

## LE SÉCHAGE DU FOIN AU CHAMP

### II - MODÉLISATION DU SÉCHAGE ET JOURS DISPONIBLES POUR LA FENAISSON

*La méthode de Luder et son application  
(exemple des Alpes du Nord)*

**D**EPUIS TOUJOURS, LA PRISE DE DÉCISION DE L'AGRICULTEUR CONCERNANT LA FENAISSON EST DÉLICATE ET S'ACCOMPAGNE D'UN DOUBLE RISQUE : OU BIEN, s'il fauche, voir le foin abîmé par la pluie ; ou bien, s'il attend, avoir un fourrage de moindre qualité lorsqu'une nouvelle occasion se présentera. Il s'avère donc nécessaire de cerner le risque encouru au moment de la fauche. On peut y parvenir en évaluant des séquences de jours nécessaires pour sécher un foin ayant des caractéristiques précises (composition floristique, quantité de matière sèche...).

La première approximation effectuée concernait la durée : dans une région donnée, à une certaine période, il faut tant de jours. Mais cette notion de jours de beau temps reste imprécise : jours plus ou moins chauds, plus ou moins venteux, ou plus ou moins humides. Ce qui fait que l'on a de nombreuses définitions des « jours de beau temps » ou « jours sans pluie », basées sur les précipitations du jour, celles de la veille, le

pourcentage d'insolation, etc. Il est donc nécessaire de relier de façon plus précise le séchage du foin aux conditions météorologiques par des modèles, dont les utilisations possibles sont :

— à court terme et à partir de l'historique des données existantes, des études fréquentielles de jours disponibles pour le séchage du foin, permettant d'évaluer *l'adéquation des chaînes de récolte aux surfaces à faucher* ;

— à plus ou moins brève échéance, l'intégration de ces modèles dans les prévisions météorologiques sur quelques jours.

Deux grands types de facteurs influencent le séchage du foin au champ :

— d'une part *les données météorologiques* que l'on sait mesurer ou calculer, et que l'on a l'habitude de manipuler à différentes échelles de temps et d'espace pour des calculs d'ETP, de bilan hydrique, etc. ;

— d'autre part, *les données propres à la végétation et à la parcelle* : les caractéristiques du matériel végétal et son arrangement dans l'andain ont une importance aussi grande que les conditions météorologiques mais que l'on ne sait pas décrire ou qui sont difficiles à mesurer ou à évaluer à chaque fanage ; l'imprécision sur ces données limite la précision des modèles, qui prennent nécessairement en compte les deux types de facteurs.

Ainsi, après avoir testé deux modèles de séchage, THOMPSON (1981, 1984), aboutit à la conclusion que le deuxième modèle, où l'andain est décomposé en couches horizontales, apporte peu par rapport au modèle global d'ensemble plus simple car, en pratique, *le foin étant retourné fréquemment, le gradient d'humidité vertical dans l'andain se trouve bouleversé* à chaque fois et il y a homogénéisation de l'humidité dans l'andain. Par ailleurs, ce deuxième modèle (multi-couches) « était compliqué et utilisait trop de temps d'ordinateur pour pouvoir être utile dans des recherches sur la climatologie du séchage du foin » (THOMPSON, 1984, p. 18-19).

Par ailleurs, de tels modèles, cherchant à représenter de la façon la plus exacte et la plus détaillée possible ce qui se passe dans un andain, exigent des mesures qui ne peuvent être réalisées que dans une station expérimentale spécialisée. Nos objectifs ici, comme l'évaluation des « jours disponi-

bles pour la fenaison » à partir des données météorologiques de réseau, nous conduisent donc à utiliser d'autres modèles que nous pouvons qualifier de « simplifiés », « statistiques » ou « appliqués ». Facilement utilisables, leur précision est suffisante pour la détermination des jours disponibles. Mais ils ne représentent le séchage que de façon approchée, et ne sont en toute rigueur valables que dans les conditions où ils ont été obtenus.

Par rapport à la plupart des autres travaux agricoles, la récolte du foin a la particularité de *s'étaler nécessairement sur plusieurs jours consécutifs*. A la différence des opérations de travail du sol, dont la faisabilité à un moment donné dépend de l'histoire de la parcelle (effet du climat, passé et donc connu, sur l'état du sol laissé par la dernière intervention culturale), la possibilité de faucher le foin dépend du *climat prévu des jours à venir*. Cela a pour nous ici deux conséquences :

— qualifier individuellement *un* jour pour le séchage du foin n'a de sens que si cette qualification est une étape dans la définition d'une séquence de jours permettant le déroulement de l'ensemble de la récolte, depuis la fauche jusqu'à l'engrangement ;

— on appelle « jour disponible pour la fauche » la réalisation fréquentielle sur plusieurs années du premier jour d'une telle séquence. Il s'agit d'une notion statistique permettant d'évaluer les besoins en équipement et en main-d'œuvre d'une exploitation ou, pour un équipement donné, les risques d'avoir à faire les foins dans de mauvaises conditions.

Cette notion est inspirée directement de celle de « jours disponibles pour les travaux des champs » (REBOUL), mais sa définition même implique que lorsque, d'un point de vue météorologique, plusieurs jours consécutifs sont « disponibles pour la fauche », les séquences que chacun d'eux débute se chevauchent automatiquement : il faudra donc vérifier, pour chaque exploitation, dans quelle mesure la main-d'œuvre et le matériel disponible permettent *en même temps* de faucher sur certaines parcelles, de faner sur d'autres et de ramasser le foin sur d'autres encore.

Dans cet article nous présenterons la méthode élaborée en Suisse par W. LUDER (1). La préoccupation d'obtenir un foin de qualité conduit

(1) Lorsque rien d'autre n'est précisé nous nous référons dans ce qui suit à la thèse de doctorat soutenue par W. LUDER à l'E.T.H. de Zürich en 1982.

LUDER à ne s'intéresser qu'aux séquences de « jours de beau temps », contrairement par exemple à deux modèles canadiens, celui de HAYHOE et JACKSON (1974) et celui de DYER et BROWN (1977) qui prennent en compte la possibilité de mouillage du foin par la pluie ; nous avons également commencé à tester et à adapter ces modèles dans l'Est de la France (MUNIER, 1986).

Prolongeant les travaux de VAN EIMERN et SPATZ (1968) en Allemagne, et testé sur des prairies permanentes et temporaires échelonnées entre 400 et 1 500 mètres d'altitude en Suisse, le modèle de LUDER a directement pour objectif l'évaluation des jours disponibles et du risque climatique au niveau des exploitations. Il a été utilisé en Savoie par CLAVEL et ORSINI (1984, 1985), puis dans le pays de Thônes (Haute-Savoie) et à Mirecourt (Vosges) par les auteurs du présent article.

## I - LA MÉTHODE DE LUDER : EXPOSÉ ET INTÉRÊT

### 1. Le modèle de séchage

Comme tous ceux dont nous avons eu connaissance, ce modèle exprime l'humidité du fourrage à un moment donné, en fonction de son humidité initiale et d'un indice climatique, exprimant le pouvoir évaporant de l'air et *sommé depuis la coupe*.

