F.U.). Par contre, afin d'éliminer d'éventuels biais dus à des différences de précocité (départ apparent en végétation) *entre années*, la comparaison a été faite année par année, *mais elle repose toujours sur l'hypothèse de différences de précocité entre parcelles tendant vers 0 lorsque la fertilisation azotée croît*.

— *Données incomplètes* : Les réalités d'une production en vraie grandeur - peu différentes en cela d'une exploitation agricole normale - font que l'on n'a pas toujours à la fois le pourcentage de matière sèche et la surface récoltée (morceaux de parcelles). Cela joue en particulier pour les foin pour lesquels nous n'avons parfois pu tracer que des droites limitant la région du plan où se trouvent les résultats. Nous avons donc un nombre de données très variable suivant les années.

Tout cela rendait *a priori* bien hasardeux notre projet, et cependant...

2. Résultats et commentaires

Sur les figures 9 à 12 nous avons représenté :

a) Par une droite (ou deux segments) continus la courbe de croissance *de l'année considérée* sur l'expérimentation « Domvallier O », expérimentation utilisée pour établir le modèle ; les symboles utilisés étant les mêmes que sur les figures 4 à 8.

FIGURE 9
VÉRIFICATION DU MODÈLE ET COMPARAISON
AVEC LES DONNÉES DE PRODUCTION
DU DOMAINE DE MIRECOURT
 (1974 et 1975) (légende p. 71)

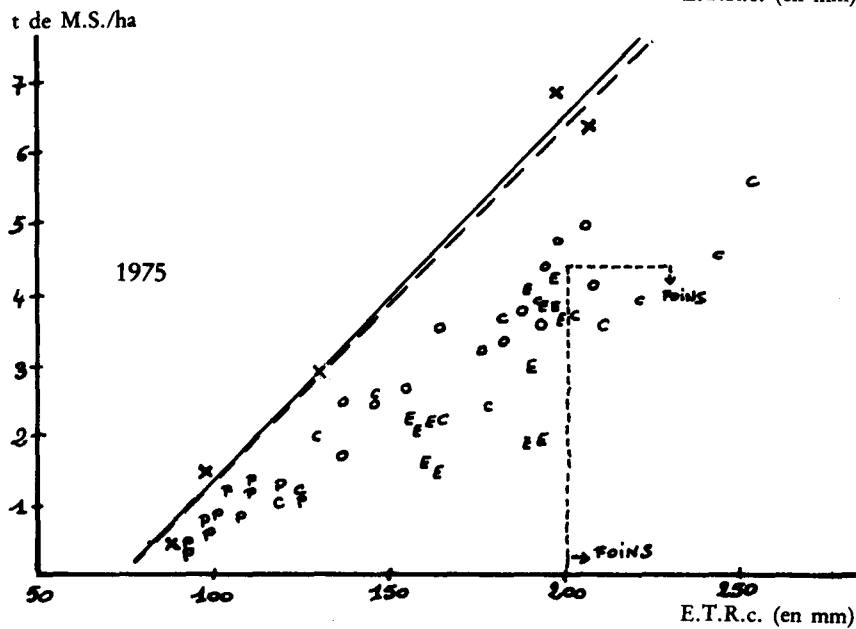
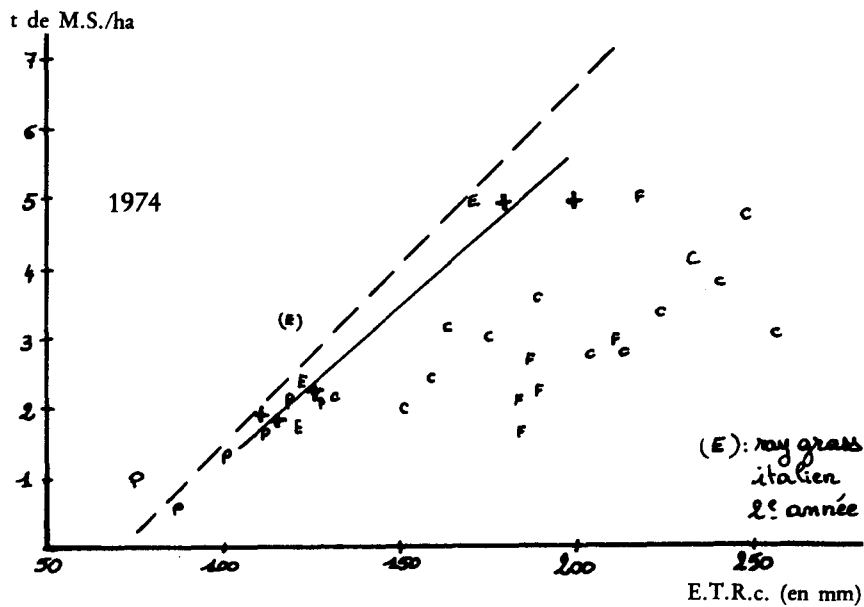


