

LE SÉCHAGE DU FOIN AU CHAMP

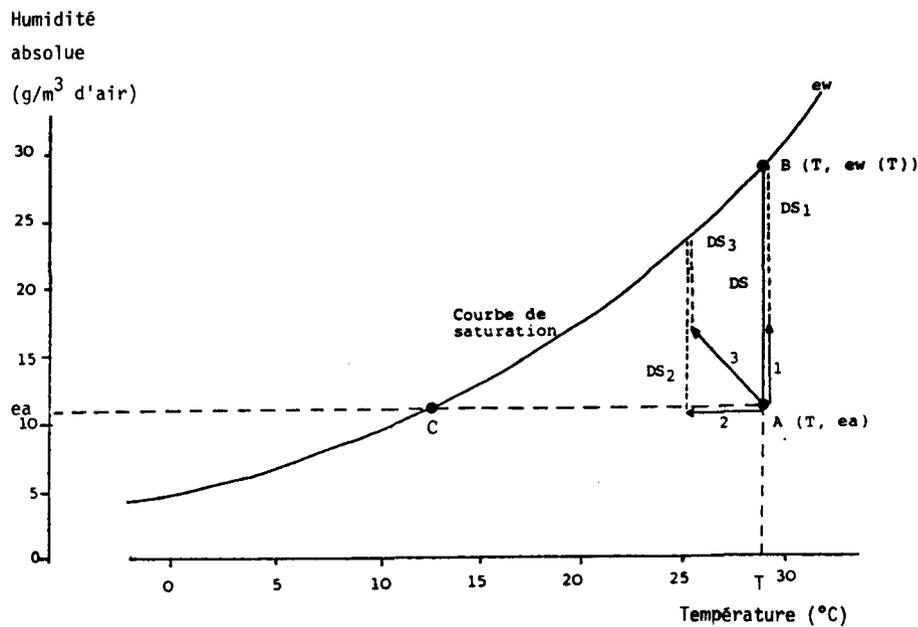
I. LES FACTEURS PHYSIQUES DU SÉCHAGE DU FOIN (étude bibliographique)

IL Y A QUINZE OU VINGT ANS, ON A PU PENSER QUE L'ENSILAGE REMPLACERAIT PRESQUE COMPLÈTEMENT LE FOIN, SAUF DANS LES RÉGIONS PRODUCTRICES DE fromages à pâte pressée cuite. Or, bien au-delà de ces régions, le foin reste un élément essentiel des systèmes fourragers de nombreuses exploitations. On constate en fait que la principale difficulté consiste à *sécher rapidement* un foin *coupé à la bonne date*, ce qui dépend de l'interaction entre l'équipement, l'organisation du travail sur l'exploitation et le climat.

Dans ce premier article nous passerons en revue les facteurs physiques de séchage du foin, pour présenter ensuite dans un deuxième article une méthode de modélisation du séchage et d'évaluation des jours disponibles pour la fauche.

De façon très générale (loi de Dalton), la vitesse d'évaporation d'une surface d'eau libre au contact de l'air est proportionnelle au *déficit de saturation de l'air*, DS, qui est la différence entre, d'une part, la pression de

FIGURE 1
DÉFICIT DE SATURATION DE L'AIR (DS) ET ÉVAPORATION



vapeur saturante $e_w(T)$ correspondant à la température à la surface de contact eau/air et, d'autre part, la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air au voisinage de cette surface, e_a :

$$DS = e_w(T) - e_a$$

L'évaporation accroît la quantité de vapeur d'eau dans l'air (figure 1, flèche 1) et absorbe de la chaleur, donc réduit la température (flèche 2). Le résultat (flèche 3) est qu'en milieu fermé on tend très vite vers la saturation, état d'équilibre où le déficit de saturation et par conséquent l'évaporation sont nuls.

Mais le séchage du foin est réalisé en milieu ouvert où un déficit de saturation continue à exister tant qu'il y a :

— évacuation de la vapeur par diffusion dans l'air et par convection naturelle (résultant de différences de température) ou forcée (vent ou ventilation) ;

— apport d'énergie par le rayonnement solaire ou le chauffage.

On voit ainsi que, *tout au long de la journée, l'existence de déficits de saturation est elle-même une conséquence des facteurs météorologiques.* Cependant, dans le cas de séchage du foin, les choses sont compliquées par le fait qu'on n'a pas une surface d'eau libre au contact de l'air, mais un très grand nombre de points d'évaporation au travers des membranes et des stomates du végétal, cette extrême division entraînant :

— d'une part, une modification des forces qui interviennent sur l'évaporation (existence de tensions superficielles) ;

— d'autre part, l'impossibilité pratique de mesurer le déficit de saturation dont la valeur diffère d'un point à l'autre.