#### — Choix de l'indice climatique

L'indice climatique choisi est le *déficit de saturation de l'air sous abri* (DS), c'est-à-dire la différence entre la pression de vapeur saturante à sa température, et sa pression de vapeur réelle (MUNIER et MORLON, 1987). Il est exprimé ici en g d'eau/m<sup>3</sup> d'air et calculé à partir de la formule de BOSEN (1960) :

$$DS = 622 \cdot \frac{(100 - HR) \cdot E(T)}{287 (T + 273)}$$

avec  $E(T) = 33,8639 (0,00738 T + 0,8072)^8 - 0,000019 (1,8 T + 48) + 0,001316$

T : température de l'air (°C)

114 HR : humidité relative de l'air (en %)

Le choix des données météorologiques standard sous abri est imposé par les objectifs mêmes de la méthode, bien que les caractéristiques de cet abri, en particulier la hauteur au-dessus du sol, aient été précisément définies pour représenter non pas la parcelle à laquelle on s'intéresse, mais une étendue beaucoup plus grande (plusieurs kilomètres carrés en plaine). La somme des déficits de saturation sous abri *tout au long d'une journée* est étroitement reliée à l'ETP journalière moyenne sur la zone dont l'abri météo est représentatif puisque le déficit de saturation est en quelque sorte « entretenu » par les facteurs météorologiques intervenant dans le calcul de l'ETP : énergie et échanges gazeux. Par exemple, pour 50 jours pris au hasard sur 12 ans entre le 15 mai et le 15 août au domaine I.N.R.A. de Mirecourt (à 45 km au Sud de Nancy), MUNIER (1986) a établi la relation :

$$\text{ETP Penman} = 0,0239 \text{ SDS} + 1,613 \quad r = 0,8583 \quad r^2 = 0,73 \quad n = 50$$

(SDS = Somme, au pas de temps horaire, des déficits de saturation de 8 h à 17 h en Temps Universel ou TU).

La nuit, le séchage est interrompu et la rosée réhumecte les couches superficielles de l'andain : utilisant l'observation faite par VAN EIMERN et SPATZ (1968) et SPATZ et al. (1970) selon laquelle dans les champs le foin a retrouvé à 8 heures du matin son état de siccité de la veille à 17 heures, LUDER définit une *phase de séchage efficace* (figure 1) : les déficits de saturation non pris en compte en début et fin de journée compensent *en moyenne* la réhumectation par la rosée.

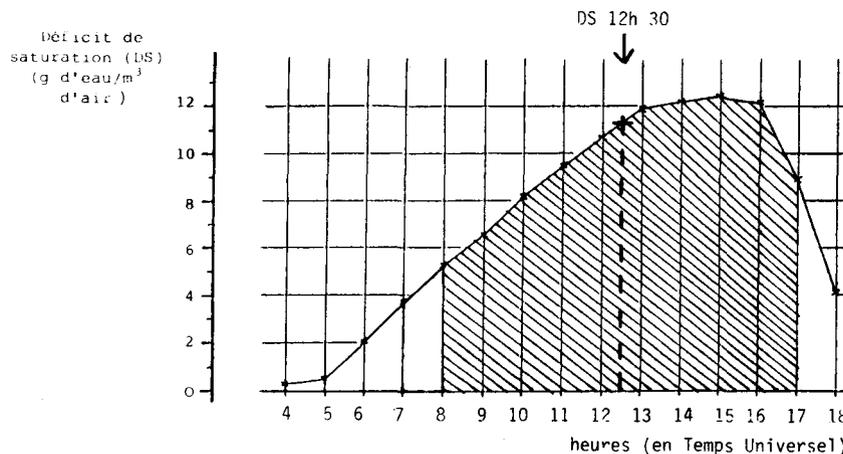
#### — Fonction de séchage

Considérant que la vitesse de séchage décroît en même temps que l'humidité du fourrage, la fonction de séchage est une exponentielle et le modèle de séchage prend la forme :

$$H = a \exp(-bx + cx^2), \quad \text{où :}$$

- H est l'humidité atteinte par le fourrage à un moment donné
- x est la somme des déficits de saturation, cumulés au pas de temps horaire depuis la coupe (en g d'eau × heure/m<sup>3</sup> d'air)
- a est l'« humidité initiale ajustée » (par le calcul) du fourrage.

**FIGURE 1**  
**COURBE TYPIQUE D'ÉVOLUTION**  
**DU DÉFICIT DE SATURATION DE L'AIR**  
**AU COURS DE LA JOURNÉE (LUDER, 1982).**  
 La phase de séchage efficace est hachurée



- b (constante empirique) traduit l'aptitude du végétal à céder son eau et est donc caractéristique de la végétation fauchée.
- c traduirait l'influence d'autres facteurs (vent, humidité du sol) ainsi que du mode de fanage.

Les ajustements obtenus par cette fonction sont excellents ; les coefficients de corrélation (pour une dizaine de points par courbe) sont de 0,98 en moyenne pour l'ensemble des travaux de LUDER ; de 0,993 sur les parcelles du domaine de Mirecourt en Lorraine (MUNIER, 1986) et 0,973 dans le pays de Thônes en Haute-Savoie (GRANGER, 1986). Mais il ne faut pas oublier qu'on obtient toujours des coefficients élevés lorsque l'on relie deux variables cumulées au cours du temps.

## 2. Les « besoins en sommes de déficits de saturation »

Les « besoins en SDS » nécessaires pour sécher un foin sont déterminés par l'intersection entre la courbe de séchage (fonction de séchage) et la droite horizontale représentant l'humidité à atteindre pour rentrer le fourrage, soit 25 % pour le séchage complet au sol, et 40 % pour le séchage en grange (figure 2).

L'angle très aigu d'intersection entre la courbe et la droite horizontale fait que pour une courbe individuelle (1 parcelle), une incertitude même très faible sur l'ajustement de la courbe entraîne une incertitude beaucoup plus grande sur le besoin en SDS (abscisse de l'intersection) : à Mirecourt en 1986, les « besoins en SDS », compris selon les parcelles entre 100 et 200 unités, ne sont connus avec 95 % de certitude qu'à  $\pm 30$  unités près en moyenne.

Mais l'objectif n'est pas ici de modéliser finement le séchage de parcelles individuelles (ce qui entraînerait une infinité de cas particuliers), mais de déterminer les besoins moyens d'un nombre limité de cas définis par le type de végétation, le rendement, le stade lors de la coupe, l'altitude et les techniques employées : c'est donc *une famille de courbes* que l'on traite, graphiquement (figure 2).

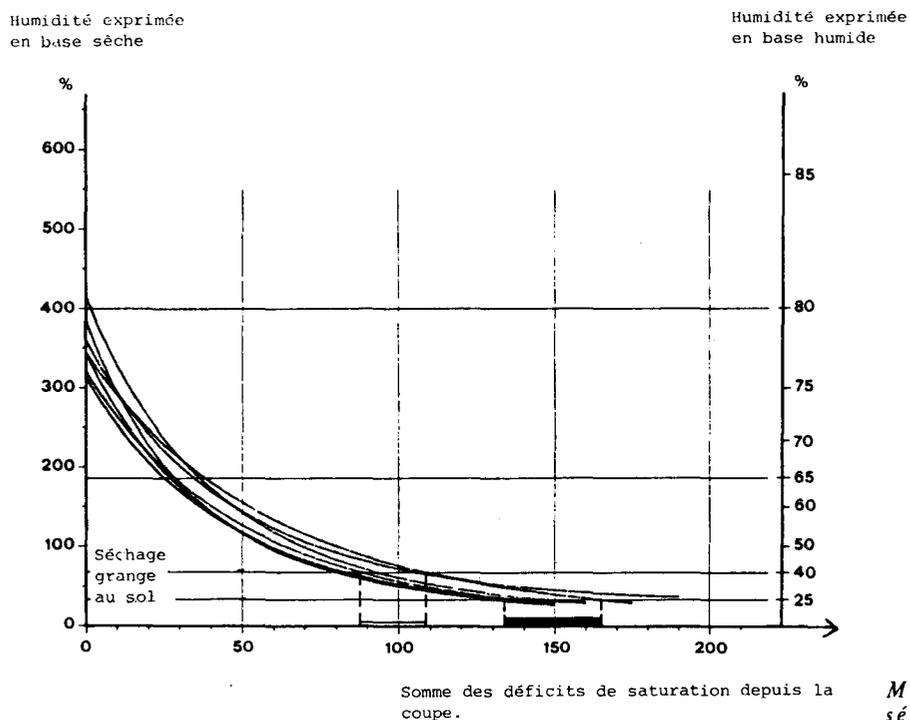
Les « besoins en SDS » ainsi déterminés par LUDER ont les caractéristiques suivantes :