FIGURE 10
VÉRIFICATION DU MODÈLE ET COMPARAISON
AVEC LES DONNÉES DE PRODUCTION
DU DOMAINE DE MIRECOURT
 (1976 et 1977) (légende p. 71)

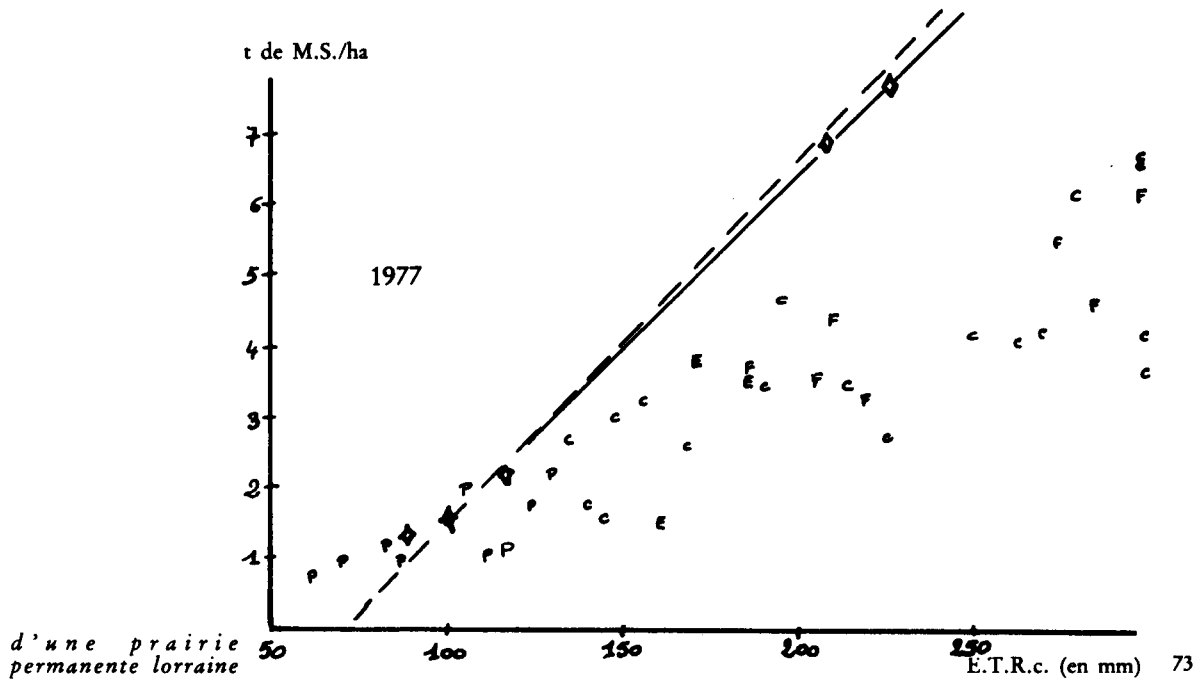
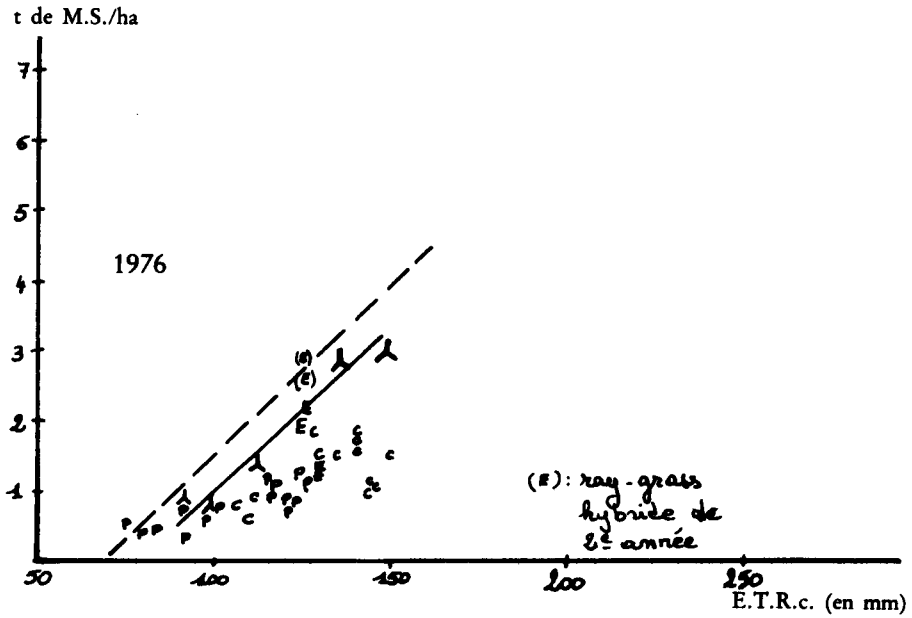