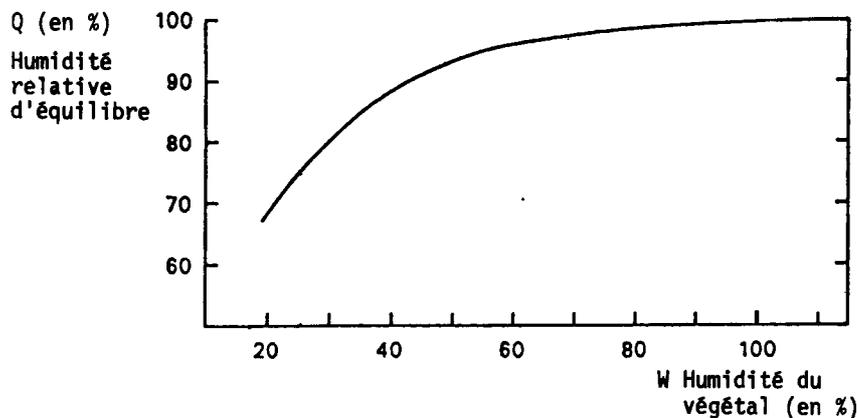
Cela nous oblige, dans une première étape, à passer en revue séparément tous les facteurs qui entrent en jeu dans le séchage du foin.

I - LES FACTEURS INFLUANT SUR LE POUVOIR ÉVAPORANT DE L'AIR ET LE SÉCHAGE DU FOIN

1. L'humidité de l'air

L'humidité de l'air est mesurée habituellement par l'humidité relative. D'après HENTGEN et JEANNIN, la dessiccation ne débute réellement que lorsque l'humidité relative de l'air descend au-dessous de 70 %. Mais ce seuil doit dépendre de la température car une même humidité relative correspond à des déficits de saturation de l'air d'autant plus forts que la température est plus élevée. THOMPSON (1984) introduit dans ses modèles la notion d'*humidité relative d'équilibre*, définie pour une humidité donnée du végétal comme la valeur de l'humidité relative de l'air au-dessus

FIGURE 2
RELATION ENTRE L'HUMIDITÉ RELATIVE D'ÉQUILIBRE
ET L'HUMIDITÉ DU VÉGÉTAL POUR LE RAY-GRASS ANGLAIS,
À 20 °C (THOMPSON, 1984)



N.B. : Nous avons reproduit ici l'original, bien que l'échelle des humidités nous semble décalée de 10 %.

de laquelle le matériel végétal absorbe de la vapeur d'eau. Au fur et à mesure du séchage, cette humidité relative diminue car le matériel végétal a de plus en plus tendance à absorber l'humidité de l'air (figure 2).

2. La température de l'air

Pour une même quantité de vapeur d'eau dans l'air, le déficit de saturation de l'air augmente de façon plus que proportionnelle avec la température (figure 1). La température de l'air, cependant, résulte indirectement du rayonnement solaire : le sol et les andains absorbent une grande partie des radiations solaires, et l'air s'échauffe à leur contact.

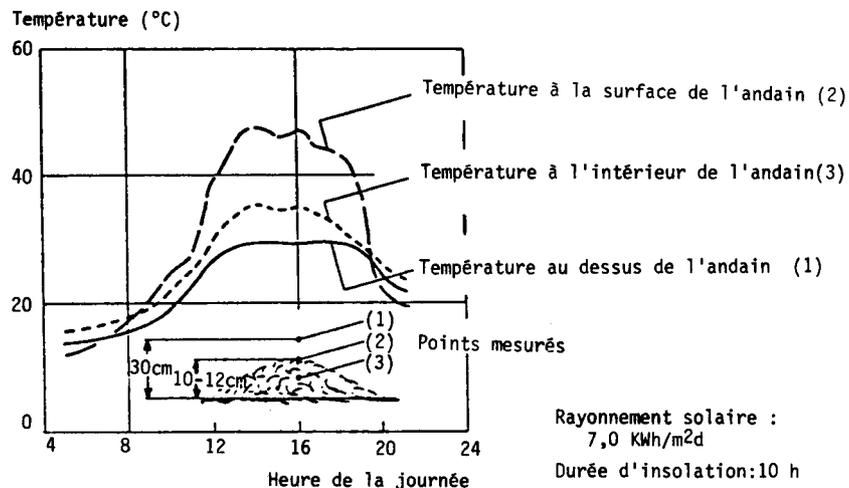
3. Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire fournit l'énergie nécessaire à l'évaporation ; il élève la température et accroît donc le déficit de saturation de l'air au

contact de l'andain ; il en accélère ainsi le séchage (THOMPSON, 1984, p. 6). Cependant, le rayonnement solaire n'a un effet maximum que sur les couches superficielles de l'andain. JONES et HARRIS considèrent qu'en début de dessiccation l'andain absorbe 80 % du rayonnement incident, mais 2 cm au-dessous de la surface, la quantité absorbée n'est plus que la moitié de celle absorbée en surface ; à la base de l'andain, la proportion n'excède pas 10 %. L'énergie disponible pour l'évaporation dans les couches inférieures de l'andain est donc très faible, et d'autant plus que la quantité de foin est plus importante : cela justifie en pratique le retournement fréquent du fourrage en cours de séchage. Le résultat en est illustré par la différence de température entre la surface et l'intérieur de l'andain (figure 3).