— ils varient en sens inverse de l'altitude, décroissant en moyenne de 4 % par tranche de 100 m ; ce fait, inattendu, pourrait être expliqué soit directement par les facteurs physiques du séchage (plus grand écart entre les conditions sous abri et celles au niveau du végétal, ou équation de la courbe de saturation de l'air variant avec l'altitude), soit par des différences dans les caractéristiques des membranes végétales (on sait sur ce point qu'au même stade de développement, une même espèce végétale est plus digestible lorsqu'elle croît en altitude) ;

— ils augmentent avec le rendement, de 8 % par tonne en 1<sup>re</sup> coupe (on notera que, pour se rapprocher de la réalité agricole, LUDER a réuni stade et rendement) ;

**FIGURE 2**  
**DÉTERMINATION GRAPHIQUE DU BESOIN EN SÉCHAGE**  
**À PARTIR DU REGROUPEMENT EN FAMILLE DES COURBES**  
**DE DESSICATION AJUSTÉES**

Cas de prairies naturelles, composées de 65 à 90 % de graminées, bien fertilisées et exploitées suivant les pratiques habituelles, sur sol profond à 540 m d'altitude ; regain, 6 à 9 semaines après la dernière coupe, rendement entre 2,5 et 4,5 t/ha M.S. (LUDER, 1982).



*Modélisation du séchage du foin et*

— ils sont moins élevés pour les regains que pour la 1<sup>re</sup> coupe, à rendement et altitude égaux ; en plus des caractéristiques du végétal, cette réduction peut être due à l'influence du sol, froid et humide en début de saison, chaud et plus sec en fin de saison ;

— ils sont réduits en moyenne de 30 % par le conditionnement, ce qui correspond à un gain de temps de 25 % ; sur les coupes de fin juin à Mirecourt (MUNIER, 1986) cette réduction est, en moyenne, de l'ordre de 30 unités, soit en durée entre quelques heures et un jour, la SDS d'un jour sans pluie variant suivant les conditions météorologiques (insolation, vent,...) entre moins de 30 et 150 unités à cette époque.

Les besoins pour le séchage en grange (fourrage rentré à 60 % de matière sèche) sont inférieurs en moyenne de 22 % à ceux du séchage au sol (75 % de matière sèche) ; cet écart est plus élevé à basse altitude et pour de faibles rendements (28 % pour 3 t M.S./ha à 400 m d'altitude) et diminue quand ces derniers augmentent.

### 3. Classification des jours de beau temps et détermination des jours disponibles pour la fauche

#### — Simplification du calcul des déficits de saturation

La sommation horaire des déficits de saturation, réalisable dans les études fines nécessaires pour tester un modèle, ne l'est plus lorsque l'on veut faire une analyse fréquentielle des données météorologiques de réseau. LUDER a montré que l'on pouvait avoir une très bonne approximation de la SDS de la phase de séchage efficace d'une journée à partir de la valeur du DS en milieu de journée (cf. figure 1) ; pour 398 jours de beau temps répartis sur les mois de mai à septembre sur 4 ans pour 6 stations suisses entre 435 et 1 190 mètres d'altitude, il obtient la régression :

$$\text{SDS} = 7,532 \text{ DS} + 4,355 \quad r = 0,951 \quad r^2 = 0,90 \quad n = 398$$

(12 h 30 TU)

*jours disponibles* Les coefficients de la régression doivent sans doute être vérifiés en chaque lieu ; ainsi à Mirecourt (290 m d'altitude), la meilleure régression 119

est obtenue à 13 h (à 12 h 30 la pente de la régression est plus élevée, donc plus éloignée de celle obtenue par LUDER) :

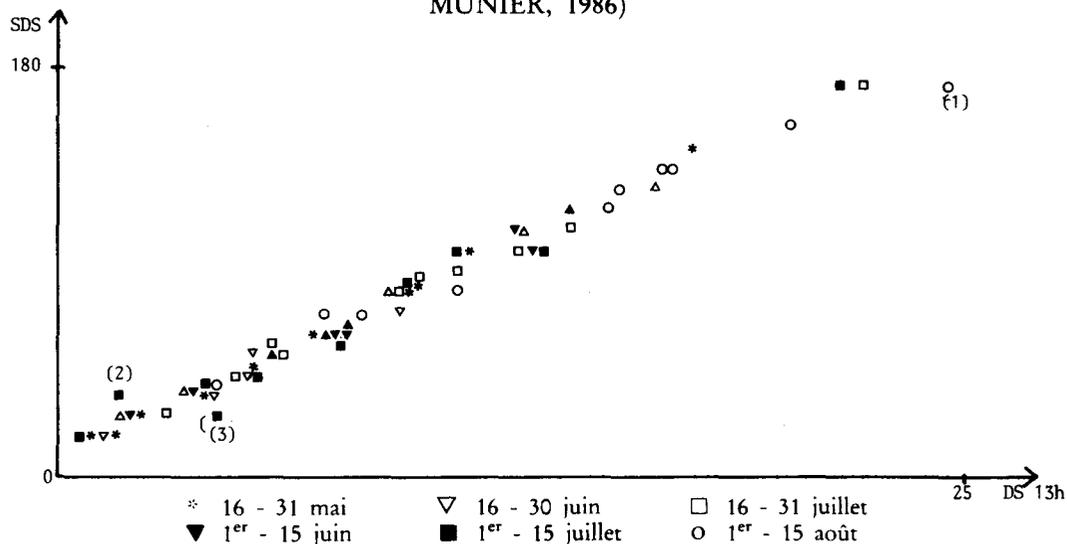
$$\text{SDS} = 7,793 \text{ DS} + 1,152 \quad r = 0,994 \quad r^2 = 0,99 \quad n = 60$$

(13 h TU)

Cette dernière régression a été calculée sur 60 jours choisis au hasard, sur 15 ans entre le 15 mai et le 15 août et il n'est possible d'y séparer statistiquement ni les dates (quinzaines) entre elles, ni les jours de beau temps des jours pluvieux (figure 3). Seuls s'écartent des régressions, 4 %

FIGURE 3

RELATION ENTRE LA SOMME DES DÉFICITS DE SATURATION  
POUR LA JOURNÉE ET LE DÉFICIT À 13 h  
(60 jours pris totalement au hasard sur 15 ans - Station de Mirecourt -  
MUNIER, 1986)



(1) : Humidité à 13 h en-dessous de la gamme permise par l'hygromètre

(2) : Changement de temps avec averse à 13 h

120 (3) : Changement de temps : couvert le matin, éclaircie à partir de 12 h

*Modélisation du séchage du foin et*

des jours pour lesquels s'est produit en milieu de journée une brusque modification de l'ensemble des conditions météorologiques (changement de masse d'air ?).

— *Schéma de classification des jours*

Pour satisfaire à l'objectif de qualité du foin, LUDER ne s'est intéressé qu'aux séquences de jours de beau temps, et a bâti pour trier les jours l'organigramme empirique représenté sur la figure 4. Les comparaisons entre prévisions et résultats d'essais permettent de classer les jours en trois catégories, déterminées par des seuils de SDS, de précipitations, d'insolation relative et de couverture du ciel :

— un « *jour de beau temps* » commence ou prolonge une période favorable ; sa somme de déficits de saturation est cumulée avec celle des autres jours de beau temps de cette période ;

— un « *jour particulier* » (ou intermédiaire) ne peut pas débiter une période favorable ; il ne l'interrompt pas, mais sa SDS n'est pas prise en compte dans celle de la période ;

— un « *jour de mauvais temps* », non favorable à la fenaison, met fin à une période de beau temps et sa SDS n'est pas non plus prise en compte.