FIGURE 11
VÉRIFICATION DU MODÈLE ET COMPARAISON
AVEC LES DONNÉES DE PRODUCTION
DU DOMAINE DE MIRECOURT
 (1978 et 1979) (légende p. 71)

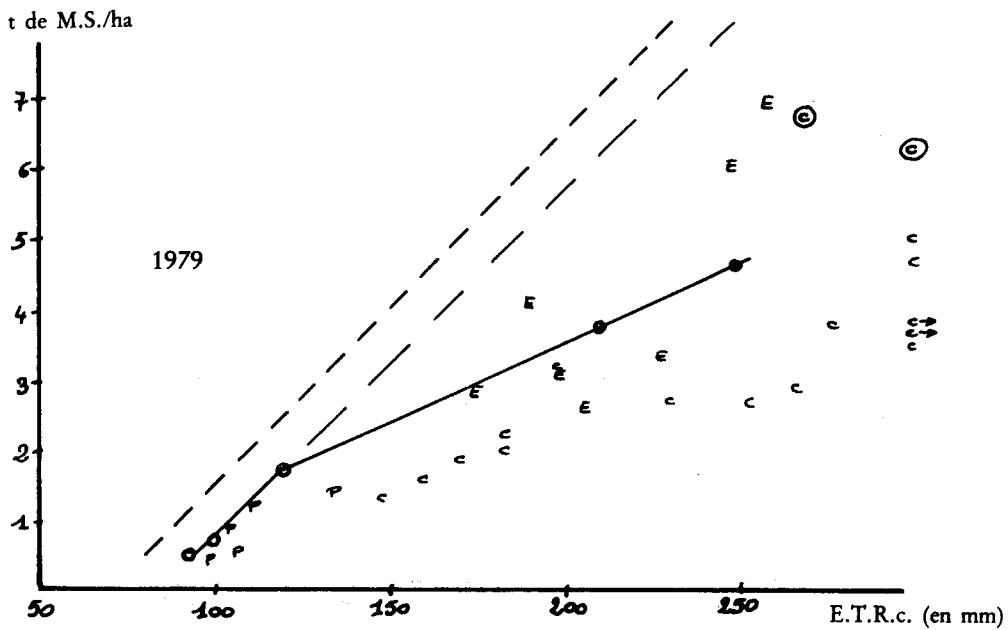
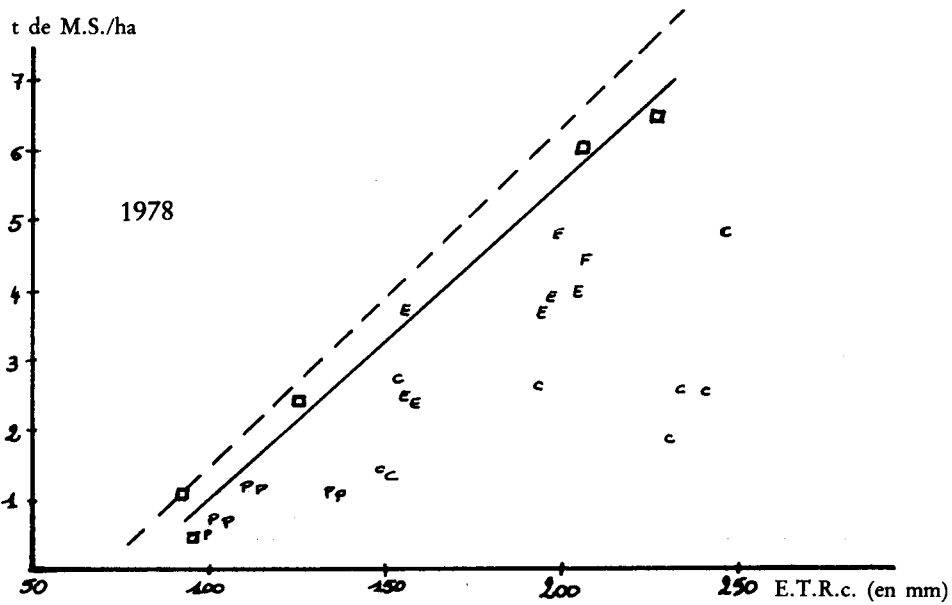
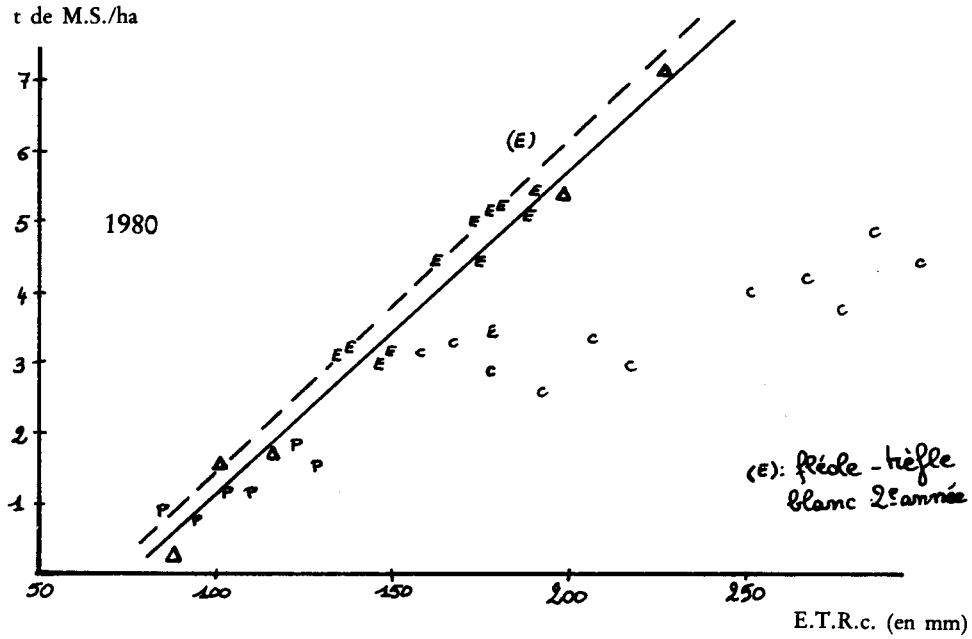


FIGURE 12
VÉRIFICATION DU MODÈLE ET COMPARAISON
AVEC LES DONNÉES DE PRODUCTION
DU DOMAINE DE MIRECOURT
 (1980 et 1981) (légende p. 71)



b) Par une droite en tiretés, le modèle « moyen » arrondi (cf. tableau III) :

M.S. = 50 E.T.R.c - 3500
kg mm

avec :

— E.T.P. Penman, coefficient cultural 1, seuil 0,

— R.U. = 60 mm, R.F.U. = 36 mm, somme depuis le 1^{er} Décembre.

c) Ponctuellement, les mesures de production en petites parcelles ou en placettes (expérimentations S.C.P.A. et « pâturage de génisses gestantes » sur les parcelles Domvallier 1 à 6, en prairie permanente) :

P croissance non perturbée
 (avant le 1^{er} passage des animaux),
C cumul des repousses (pâturage de génisses),
O cumul des repousses (pâturage de vaches laitières).

d) De même, les mesures en grandes parcelles ont été représentées :

E ensilage,
F foin (ou segments en pointillés limitant la région du plan).