Cependant, l'effet du rayonnement solaire est en interaction avec celui du vent.

FIGURE 3
INFLUENCE DU RAYONNEMENT SOLAIRE AU-DESSUS
ET À L'INTÉRIEUR DE L'ANDAIN (DERNEDDE, 1979)



N.B. : Les températures à différents niveaux résultent en fait de l'interaction entre plusieurs phénomènes.

4. Le vent

Selon THOMPSON (1984, p. 6), « le vent accroît la turbulence de l'air au-dessus de l'andain et permet ainsi à la vapeur d'eau de s'échapper plus rapidement de son voisinage ». Il maintient donc un déficit de saturation élevé grâce à un renouvellement constant de l'air au contact des tissus. Mais cette turbulence contribue aussi à évacuer de la chaleur de l'andain et réduit donc l'effet de l'élévation de température produit par le rayonnement solaire. Au total, THOMPSON conclut que l'effet combiné du vent et du rayonnement solaire sur le séchage varie en fonction du stade de siccité atteint : le vent peut avoir un effet bénéfique juste après la coupe ou lorsque le foin vient d'être réhumecté par la pluie. Dans les autres cas, il a généralement une influence négative. Nous pensons que ceci doit être à nuancer en fonction de l'humidité de l'air apporté par le vent, qui est probablement plus élevée en climat océanique anglais où a travaillé THOMPSON qu'en climat semi-continentale comme celui de l'Est de la France.

D'après LUDER (1982), l'effet du vent est lié à l'altitude ; en montagne, le rayonnement très intense produit une telle élévation de la température de la surface du sol et de l'andain qu'il s'ensuit des mouvements d'air convectifs qui assurent un renouvellement de l'air comme le ferait le vent. En plaine, en revanche, seul le vent assure l'évacuation rapide de l'air humide et, de ce fait, dans certains cas, il peut avoir une influence déterminante dans le séchage. CLANET (1980) note en effet que le vent peut devenir le facteur prépondérant pour le séchage à condition d'être en présence d'andains bien formés, permettant une bonne circulation de l'air au travers, et lorsque l'humidité relative de l'air n'est pas trop élevée.

Le centre de l'andain reste généralement très « calme », même un jour venteux. La vitesse moyenne de l'air au centre de l'andain excède rarement 0,2 m/s (JONES et HARRIS). Il faut noter qu'à ce niveau, à environ 10 cm du sol, la vitesse du vent n'est que le dixième de celle à 2 m du sol. Cependant, en intercalant un pare-vent à proximité de l'andain, JONES et HARRIS ont provoqué un accroissement immédiat de plus de 15 % de l'humidité relative de l'air dans l'andain. Les grandes fluctuations de vitesse instantanée du vent (de 0 à 4 fois sa vitesse moyenne) doivent donc jouer un rôle important dans le maintien du gradient d'humidité.

Par ailleurs, les apports éventuels d'énergie (chaleur) à l'andain par des vents chauds restent négligeables étant donnée la faible vitesse du flux d'air dans l'andain (JONES et HARRIS).

Les facteurs climatiques énumérés déterminent une *évaporation potentielle*. La *dessiccation réelle* (quantité et vitesse) dépend aussi très largement des forces de rétention d'eau dans le matériel à sécher et des résistances aux flux de vapeur d'eau dans l'andain. En effet, comme le note THOMPSON (1984, p. 5) une bonne récolte de foin contient environ 5 t de M.S./ha (Matière Sèche) et doit perdre à peu près 20 t/ha d'eau pour pouvoir être rentrée, ce qui demande en pratique 3 à 5 jours de beau temps alors que la même récolte, sur pied, peut transpirer facilement le double en une belle journée d'été. Il se développe donc manifestement des résistances à l'évaporation après la fauche.

II - LES RÉSISTANCES À LA DESSICCATION DU FOIN

Comme le précisent JONES et HARRIS, les résistances sont de deux types pendant le séchage :

- celles qui limitent les mouvements de vapeur d'eau des tissus de la plante vers l'air dans l'andain : il s'agit de *résistances propres à la plante* ;
- celles qui affectent les mouvements gazeux de l'andain vers l'extérieur : *les résistances propres à l'andain*.

1. Les résistances de la plante à la perte d'eau après la fauche

a) La rétention de l'eau par le végétal

D'après DELORME, les liaisons de l'eau dans la plante sont de trois natures :

- *les forces osmotiques* dues aux interactions entre l'eau et les solutés ; elles s'élèvent habituellement à quelques bars et sont responsables de l'entrée de l'eau dans la cellule ;

— *les forces d'imbibition* qui résultent d'attractions électrostatiques entre l'eau et les macromolécules ; les énergies de liaison sont assez fortes (plusieurs bars ou dizaines de bars) ;

— *les forces capillaires*, secondaires.