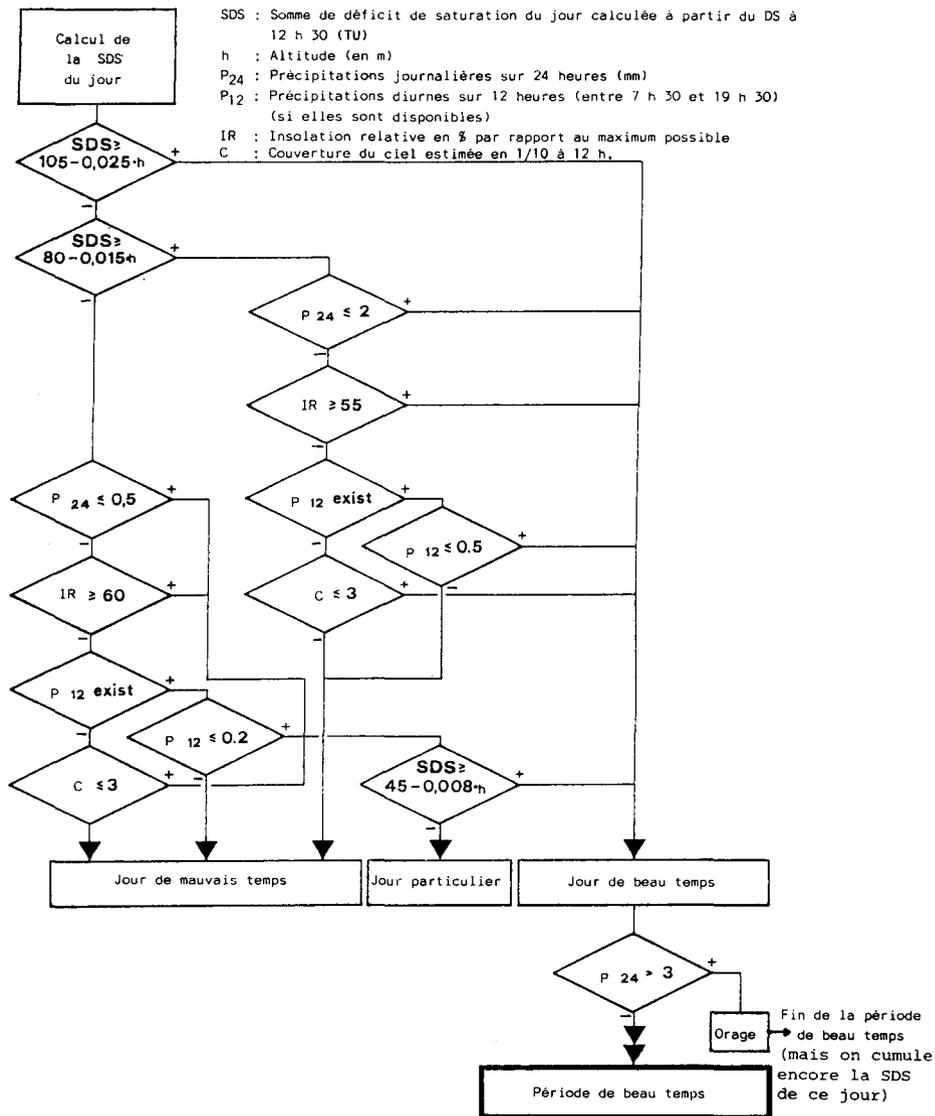
Cet organigramme, dont nous présentons ici le dernier état (1986), pourrait à l'avenir être encore affiné en ce qui concerne les seuils de précipitations, pour tenir compte du fait qu'une même quantité de pluie provoque des effets différents suivant le moment où elle se produit.

— *Comparaison avec l'approche « jours sans pluie »*

S'il s'agissait seulement de comptabiliser des pourcentages de jours de beau temps, un tel travail n'aurait pas d'intérêt par rapport au simple décompte des jours où les précipitations sont inférieures à un seuil choisi ; par exemple :

— pour un seuil de 2 mm, CLAVEL et ORSINI (1984, 1985) obtiennent une différence moyenne du nombre de jours disponibles par quinzaine de -8 %, entre le 20 avril et le 20 juin sur 20 ans à Challes-les-Eaux (Savoie) ;

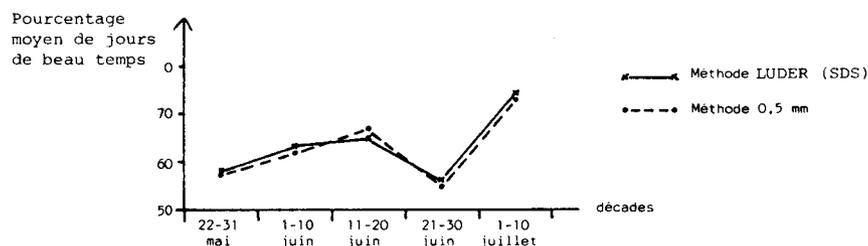
**FIGURE 4**  
**SCHEMA DE CLASSIFICATION DES JOURS**  
 (LUDER, 1986, communication personnelle)  
 (+ = oui, - = non)



— pour un seuil de 0,5 mm, MUNIER (1986) aboutit à une différence moyenne décadaire de + 2 % entre le 22 mai et le 10 juillet sur 14 ans à Mirecourt (figure 5).

(Ces différences dans le décompte des jours disponibles correspondent dans un sens à des jours froids, couverts ou humides, mais sans pluie ; et dans l'autre, à des pluies qui, bien que supérieures à 0,5 mm sont largement compensées par des SDS très élevées (ETP de l'ordre de 5 mm/jour), ou à des orages en fin de soirée après une journée à forte SDS permettant d'achever le séchage et de récolter. Elles montrent l'intérêt de l'approche par les SDS, plus précise et « collant » mieux à la réalité).

FIGURE 5  
COMPARAISON DES DEUX MÉTHODES DE DÉTERMINATION  
DES JOURS DE BEAU TEMPS À MIRECOURT  
(MUNIER, 1986)



Mais, la récolte des foins se déroulant sur plusieurs jours, on ne peut considérer comme jours utilisables pour la fauche ou « occasions de fauche » que ceux commençant une période qui permette le déroulement complet des opérations. Une telle période est définie suivant la première approche par un nombre de jours, dans celle de LUDER par un seuil de SDS cumulées. Pour chaque date (chaque décade), il n'existe aucune correspondance stable, ni au long de l'année, ni d'une année sur l'autre, entre

les nombres de possibilités de récolte ainsi définis, comme le montre l'exemple de la deuxième décennie de juin à Mirecourt (MUNIER, 1986) : entre 1973 et 1986, les seuils de SDS nécessaires pour que les occasions de fauche soient aussi nombreuses qu'avec le décompte des périodes de 3 jours sans pluie varient de moins de 160 à plus de 320 ; inversement, pour atteindre une SDS de 240, il faut entre 2 et 5 jours sans pluie.

Lorsqu'un « jour utilisable pour la fauche » ou, suivant la terminologie proposée par LUDER, une « occasion de récolte », est *fortement probable* au vu d'une étude fréquentielle réalisée sur une longue série d'années représentative du climat local, il devient un « jour disponible pour la fauche » ou « possibilité de récolte ».

— *Notion de risque climatique*

Pour prendre en compte la variabilité interannuelle, LUDER propose la définition d'une nouvelle notion, le risque climatique. Celle-ci ayant été utilisée plus particulièrement dans les Alpes du Nord, nous la précisons au § II, 4.