On observe :

— *en 1974*

L'alignement sur le modèle des mesures avant le 1^{er} passage des animaux et des coupes d'ensilage. Les foins sont assez dispersés en dessous (entre 1/2 et 1/3 du potentiel), ainsi que les cumuls de repousses.

— *en 1975*

Le modèle est 20 à 25 % au-dessus de l'enveloppe supérieure de l'ensemble des données, où les coupes d'ensilage ne se distinguent pas des cumuls de repousses en pâturage.

— *en 1976*

Presque à la même date, des ensilages dont les différents rendements semblent correspondre - compte tenu des parcelles considérées - à des réserves utiles plus ou moins élevées.

— en 1977

A part les points au-dessus du modèle en début de croissance (phase I avant le « départ apparent en végétation » correspondant à environ 1,5 t M.S./ha), toutes les productions sont inférieures au modèle d'au moins 25 % en fin de saison.

— en 1978

Les cumuls de repousses les plus faibles correspondent à des parcelles très piétinées lors de ce printemps humide. Pour les ensilages, les écarts au modèle sont plus réduits qu'en 1975 et 1977.

— en 1979

L'année est tardive pour toutes les parcelles (décalage du modèle vers la droite d'environ 15 mm d'E.T.R. soit 10 à 15 jours en début de saison), en accord avec notre hypothèse sur les conditions hivernales destructrices. Mais ces conditions doivent avoir joué différemment suivant les parcelles, puisqu'on trouve des productions supérieures à la croissance non perturbée sur Domvallier O - y compris le cumul des repousses sur les traitements A et B en rythme pâture (points C entourés d'un cercle) - ; cette année « défavorable » sur notre essai est donc liée à un « effet parcelle ».

— en 1980

Un excellent alignement sur le modèle de la plupart des coupes d'ensilage et des mesures avant le 1^{er} passage des animaux (on aurait dû sélectionner cette seule année pour la publication !).

— en 1981

Les ensilages confirment la validité du modèle. Là encore, le cumul des repousses sur les traitements A et B est au moins égal à la croissance non perturbée.

On remarquera une tendance à une meilleure adéquation des données au modèle avec le temps, qui pourrait correspondre à une certaine intensification de l'utilisation des parcelles du Domaine.

Globalement, et bien que nous n'ayons encore ni exploité la totalité des archives du Domaine, ni analysé en détail la fertilisation azotée de chaque parcelle, nous pourrions conclure provisoirement que :

a) Les résultats de la comparaison n'infirmes pas nos hypothèses (ce qui est cependant insuffisant pour les démontrer), le modèle établi correspondant assez bien à l'enveloppe supérieure des données disponibles. *En particulier, aucune production ne lui est supérieure, même lorsque les fertilisations azotées dépassent 300 kg/an.*

b) La quantité d'herbe au 1^{er} passage des animaux en pâturage ainsi que les coupes d'ensilage, sont fréquemment très proches du modèle. Les écarts vers le bas devront être analysés en fonction des fertilisations azotées (qui varient de 100 à plus de 350 kg/an), des conditions d'exploitation à l'automne précédent, de l'effet de l'hiver, et, éventuellement, de la flore.

c) Sauf l'exception de 1975 -à expliquer- *les cumuls des repousses en pâturage* (croissance doublement perturbée par le piétinement et les prélèvements par les animaux) *ont pour enveloppe supérieure la moitié du modèle*, or il s'agit là de prairies intensives :

Il nous paraît donc raisonnable de prendre, pour les modélisations de systèmes de pâturage, ces bases de calcul qui sont tout-à-fait en accord avec les résultats de de MONTARD, en Auvergne.

d) Les coupes à foin ne dépassent pas non plus la moitié du modèle, mais ici la limitation par la fertilisation azotée est volontaire à cause des difficultés de séchage de quantités importantes de foin - et nous retrouvons ici *l'autre facette du problème qui est la « récoltabilité » des quantités produites* (portance, accessibilité, séchage...).