On trouve aussi de l'eau de constitution fixée par des forces d'hygroscopicité extrêmement énergiques.

b) La fermeture des stomates

HARRIS et TULLBERG, cités par SAVOIE et al., décrivent les différentes voies par lesquelles l'eau s'évapore du fourrage. Dans un premier temps, la perte d'eau, très rapide, se fait à travers les stomates ouverts. D'après JONES et HARRIS, le rythme d'évaporation initial est celui de l'évapotranspiration, comme dans la plante non coupée. A ce rythme, comme nous l'avons déjà dit, le foin sécherait en moins d'une demi-journée. Mais la fermeture des stomates survient très rapidement lorsque le foin atteint 70 à 75 % d'humidité (HARRIS et TULLBERG) et on peut la considérer comme totale, pour la plupart des espèces, avant que le tiers de l'eau initiale ne soit perdue (HALL et JONES ; CLARK et al., cités par JONES et HARRIS).

Après la fermeture des stomates, la vapeur d'eau doit traverser l'épiderme et sa cuticule cireuse qui constituent une véritable barrière à franchir. La résistance à la diffusion de la vapeur d'eau s'en trouve considérablement accrue ; elle devient au moins 10 fois plus grande que lorsque les stomates sont ouverts (MEIDNER et SHERIFF, cités par JONES et HARRIS), et cette résistance est d'autant plus grande que l'épiderme est resté intact (GATES, cité par THOMPSON, 1984, p. 5). Car en pratique, on tend de plus en plus vers des traitements mécaniques (conditionnement), voire chimiques (encore du domaine de l'étude), qui ont pour but d'altérer la cuticule cireuse afin de limiter la résistance à la perte d'eau et donc de hâter la dessiccation. (Nous n'avons rien trouvé dans la bibliographie étudiée sur les flux d'eau à travers les extrémités coupées).

c) *Effet de certaines caractéristiques du fourrage*

* *La teneur en eau atteinte par le fourrage*

Un certain nombre d'expériences ont montré que la résistance physiologique à la perte d'eau augmente au fur et à mesure que la teneur en eau de la plante décline (BRUCK et ELDEREN, CLARK et Mac DONALD, SPARKS... cités par THOMPSON, 1984). Ceci est d'abord lié à la fermeture des stomates puis à l'hygroscopicité croissante du matériel végétal au cours de la dessiccation (THOMPSON, 1984, p. 5).

* *La composition floristique*

LUDER (1974) note dans un essai que la prairie temporaire (dactyle + ray-grass anglais) accuse un retard par rapport à la prairie naturelle (essentiellement pâturin). WILMAN et OWEN montrent que, dans une association prairiale, malgré une humidité initiale supérieure à celle des graminées, le trèfle blanc sèche plus vite que celles-ci. Cependant, en général, les légumineuses et les dicotylédones demandent plus de temps que les graminées (tableau ci-dessous) en raison de leur teneur initiale en eau supérieure et, à l'exception du trèfle blanc, de leur plus grande proportion de tiges (JONES et HARRIS). Ces auteurs ont trouvé aussi des différences manifestes entre graminées : la fétuque élevée sèche quatre fois plus vite que le ray-grass anglais. Cela est sans doute lié à la morphologie de la plante : CLANET (1980) constate que les gaines des feuilles de la fétuque élevée collent moins à la tige que celles du ray-grass anglais.

*Pour 3 espèces pures, mises à sécher en étuve,
rapport des besoins en « sommes de déficits de saturation »
(assimilables à des E.T.P. cumulées ; TSCHANNEN, 1982)*

| Espèces comparées | Séchage | |
|-------------------|---------|-----------|
| | au sol | en grange |
| Pissenlit/Dactyle | 3,0 | 3,4 |
| Renoncule/Dactyle | 1,5 | 1,7 |

du séchage du foin

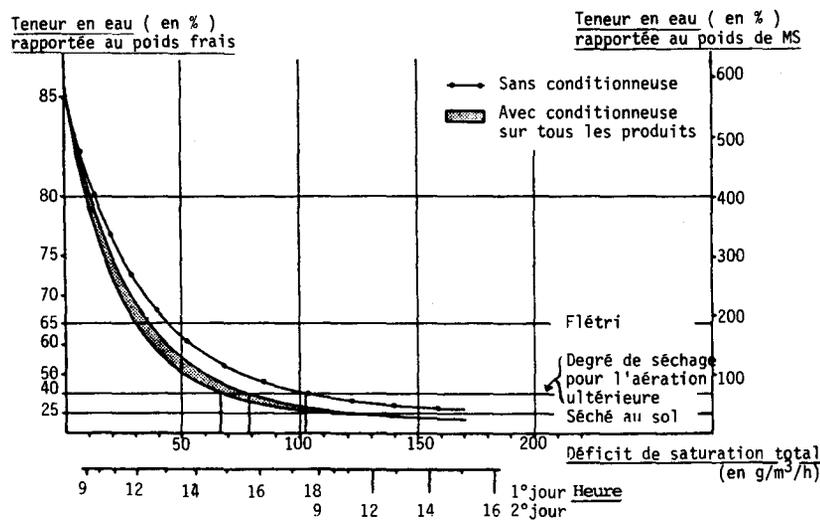
A quantités égales, la vitesse de séchage n'est pas la même pour différentes espèces prairiales (HENTGEN et JEANNIN) ; un fourrage constitué essentiellement par des graminées à feuillage dense et fin est plus difficile à sécher que celui fourni par une graminée à grand développement. WILMAN et OWEN, cités par BAKKER-ARKEMA, remarquent aussi que les variétés et les espèces ont des vitesses de séchage variables, qui résulteraient des différences d'épaisseur de la cuticule et de proportion tiges/feuilles de la plante. JONES et HARRIS mentionnent que les raisons de ces différences n'ont pas été étudiées mais que des facteurs comme la répartition des stomates peuvent être importants.