## II - UN EXEMPLE D'APPLICATION DE LA MÉTHODE DE LUDER : LE CAS DES ALPES DU NORD FRANÇAISES

Cette partie a pour objectif de préciser les conditions de mise en œuvre du modèle précédent du côté français : en effet, bien qu'appartenant au même massif montagneux, les conditions d'application du modèle ne sont pas les mêmes.

### 1. Adaptation du modèle aux données météorologiques de réseau

En France, les données nécessaires à la mise en œuvre du modèle de LUDER (pluviométries diurne et nocturne, insolation relative, couverture du ciel, humidité relative et température à midi) ne sont enregistrées que dans les *stations* météorologiques, dont la densité est insuffisante par rapport à la variabilité climatique locale, surtout en région de montagne.

124 Le territoire est beaucoup mieux couvert par les *postes* météo, tenus par

*Modélisation du  
séchage du foin et*

des observateurs bénévoles qui enregistrent chaque jour la pluviométrie (total sur 24 heures), les températures minimale et maximale, ainsi qu'un commentaire rapide sur le type de temps. Il est donc nécessaire d'adapter la méthode à ces données disponibles, ce que GRANGER (1986) a réalisé en trois étapes pour le Beaufortain et le pays de Thônes, dans le cadre d'un programme de recherche-développement mené au sein du Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) « Alpes du Nord ».

a) *Estimation de la SDS journalière*

— Le déficit de saturation moyen de la journée  $DS_m$  peut être estimé à partir des températures maximales et minimales, en utilisant une formule habituellement employée dans le calcul de l'ETP par la Météorologie Nationale, notamment à Chambéry :

$$DS_m = 1323,54 \times \frac{[1 + \sqrt{2} \sin (T_{max}/3)]^{8,827} - [1 + \sqrt{2} \sin (TRO/3)]^{8,827}}{T_{max} + 273}$$

Où : —  $DS_m$  est exprimé en g de vapeur d'eau/m<sup>3</sup> d'air  
 —  $T_{max}$  est la température maximale de la journée  
 — TRO est la température moyenne au point de rosée, estimée comme suit (ALOUIS et al, 1980) :

$$TRO = T \text{ minimale} + e,$$

e étant de 0,5 °C ou de 1 °C suivant les régions.

Pour la station de Bourg-Saint-Maurice, la plus proche de la zone étudiée, et pour la période des foins (1<sup>er</sup> mai au 15 septembre), GRANGER a établi les relations plus précises :

— pour les jours de beau temps :

$$TRO = 0,8822 T_{min} + 0,2565 \quad r = 0,846 \quad n = 394$$

— pour la totalité des jours :

$$TRO = 0,8775 T_{min} + 0,4948 \quad r = 0,844 \quad n = 536$$

*jours disponibles*

— *Estimation de la SDS journalière à partir du déficit de saturation moyen*

Sur la station de Bourg-Saint-Maurice et pour la période de fenaison, il était possible de comparer statistiquement le DS moyen de la journée estimé par la formule précédente, avec la SDS calculée suivant la méthode de LUDER à partir du DS au milieu de la journée, sur deux « populations » :

— la totalité des jours :

$$SDS_{Luder} = 6,36 DS_m + 3,89 \quad r = 0,911 \quad r^2 = 0,831$$

— les jours de beau temps :

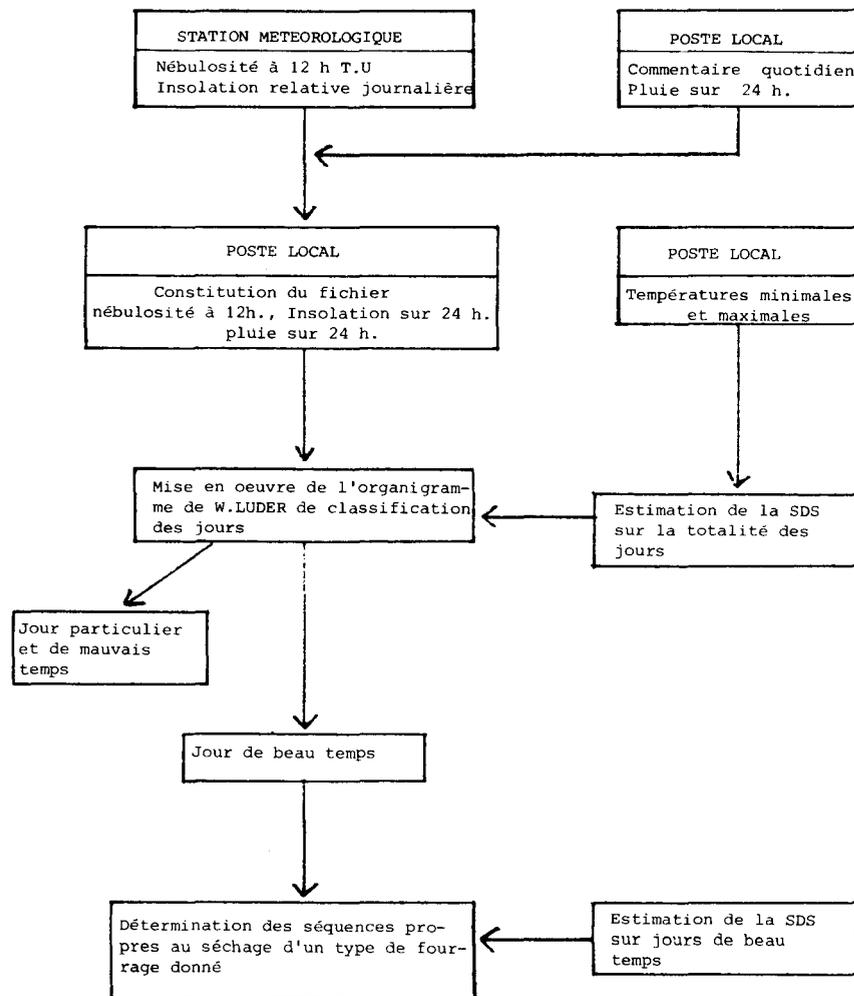
$$SDS_{Luder} = 5,66 DS_m + 17,03 \quad r = 0,884 \quad r^2 = 0,781$$

L'analyse statistique détaillée réalisée sur ces données permet à GRANGER (1986) de conclure que l'on peut valablement employer les relations ci-dessus pour estimer les SDS utilisées dans le modèle de LUDER, à partir des seules températures maximales et minimales relevées dans des postes météorologiques situés dans le même contexte climatique que la station de Bourg-Saint-Maurice où elles ont été établies ; un travail de généralisation spatiale de ces estimations est actuellement en cours de réalisation.

*b) Mise en œuvre du schéma de classification des jours*

A la différence de MUNIER (1986) qui, pour les données du domaine I.N.R.A. de Mirecourt, avait pu utiliser un organigramme simplifié, GRANGER (1986) propose la mise en œuvre d'un *transfert partiel de données* à partir de la (ou des) station(s) météorologique(s) la (les) plus proche(s), avec une éventuelle correction à partir du commentaire quotidien fait par l'observateur. Ce transfert, représenté sur la figure 6, peut paraître hasardeux (il le sera d'autant moins qu'il est réalisé par quelqu'un qui connaît bien la région !), mais il faut rappeler que les données transférées n'interviennent que par des seuils dans le schéma de classification des jours (figure 4). Ainsi, la confrontation sur 6 ans des données transférées depuis la station de Bourg-Saint-Maurice, avec le commentaire quotidien de l'observateur du poste d'Arèches, n'a montré que 0,2 % d'erreurs.