CONCLUSIONS

Dans un premier temps, nous avons cherché à vérifier les modèles établis dans l'Ouest par LEMAIRE et en Auvergne par de MONTARD, sur les données d'une expérimentation qui n'était pas prévue pour déterminer le potentiel pédo-climatique.

Pour cela, nous avons réalisé les calculs *comme si* les conditions nécessaires (un même traitement à azote non limitant) étaient remplies. Les

*Modélisation de la
croissance printanière*

résultats sont en accord avec la définition du potentiel pédo-climatique ; les courbes de croissance obtenues sont des droites parallèles qui forment l'enveloppe supérieure de toutes les données disponibles et dont la pente concorde avec les modèles de LEMAIRE et de de MONTARD dans le cas d'une très bonne prairie.

Les équations des deux modèles, qui sont strictement équivalents en l'absence de déficit hydrique, sont :

— Sur les sommes de température :

$$M.S.kg = 10,5 \sum T^{\circ}C - 6000 \text{ (cumul depuis le 1}^{\text{er}} \text{ novembre)}$$

— Sur l'E.T.R. calculée cumulée :

$$M.S.kg = 50 E.T.R.mm - 3\ 500 \text{ (cumul depuis le 1}^{\text{er}} \text{ décembre)}$$

Mais il ne faut pas oublier que tout ce qui précède demande encore une vérification définitive sur des données expérimentales ad hoc, et que l'étude du départ apparent en végétation et de ses déterminants reste à faire dans différentes conditions : effet de l'hiver et de l'exploitation à l'automne.

Les équations ci-dessus ont été calculées en éliminant les années 1979 et 1981 pour lesquelles l'expérimentation utilisée a présenté une croissance nettement inférieure à la fois au modèle et à celle d'autres parcelles. L'hypothèse avancée est une interaction entre la rigueur de l'hiver et la fertilisation azotée, qui montre l'intérêt d'une évaluation de l'état de la prairie à la fin de l'hiver.

Dans un deuxième temps, la comparaison du modèle avec l'ensemble des données que nous avons pu recueillir sur le Domaine de Mirecourt montre son utilisabilité, même pour des productions en grandes parcelles lorsque celles-ci sont intensives, et pour des prairies temporaires en espèces mélangées (sauf de rares exceptions : ray-grass italien ou hybride et mélange fléole-trèfle blanc, tous en deuxième année de production). Les coupes à foin et les cumuls de repousses (en pâturage ou au même rythme) produisent dans l'ensemble entre la moitié et le tiers du potentiel climatique. Mais la gamme de situations explorées est encore faible : il s'agit dans tous les cas de prairies intensives, de flore variée mais toujours productive, sur des sols argilo-calcaires plus ou moins limoneux. Nos résultats ne peuvent être étendus aux flores de prairies moins intensives ni à des sols

acides ou très hydromorphes. Enfin, le plus important reste à faire : la détermination des quantités effectivement récoltables dans différentes situations.

Remerciements

Nous remercions tout particulièrement MM. LEMAIRE (I.N.R.A., Lusignan) et de MONTARD (I.N.R.A., Clermont-Ferrand) pour leurs précieux conseils ; Mme MATHIEU (I.N.R.A., Dijon) ainsi que MM. LE BRIS et GAILLARD (I.T.C.F. Nancy), SPECTY (Météorologie Nationale, Strasbourg), CHOPY (Météorologie Nationale, Besançon), DUBOIS et VALION (EDE Haute-Saône) qui ont participé à la définition et à l'élaboration de ce travail.

P. MORLON*, F. PORQUET**,
B. SERMAGE***, E. de VAUBERNIER*,
avec la participation technique de B. LAVALETTE* et J. BARLIER*.

* I.N.R.A., *Systemes Agraires et Développement,*
Unité Versailles-Dijon-Mirecourt.

** *Travail réalisé en stage de recherche de l'École Nationale*
de la Météorologie, en 1984.

*** *Travail réalisé en stage de 2^e année de l'E.N.S.S.A.A. de Dijon*
et financé par l'E.D.E. de la Haute-Saône
(Approche de la sécurité des systèmes fourragers), en 1983.

LISTE DE MOTS-CLÉS

Conditions hivernales destructrices, croissance, Lorraine, météorologie, modélisation, potentiel pédo-climatique, prairie permanente, printemps, références techniques.