Cette influence de la composition floristique sur la vitesse de séchage est difficilement modélisable a priori et posera donc des problèmes de précision ou d'extrapolation d'un modèle établi sur une prairie déterminée.

* *La proportion tiges/feuilles*

La proportion tiges/feuilles a été signalée par VAN EIMERN et SPATZ comme un facteur influençant la durée du séchage, les tiges séchant moins vite que les feuilles. « Les feuilles se dessèchent en général deux fois plus vite que les tiges. (...) Le conditionnement qui touche plus les tiges que les feuilles atténue cette différence de comportement sans l'éviter complètement » (CLANET, 1980). Il permet ainsi un gain moyen de 30 % du besoin de séchage (figure 4). Mais des transferts d'eau se produisent entre les tiges et les feuilles, qui, en jouant le rôle de « mèches », participent au séchage des tiges (THOMPSON, 1984, p. 8). Des expériences réalisées par JONES et HARRIS, utilisant des talles en couches minces sous des conditions contrôlées, ont montré que les limbes foliaires ont séché en moins d'un cinquième du temps demandé par les tiges. Ces limbes contribuèrent aussi à la perte d'eau des tiges mais devinrent moins efficaces comme voie de sortie de l'eau, au fur et à mesure qu'ils séchaient, si bien que les tiges contenaient encore au moins un tiers de leur eau initiale alors que les limbes des feuilles associées étaient déjà secs. Par conséquent, la vitesse de séchage d'une talle d'herbe est très dépendante de la proportion tiges/feuilles : chez la plupart des graminées, les talles végétatives qui ont 80 % de feuilles sèchent en moins d'un tiers du temps nécessaire aux talles reproductives à l'épiaison (40 % de feuilles) (JONES et HARRIS).

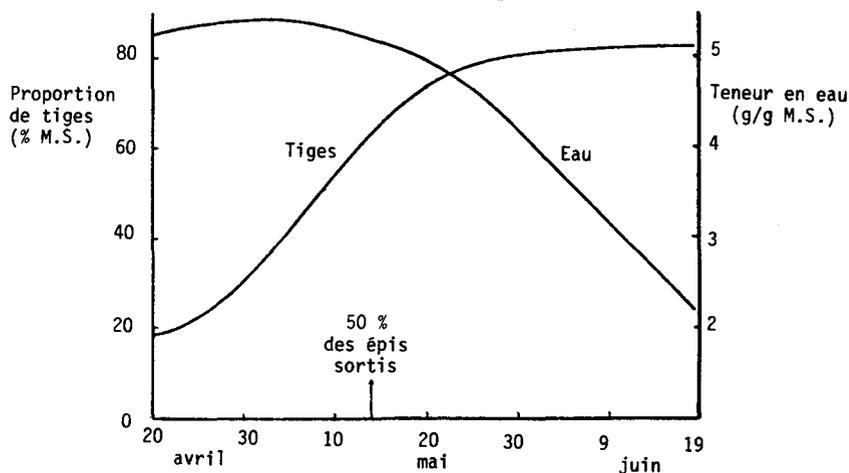
FIGURE 4
COURBES DE DESSICATION OBTENUES AVEC
ET SANS CONDITIONNEMENT (H.E. FAT, 1981, cité par S.R.V.A.)



** Le stade de développement*

Au cours de son développement, la plante est d'abord riche en feuilles et en eau, mais les tiges des graminées restent courtes et les gaines des feuilles successives restent enroulées ou pliées l'une dans l'autre, formant une pseudo-tige ; seuls les limbes sont exposés à l'air. Lors du développement reproducteur, la teneur en matière sèche et la proportion de tiges augmentent ; au début, les tiges en croissance sont recouvertes par les gaines et la résistance au séchage est forte ; ensuite, les tiges (et les épis après l'épiaison) sont nues et exposées à l'air au-dessus de la dernière feuille (HARRIS et al., cités par JONES et HARRIS ; CLANET, 1980). Les effets compensés des variations de teneur en matière sèche, de proportion tiges/feuilles (figure 5) et d'exposition des tiges, font que le temps de séchage d'une végétation à maturité est similaire, voire inférieure, à celui

FIGURE 5
ÉVOLUTION DE LA TENEUR EN EAU ET DE LA PROPORTION DE TIGES AU COURS DU TEMPS
POUR LE RAY-GRASS ANGLAIS (JONES et HARRIS, 1979)



d'une coupe feuillue (JONES et HARRIS). Selon CLANET (1982), le temps nécessaire pour sécher du ray-grass anglais *en clayettes* passe de 40 heures au stade feuillu à 60 heures en début épiaison, mais se réduit à 20 heures à la floraison. Cependant, en moyenne sous nos climats, les humidités de l'air et du sol sont d'autant plus élevées que la coupe est précoce.