**FIGURE 6**  
**ORGANIGRAMME D' ACTIONS POUR ADAPTER LE MODÈLE**  
**DE W. LUDER À UN POSTE MÉTÉOROLOGIQUE FRANÇAIS**  
**ALPIN (d'après GRANGER, 1986)**



*jours disponibles*

## 2. Adaptation du modèle au végétal et aux interventions mécaniques

Les besoins en SDS indiqués par LUDER correspondent au potentiel climatique de séchage, avec des fanages fréquents (3 fois le jour de la coupe et 2 fois les autres jours). Lorsque les fanages sont moins fréquents, la vitesse de séchage est réduite et donc les besoins en SDS augmentent. Par ailleurs, LUDER a travaillé sur des prairies riches en graminées, alors que les besoins en SDS sont supérieurs pour des prairies riches en dicotylédones. Dans le pays de Thônes (Haute-Savoie), GRANGER (1986) a estimé les besoins en SDS de 7 situations différentes (tableau 1) ; il a alors exprimé

TABLEAU 1

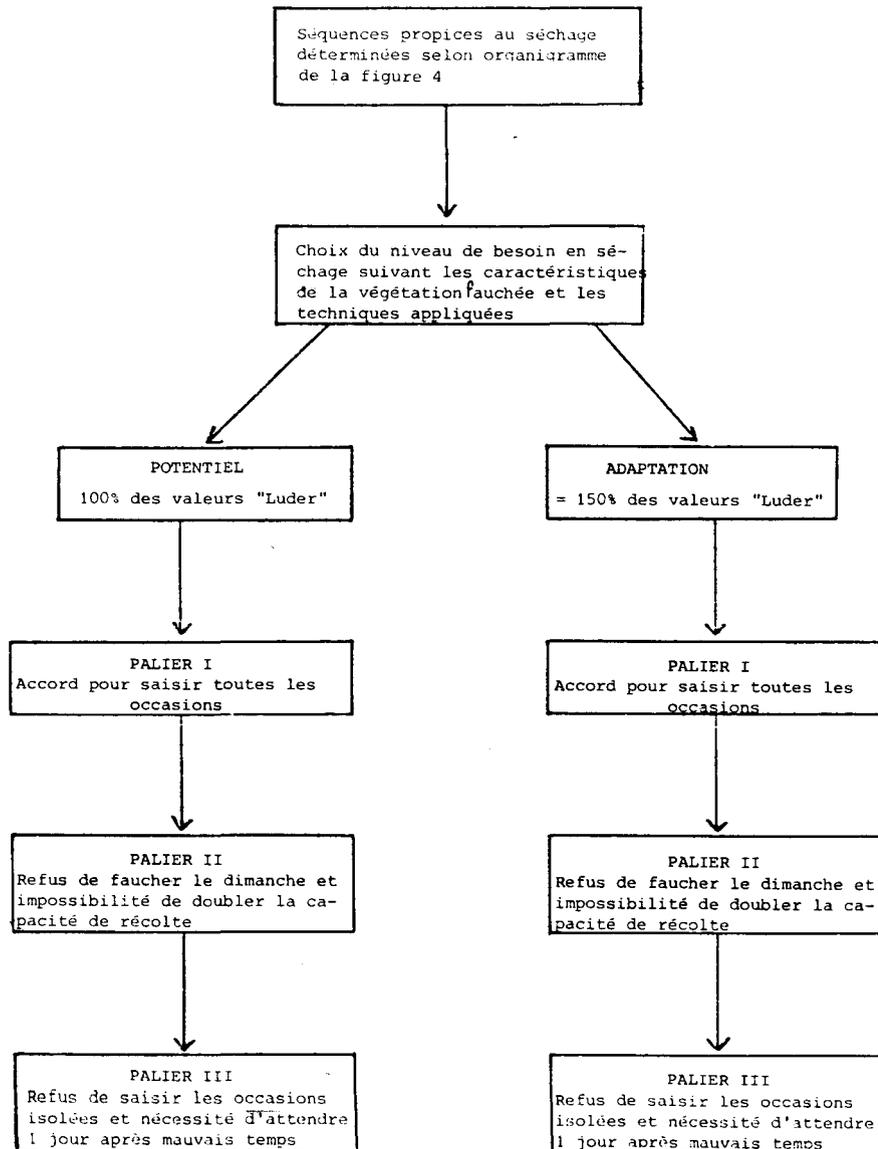
### BESOINS EN SÉCHAGE DE TROIS TYPES DE PRAIRIE, SELON LEUR STADE ET LES INTERVENTIONS MÉCANIQUES (GRANGER, 1986)

(Résultats issus des chantiers de récolte suivis dans le pays de Thônes en 1986, dans le cadre du Programme de Recherche entrepris par le groupe « Fourrages » du G.I.S. Alpes du Nord)

Stade Dactyle et rendement sec par ha	Type de prairie	Fanages		Besoin en séchage par rapport au potentiel (LUDER)	
		Durée écoulée entre la coupe et le 1er fanage (heures)	Nombre de fanages avant d'atteindre 60% MS	Séchage en grange	Séchage sol
Début épiaison 3 tonnes	Peu de dicotylédones autres que les légumineuses (0 à 30%) *	2	2	120%	110%
Fin épiaison 4, 7 tonnes		18	1	197%	171%
Floraison 4, 2 tonnes		5	1	110%	176%
Épiaison 3, 5 tonnes	De moyennement à beaucoup de dicotylédones autres que les légumineuses (20 à 90%)*	3,5	3	120%	120%
Floraison 3, 8 tonnes		8,5	3	165%	165%
Fructification 4, 5 tonnes		5	1	140%	157%
Fin fructification 4 tonnes		3,5	2	137%	128%

\* Dans la typologie des prairies de fauche des Alpes du Nord, la définition des types repose à la fois sur l'abondance des dicotylédones autres que les légumineuses, et sur leur nature botanique.

**FIGURE 7**  
**ALGORITHMÉ DE DÉPOUILLEMENT DES SÉQUENCES**  
**PROPICES AU SÉCHAGE (GRANGER, 1986)**



*Modélisation du séchage du foin et jours disponibles*

les besoins en % du potentiel indiqué par LUDER, pour les mêmes stades, rendements et altitude ; au vu de ces premiers travaux, il n'apparaît pas possible de séparer les effets du type de végétation de ceux de la fréquence de fanage.

En attendant de disposer de références chiffrées pour la région étudiée, GRANGER (1986) retient deux niveaux de besoin en séchage : le « *potentiel* » (100 % du besoin en SDS indiqué par LUDER) pour des prairies à base de graminées, fauchées à la faucheuse-conditionneuse ou fanées rapidement puis fréquemment ; et l'« *adaptation* » (150 % de la SDS de LUDER), pour des prairies plus riches en dicotylédones, fanées deux fois au plus dont la première fois 3 à 5 heures après la fauche.

### **3. Algorithme de dépouillement des séquences propices au séchage**

La nécessité de prendre en compte les facteurs ou contraintes de différents ordres se traduit dans l'algorithme de dépouillement des séquences propices au séchage proposé figure 7 ; celui-ci indique le niveau des besoins en séchage (potentiel et adaptation) et le taux d'utilisation des possibilités de récolte (caractérisation de trois « paliers », le palier étant le degré d'aptitude de l'exploitant à saisir les occasions de récolte). Il constitue à ce titre une tentative de prise en compte soit de contraintes imposées par le milieu physique (vitesse de ressuyage du sol), par le matériel (capacité de récolte) ou par l'environnement (délai d'attente), soit de choix décidés par l'agriculteur lui-même (travail le dimanche, prudence d'attitude). Cet algorithme ne prétend pas couvrir la totalité des situations rencontrées dans une petite région, mais tente plutôt de fournir un guide d'enchaînement possible dans le raisonnement pour dépouiller les séquences propices au séchage.