Modélisation de la
croissance printanière

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AURICOSTE C., DEFFONTAINES J.P., FIORELLI J.L., LANGLET A. et OSTY P.L. (1983) : *Friches, parcours et activités d'élevage. Points de vue d'agronomes sur les potentialités agricoles*, I.N.R.A., Versailles, 55 p.
- 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*, 85, pp. 39-52.
- de MONTARD F.X. (1983) : « La production prairiale. I. : le potentiel de production herbagère en conditions de fertilisation intensive », dans : BAZIN *et al* : *Système agraire et pratiques paysannes dans les monts Dômes*, I.N.R.A., Paris, 205-210.
- de MONTARD F.X. (1983) : « Climat et potentialités herbagères », *La Margeride, la montagne, les hommes* (ouvrage collectif), I.N.R.A., Paris, pp. 439-455.
- GILLET M. (1980) : « Les graminées fourragères », Gauthier-Villars, Paris, 306 p.
- LEMAIRE G. et SALETTE J. (1981) : « Prévision des potentiels de production en fonction des conditions pédo-climatiques ; application au pâturage », *Fourrages*, 85, pp. 23-37.
- LEMAIRE G., SALETTE J. et LAISSUS R. (1982) : « Analyse de la croissance d'une prairie naturelle normande au printemps. I. : Production en cours de croissance et sa variabilité », *Fourrages*, 91, pp. 3-16.
- 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.
- PORQUET F. (1984) : *Production des prairies et conditions météorologiques*, rapport de stage de recherche, École Nationale de la Météorologie, 163 p. + annexes (diffusion interne).
- SERMAGE B. (1983) : *Approche des contraintes agroclimatiques des systèmes fourragers en Haute-Saône*, rapport de stage ENSSAA, Dijon, 138 p.

ANNEXE
BRÈVE DESCRIPTION DE LA PARCELLE « DOMVALLIER O »
FLORE DE LA PARCELLE
(juin 1974)

Fétuque des prés	28%	avec présence de :	liseron
Dactyle	25%		cretelle
Paturin des prés	20%		vesce
Agrostide	13%		trèfle violet
Fétuque élevée	7%		minette
Ray grass anglais	7%		renoncule

Pourcentages en présence (méthode des anneaux)

ANALYSE DE SOL
(mai 1981, réalisation : S.C.P.A.)

Analyse physique "Sol" "Sous-sol"			Analyse chimique "Sol" "Sous-Sol"		
(% de terre fine) 0-10cm 10-20cm			0-10cm 10-20cm		
Sable grossier (2 à 0,2mm)	22	38	pH	7,4	7,70
Sable fin (0,2 à 0,05mm)	70	72	P205 Joret- Hébert (mg/kg)	160	38
Limon grossier (0,05 à 0,02mm)	103	113	K ₂ O échangeable (mg/kg)	515	390
Limon (0,02 à 0,0002mm)	328	313	CaO échangeable (%)	7,77	7,56
Argile (inf. à 0,0002mm)	409	435	MgO échangeable (mg/kg)	1978	2024
Calcaire total	88,3	110	Na ₂ O échangeable (mg/kg)	100	110
Matière organique	60,5	27,9	Capacité totale d'échange (meq/kg)	222	200

La teneur en calcaire total des blocs est significativement différente avec 138 - 130 - 52** et 32** % du bloc 1 au bloc 4.

Le sol est argilo-calcaire, riche en matière organique et en magnésium, bien pourvu en potassium, assez pauvre en phosphore. Le sous-sol est plus calcaire et pauvre en phosphore.

L'essai a été conduit en petites parcelles (10 m²) avec quatre répétitions (blocs) ; la récolte était effectuée sur la bande centrale (5 m²) à la motofaucheuse à 4 cm de haut.

Lors de l'implantation de l'essai, la prairie était âgée d'au moins 10 ans, les données connues sur son utilisation antérieure étant résumées dans le tableau ci-dessous, montrant une exploitation moins intensive (la première année d'expérimentation, 1974, a donc été une *transition*) :

HISTOIRE ANTÉRIEURE DE LA PARCELLE

Année	Fertilisation NPK	Exploitation
1971	0-109-109	
1972	121-93-93	Foin puis pâture
1973	80-100-100	Foin deux coupes