Le stade de développement à la coupe influe aussi sur la structure de l'andain ; son influence peut, par ailleurs, être masquée par l'augmentation de la quantité à sécher.

2. Les résistances de l'andain à la perte d'eau

* *Le microclimat à l'intérieur de l'andain*

Le microclimat à l'intérieur de l'andain constitue souvent un frein à la perte d'eau. L'humidité de l'air à l'intérieur de l'andain dépend de trois

Facteurs physiques

facteurs : l'humidité de l'air ambiant, la teneur en eau de la récolte et le flux d'air à travers l'andain.

Ainsi, au début de la dessiccation, la forte teneur en eau de la récolte et la faible ventilation de l'andain du fait de sa mauvaise structure (le matériel végétal a tendance à se tasser), conduisent à des valeurs de l'humidité de l'air au centre et à la base de l'andain qui tombent rarement au-dessous de 80 % pendant la journée, d'où la nécessité de retourner fréquemment l'andain (car seule sa surface sèche).

Ensuite, au fur et à mesure que le végétal se dessèche, la section de chaque organe diminue et sa rigidité augmente parallèlement. Ceci confère une meilleure structure à l'andain qui devient ainsi plus perméable à l'air et laisse pénétrer le rayonnement solaire plus profondément avec trois conséquences :

- un accroissement de la fourniture de chaleur dans l'andain (donc une élévation de sa température interne),
- une accélération des échanges gazeux autour de chaque organe,
- une diminution de l'humidité dans l'andain.

Ainsi, à la fin du séchage, l'humidité de l'air dans l'andain n'est supérieure à celle de l'air ambiant que de quelques points, sauf en conditions calmes (JONES et HARRIS).

En somme, tandis que les résistances de la plante deviennent de plus en plus importantes dans les derniers stades de dessiccation, celles de l'andain sont au contraire maximales dans les premières phases de séchage, en raison d'un microclimat défavorable à l'évaporation résultant lui-même d'une mauvaise structure de l'andain.

* *La forme de l'andain*

Tant que la quantité d'eau à évaporer du végétal est grande (jusqu'à 70 % d'humidité), et ce d'autant plus que le fourrage est immature, l'état de saturation est très vite atteint à l'intérieur de l'andain. L'herbe sèche alors plus facilement en couche mince, étalée sur toute la surface de sol disponible, qu'en « boudins » étroits et épais, car d'une part la pénétration

et l'interception du rayonnement solaire (CLOTHIER et TAYLOR, cités par THOMPSON, 1984, p. 11) et d'autre part la surface d'évacuation de la vapeur d'eau se trouvent maximisées (WILMAN et OWEN, SAVOIE et al.) ; d'où l'intérêt, en pratique, de répandre l'herbe le plus largement possible, immédiatement après la coupe, et de faner fréquemment durant les heures suivantes, pour limiter l'effet de « self-mulching » de la partie supérieure du fourrage, qui ralentit la dessiccation.

En revanche, dans les derniers stades de dessiccation ou pour des fourrages plus mûrs, la vitesse de séchage est supérieure en andains hauts et étroits, car, en couche mince, le foin reprend plus facilement de l'humidité provenant du sol (directement ou par les chaumes), de la pluie et de la rosée. Ainsi, le fourrage devrait être concentré en « boudins » à partir de 40 % d'humidité, surtout pour de faibles rendements, plutôt que d'être laissé éparpillé jusqu'au moment du bottelage (WILMAN et OWEN).

Selon THOMPSON (1984), l'influence de l'épaisseur de l'andain reste discutée et dépend avant tout de l'humidité au sol (cf. § III-3 ci-dessous).

En résumé, l'idéal serait d'étaler le foin pour la journée et de le resserrer pour la nuit :

— quand la sortie d'eau de l'andain est dominante, il y a intérêt à maximiser la surface d'évaporation et donc à étaler la récolte ;

— en revanche, en cas de risque de réhumidification, il peut être avantageux de resserrer les andains.

Le rendement influe indirectement sur la vitesse de séchage car, en augmentant l'épaisseur de l'andain, on isole les couches inférieures (HART et BURTON).