### **4. Notions de chance et de risque climatiques**

Pour prendre en compte la variabilité interannuelle, il est habituel en France (cf. travaux de REBOUL) de se fixer un seuil de fréquence de réalisation des travaux dans de bonnes conditions : au moins 8 années sur 10. LUDER réfute cette approche, estimant que les 2 années les plus défavorables que l'on écarte peuvent être déterminantes dans le choix du

système fourrager et de l'équipement. Il propose d'évaluer, pour chaque exploitation et pour chaque période de fenaison dans l'année, le taux de couverture du « besoin en occasions de récoltes » (défini comme le nombre de jours nécessaire pour faucher les surfaces en foin de l'exploitation) par l'« offre en occasions de récolte », c'est-à-dire les jours utilisables pour la fauche. Les besoins de l'exploitation en occasions de récolte résultent de la surface à faucher, de l'équipement et de la main-d'œuvre de l'exploitation, alors que l'offre en occasions de récolte résulte de la météorologie, des caractéristiques du végétal et des techniques appliquées.

LUDER appelle « chance climatique » la moyenne sur plusieurs années des taux de couverture (qui ne peuvent dépasser 100 %), et « risque climatique » son complément à 100. « Chance » et « risque » sont caractéristiques de chaque exploitation.

La mise en œuvre de cette notion intervient directement dans les principaux résultats obtenus dans les Alpes du Nord et donnés ci-après ; néanmoins, elle exprimera tout son intérêt, lors de la tentative de rapprochement entre les deux niveaux d'étude : approche bio-climatologique et parcellaire d'une part, approche « système » d'autre part (cf. 3<sup>e</sup> article à paraître).

Pour une étude régionale, on peut se libérer du caractère propre à chaque exploitation de ces notions, en définissant a priori un niveau de risque climatique acceptable et en calculant pour ce niveau de risque le nombre moyen d'occasions de récolte offertes par le climat ; cela permet de comparer :

- des périodes de l'année,
- des caractéristiques du végétal (rendement, stade, flore),
- des techniques : conditionnement ou non, séchage complet au sol ou séchage en grange...,
- des aptitudes de l'agriculteur à saisir les occasions de récolte.

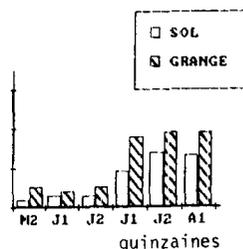
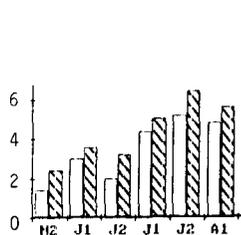
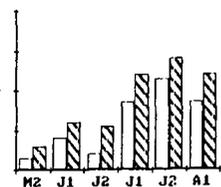
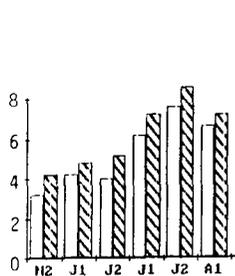
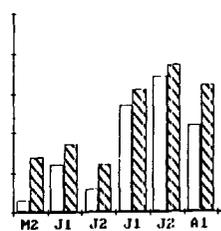
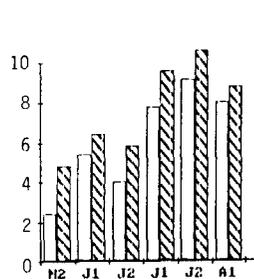
## 5. Principaux résultats

Dans le cas du poste météorologique d'Arèches en Haute-Savoie présenté sur la figure 8 (GRANGER, 1986), on peut constater pour le risque climatique de 20 % :

**FIGURE 8**  
**NOMBRE DE POSSIBILITÉS DE RÉCOLTE**  
**DE LA PREMIÈRE COUPE AU RISQUE DE 20 %**  
**POUR LE POSTE MÉTÉOROLOGIQUE D'ARÈCHES**  
 (de la deuxième quinzaine de mai à la première quinzaine d'août,  
 période 1962-1985) (GRANGER, 1986)

**POTENTIEL**  
 Prairie à base de graminées, fréquemment fanée, ou fauchée avec conditionneuse.

**ADAPTATION**  
 Prairie riche en dicotylédones, fanée une ou deux fois.



*Modélisation du séchage du foin et*

— l'augmentation du nombre de possibilités de récoltes depuis la 2<sup>e</sup> quinzaine de mai jusqu'à la 2<sup>e</sup> de juillet ; une période relativement moins favorable fin juin se retrouve ici comme dans d'autres travaux (LUDER, 1982 en Suisse ; MUNIER, 1986 à Mirecourt en Lorraine, etc.) ;

— la réduction du nombre d'occasions de récolte lorsque l'on passe du potentiel évalué par LUDER (prairie à base de graminées, fanée fréquemment ou conditionnée) à l'« adaptation » à la réalité agricole plus fréquente en Haute-Savoie (prairie riche en dicotylédones, fanée tardivement et non conditionnée) est de 30 à 35 % en juillet-août et de 55 à 60 % en mai-juin ;

— entre « paliers » définis précédemment, le fait de ne pas faucher le dimanche diminue autant le nombre de possibilités de récolte que le fait de ne pas saisir les occasions isolées, dans le cas du séchage en grange. Dans le cas du séchage au sol, c'est surtout le fait de ne pas saisir les occasions isolées qui entraîne une réduction importante du nombre de possibilités de récolte, cette réduction étant très marquée fin mai et fin juin ; à ces dates, les possibilités de récolte sont principalement constituées de courtes séquences isolées, ce qui nécessite une tactique de fauche adaptée, comme l'avaient déjà signalé CLAVEL et ORSINI (1984, 1985) pour l'avant-pays savoyard ;

— le séchage en grange permet de gagner environ une possibilité de récolte par quinzaine, tant à Arèches que dans l'avant-pays savoyard (CLAVEL et ORSINI, 1984), et 1,8 possibilité pour les 6 stations suisses étudiées par LUDER (1982) : cela permet à l'exploitant soit d'accroître la surface fauchée, soit de « sécuriser » sa récolte, en particulier dans une optique de fauche précoce.

De plus, le raccourcissement du temps de présence obligatoire du fourrage au sol doit sûrement permettre à l'agriculteur de saisir plus facilement les occasions isolées : la présence du séchoir s'accompagnerait donc d'une modification de la stratégie vis-à-vis du climat : c'est tout l'intérêt de la prise en compte des pratiques de fauche qui sera abordée, au moyen d'une typologie des systèmes d'exploitations, dans le troisième article.

Globalement, cette stratégie paraît être au moins aussi importante que la réalité climatique elle-même.

Ainsi, au vu de cet ensemble d'histogrammes, l'agriculteur peut choisir sa stratégie de fauche (niveau de palier), celle de fanage (fréquence) ainsi que son équipement (séchage en grange ou non) selon l'objectif de possibilités de récolte qu'il souhaite retenir, lui-même fonction de la surface totale à faucher et des capacités du matériel présent sur l'exploitation agricole.

## 6. Perspectives d'avenir

Le guide présenté ci-dessus pour adapter les travaux de LUDER (1982) illustre la volonté de prendre en compte les différents aspects d'une réalité locale (ici les Alpes du Nord françaises) en vue de rendre opérationnel un modèle mis au point dans d'autres conditions.