La géométrie des brins d'herbe dans l'andain est importante car elle détermine la nature de la surface de l'andain et, en particulier, ses caractéristiques aérodynamiques : plus la surface évaporante est rugueuse (plus l'andain a un aspect ébouriffé), plus la couche limite autour de l'andain est épaisse, mais plus la surface d'échange développée est grande et, globalement, PERRIER montre que le coefficient d'échange est d'autant plus élevé que l'on a une surface à plus forte rugosité et une plus grande vitesse du vent.

La structure interne de l'andain est parfois le facteur limitant dans la vitesse de séchage (SAVOIE et al.) car les échanges entre atmosphère et andain ne sont pas assez rapides. Cette structure est déterminée, d'une part, par les caractéristiques mécaniques de la végétation qui dépendent elles-mêmes des facteurs précédemment décrits (§ II-1. c) et, d'autre part, par les techniques appliquées par l'agriculteur : conditionnement, fanages...

Dans tous les cas, un fourrage riche en tiges fournit une meilleure structure pour l'aération et l'évaporation qu'une récolte feuillue : la résistance au tassement y est meilleure, surtout dans les couches inférieures de l'andain (WILMAN et OWEN, SAVOIE et al.) ; ainsi, plus le développement du fourrage est avancé, meilleur est l'ébouriffement de l'andain (HENTGEN et JEANNIN).

De nombreux auteurs pensent que le conditionnement joue davantage en confectionnant un andain bien aéré qu'en facilitant la sortie d'eau de la plante.

D'après JONES et HARRIS, le fanage a deux effets : il ramène en surface le matériel humide et rend l'andain plus volumineux. C'est pourquoi le fanage fréquent est le plus efficace quand la teneur en eau de l'andain se situe entre 50 et 65 % d'humidité car, pendant cette période où le matériel sèche très rapidement en surface, chaque bouleversement de l'andain crée un arrangement plus favorable pour le séchage. En-dessous de 50 % d'humidité, l'andain entre dans une phase où les fanages peuvent être plus espacés car la vitesse de séchage est gouvernée davantage par la très grande résistance de la plante que par celle de l'andain.

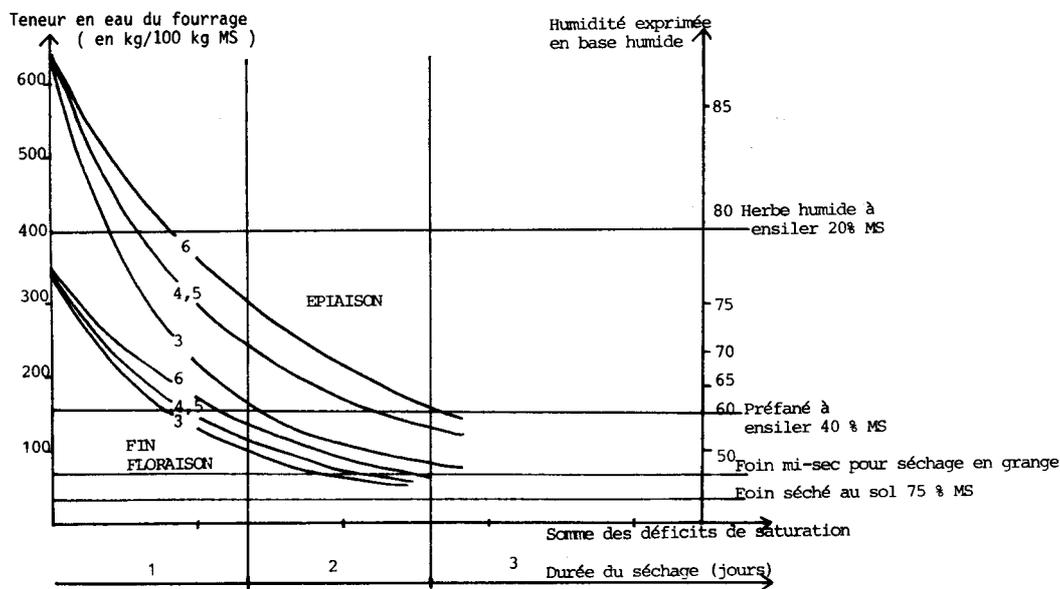
III - LA QUANTITÉ D'EAU À ÉVAPORER

Elle est égale à la quantité initiale d'eau dans le végétal, augmentée de celle apportée par la pluie et la rosée et de l'humidité fournie par le sol.

1. La quantité initiale d'eau dans le végétal

Cette quantité est le produit du rendement par la teneur en eau de l'herbe ; c'est pourquoi le rendement exerce une influence importante sur

FIGURE 6
PROCESSUS DE SÉCHAGE DU FOURRAGE
SELON LE STADE ET LE RENDEMENT
 (première coupe, fauche avec barre de coupe, fanage avec faneuse
 à toupies ; prairie à 70-75 % de graminées ; les nombres sur les courbes
 indiquent le rendement en t M.S./ha ; LUDER, 1982)



la durée de dessiccation, surtout pour les fourrages jeunes (LUDER, 1974) dont la teneur initiale en eau est élevée. En revanche, l'effet du rendement s'atténue pour des foins récoltés après la floraison, en raison de l'humidité initiale plus faible et par suite d'une meilleure aération de l'andain (figure 6). A partir de l'épiaison, la quantité d'eau contenue dans le végétal diminue dans la mesure où l'accroissement du rendement en matière sèche ne compense pas l'abaissement de la teneur en eau (DURU). Dans les expériences de HENTGEN et JEANNIN, l'accroissement de 1 t M.S. du

rendement d'une prairie à végétation fine et dense entraînait un retard de plus de 20 points d'humidité après 24 heures de séchage.