Il s'articule selon un cheminement comportant deux volets successifs :

— l'aménagement de la méthode de LUDER (1982), l'adaptant à la réalité des Alpes du Nord françaises, pour prendre en compte la relative pauvreté en données météorologiques et les spécificités végétales (présence de compositions floristiques diverses...),

— sa mise en œuvre, selon un algorithme de dépouillement des séquences propices, cherchant à caractériser à la fois la vitesse de séchage et l'aptitude à saisir les occasions de récolte, permettant alors de livrer des résultats sur le poste météorologique retenu (ici Arèches). Ces résultats montrent l'influence directe et fondamentale sur le nombre de possibilités de récolte, des facteurs maîtrisables par l'agriculteur (composition floristique, fréquence de fanage, présence éventuelle du séchage en grange, aptitude à saisir les occasions de récolte).

Ainsi s'est imposée à nous la nécessité d'une connaissance précise de la réalité de la fenaison, tant pour ses niveaux d'équipement que pour ses pratiques, pour une exploitation agricole donnée, cette dernière étant si possible située dans sa petite région d'appartenance, en vue d'assurer une couverture exhaustive de l'espace et des pratiques, autour du poste météorologique considéré.

Dans le troisième article, nous nous attacherons donc à resituer la fenaison dans les systèmes des exploitations agricoles d'une petite région, en vue de chiffrer le risque climatique avec lequel les foins sont réalisés, risque calculé sur une série chronologique donnée.

Y. GRANGER,  
*Lycée Agricole La Motte-Servolex (Savoie),*  
P. MORLON,  
*I.N.R.A., Systèmes Agraires et Développement,*  
*Dijon (Côte-d'Or),*  
E. MUNIER (1)

### **Remerciements**

Nous tenons à remercier tout particulièrement le Dr Werner LUDER qui nous a aimablement reçus à la Station de Recherche Fédérale de Tänikon (Suisse) et nous a aidés de ses conseils, ainsi que :

- les acteurs du Groupe de Recherches sur les Fourrages, au sein du G.I.S. « Alpes du Nord »,
- le Centre Météorologique de Chambéry,
- le personnel du domaine I.N.R.A. de Mirecourt,
- la Chaire d'Informatique et Statistique de l'E.N.S.S.A.A. de Dijon, pour l'accès à ses logiciels.

### *LISTE DE MOTS-CLÉS*

Foin, jours disponibles, modélisation, Savoie, séchage.

### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALOUIS R., CHOISNEL E., FOUQUES-DUPARC P., GERBIER N., PAYEN D., REMOIS P., (1980) : *Atlas agroclimatique saisonnier de la France* - Direction de la Météorologie, Paris, 153 p.
- BOSEN J.F. (1960) : « A formula for approximation of the saturation vapor pressure over water » ; *Monthly weather Review*, August, 1960.
- CLAVEL B., ORSINI J. (1984) : *Contribution à la prévision des potentialités fourragères en Savoie. Influence de la température sur la croissance et le développement de l'herbe au printemps. Détermination des jours favorables à la récolte précoce des foins*, mémoire de fins d'études sous la direction de DUPUY M., I.S.A.R.A. de Lyon - E.D.E. de Savoie, p. 73-96.
- CLAVEL B., ORSINI J. (1985) : « Recherche des jours favorables à la récolte des foins, les possibilités de fauche précoce », *Perspective agricole*, 89, p. 42-50.
- DYER J.A., BROWN D.M. (1977) : « A climatic simulator for field-drying hay », *Agricultural Meteorology*, 18, p. 37-48 - Amsterdam.
- FLEURY Ph., DORIOZ J.M., JEANNIN B. (1985) : « Influence du milieu physique et des pratiques agricoles sur la végétation des prairies de fauche des hautes vallées des Alpes du Nord. Une recherche en Beaufortain et sa portée régionale », *Études et Recherches S.A.D., I.N.R.A.*, 3, 52 p.
- FLEURY Ph., DORIOZ J.M., JEANNIN B. (1987) : « Typologie agronomique des prairies de fauche des Alpes du Nord », *Études et Recherches S.A.D., I.N.R.A.* (à paraître).
- GRANGER Y. (1986) : *La fenaison dans les Alpes du Nord humides. Conséquences du climat et des systèmes d'exploitation*, Mémoire E.N.S.S.A.A. Dijon/I.N.R.A.-S.A.D./S.U.A.C.I., sous la direction de B. JEANNIN, Chambéry, 59 p. + annexes.
- HAYHOE N.H., JACKSON L.P. (1974) : « Weather effects on hay drying rates », *Canadian Journal of Plant Science*, 54, p. 479-484.
- LUDER W. (1974) : « Influence des conditions climatiques et du peuplement sur le processus de séchage des fourrages », *F.A.T.*, Documentation de technique agricole, 75.
- LUDER W. (1977) : « Kapazitätsprobleme bei der Rauhfutterernte », *Bayer. Landw. Jahrbuch*, 54 (2), p. 48-55.
- LUDER W. (1982 a) : *Ermittlung der Erntegelegenheiten und des Verlustrisikos aufgrund von Klimadaten - Dargestellt am Beispiel der Rauhfutterernte*, Thèse E.T.H. ZÜRICH, 174 p.

- LUDER W. (1982 b) : « Probabilités et risques dus aux conditions atmosphériques », *Bulletin de la FAT*, Documentation de Techniques Agricoles, p. 117-124.
- LUDER W. (1983) : « Definition und Ermittlung des Wetterrisikos bei Feldarbeiten, dargestellt am Beispiel der Rauhfutterernte », *Bayerisches Landw. Jahrbuch*, 60 (5), p. 491-497.
- LUDER W. (1985) : *Possibilités de récolte et risques dus au mauvais temps*, Cours S.R.V.A., Jours disponibles - récolte et conservation de l'herbe. FAT.
- MUNIER E. (1986) : *Le séchage du foin au champ : adaptation en Lorraine de modèles météorologiques*, mémoire de fin d'études ENITA Dijon-Quetigny/I.N.R.A.-S.A.D. Dijon-Mirecourt, sous la direction de P. MORLON.
- MUNIER E., MORLON P. (1987) : « Le séchage du foin au champ. I : Les facteurs physiques du séchage du foin », *Fourrages* 109, pp. 53-74.
- REBOUL C., DESBROSSES B., MAAMOUN M. (1979) : *Météorologie et jours disponibles pour les travaux des champs*, I.N.R.A., série Economie et Sociologie Rurales.
- S.R.V.A. (SERVICE ROMAND DE VULGARISATION AGRICOLE) (1985) : *Les pertes de fourrage à la récolte et en cours de conservation*, 7 p.
- S.R.V.A. (SERVICE ROMAND DE VULGARISATION AGRICOLE) (1985) : « Le séchage en grange ou séchage du fourrage par ventilation », *Jours disponibles, récolte et conservation de l'herbe*, Document du cours de formation, 8-9 Mai 1985.
- SPATZ G., VAN EIMERN, J. LAWRYNOWICZ R. (1970) : « Der Trocknungsverlauf von Heu im Freiland », *Bayer. Landw. Jahrbuch*, 47. Jahrg, p. 446-464.
- THOMPSON N. (1981) : « Modelling the field drying of hay », *Journ. of agric. science*, Vol. 97, 2, p. 241-260.
- THOMPSON N. (1984) : *The effects of climate variability or change on existing production systems of crops such as hay, silage and cereals which rely heavily on field drying*, E.E.C., contract CLI-033-81 UK (H), Final Report, 89 pages.
- THOMPSON N., BARRIE I.A., HARVEY L.D.J. (1985) : « The climatic potential for field drying in north-west Europe », *Journ. of agric. science*, vol. 105 p. 167-181.
- TSCHANNEN W. (1982) : *Eine Methode zum Untersuchen des Trocknungsverhaltens von Futterpflanzen*, Station de Tänikon, Suisse, 34 p.
- VAN EIMERN J., SPATZ G. (1968) : « Das Problem der verfügbaren Tage für den Wiesenschnitt », *Bayer. Landw. Jahrbuch*, 45 : 350-363.