C'est en ces termes que s'explique l'effet « négatif », bien connu dans la pratique, de la fertilisation azotée (BECKHOFF, cité par THOMPSON, 1984) : en effet, elle entraîne à la fois une augmentation de rendement et une diminution de la teneur en matière sèche de la récolte (DEMARQUILLY) liée à une modification du rapport tiges/feuilles.

2. La fourniture d'eau par la pluie et la rosée

Cette fourniture d'eau retarde d'autant plus la dessiccation qu'elle est absorbée par le végétal. Si la période humide se prolonge, le foin peut absorber une quantité d'eau considérable, d'autant plus importante qu'il a atteint un stade de dessiccation avancé et qu'il a été conditionné.

DYER et BROWN, estiment qu'un foin peut reprendre jusqu'à 10 % d'humidité suite à une rosée et peut réatteindre une humidité de 90 % en période pluvieuse. Cependant, d'après THOMPSON (1984), l'évaporation de cette eau réabsorbée est ensuite plus rapide que celle de l'eau initiale ; c'est ce que nous avons également observé (MUNIER, p. 35). L'eau serait réabsorbée avec des forces de rétention moindres en raison de modifications irréversibles provoquées lors de la dessiccation. WILMAN et OWEN notent que l'effet de réhumectation par la pluie et la rosée sur une récolte partiellement sèche est lié à la nature du végétal : il est supérieur pour des coupes précoces, fourrages ayant une grosse proportion de feuilles.

3. L'incidence de l'humidité du sol sur le séchage du foin

Dans ses modèles, THOMPSON (1981) intègre l'humidité du sol, car l'évaporation de l'eau du sol, directement ou par l'intermédiaire des chaumes, réduit la vitesse de séchage du foin en élevant la tension de vapeur d'eau à la fois à l'intérieur et à l'extérieur de l'andain. Dans les derniers stades de dessiccation, on a mesuré des flux d'évaporation du sol plusieurs fois supérieurs à ceux de l'andain, limitant de toute évidence le séchage de celui-ci (CLOTHIER, 1978 cité par THOMPSON, 1984, p. 11). D'après ce dernier, « on ne sait pas bien si la modification de l'architecture de l'andain peut réduire l'influence de l'évaporation du sol et des chaumes.

Une couche dense, étalée pour couvrir le sol presque complètement réduirait quelque peu l'évaporation de ce qui est en-dessous de l'andain, mais avec la pénalité d'une plus grande partie du fourrage au contact à la base de l'andain avec de l'air à forte humidité. Un andain plus resserré intercepterait cependant moins de rayonnement par unité de masse ».

D'après JONES et HARRIS, le fait de regrouper deux andains (ou plus) pendant les derniers stades de séchage permet à la surface de sol non couverte de sécher, ce qui peut présenter un avantage pour le stade final de la dessiccation lorsque l'andain est redéplacé sur cette partie du sol.

KLINNER (cité par THOMPSON, 1984, p. 11) met l'accent sur l'importance de la longueur des chaumes qui supportent l'andain au-dessus du sol, de sorte que l'air puisse circuler dessous. Ceci, d'une part, permet d'évacuer l'eau du sol sans qu'elle traverse l'andain sous forme de vapeur, donc limite la réhumidification éventuelle du foin par l'eau du sol et, d'autre part, augmente la surface d'évaporation de l'andain.

CONCLUSION

Les *facteurs météorologiques* qui commandent le séchage du foin sont exactement les mêmes que pour l'évapotranspiration d'un couvert végétal :

- l'énergie : rayonnement solaire et température,
- les échanges gazeux : le vent, la stabilité de l'air, les caractéristiques aérodynamiques de la surface évaporante.

Les différences viennent de l'objectif visé, et des conditions pour atteindre cet objectif : pour qu'un couvert végétal en place produise un maximum de produit récoltable, il faut éviter qu'il souffre de manque d'eau, donc assurer en permanence son alimentation en eau et, le cas échéant, réduire l'évapotranspiration potentielle (coupe-vent, voire ombrage...). A l'opposé, dans le cas du foin, l'objectif est le séchage le plus *rapide et complet* possible afin de conserver au maximum sa qualité alimentaire au fourrage. Or, d'une part, les stomates se ferment très rapidement après la coupe, ce qui accroît la résistance propre du végétal à la dessiccation

et, d'autre part, la structure géométrique d'un foin coupé — déterminée en partie par les opérations techniques réalisées par l'agriculteur — n'est pas la même que celle du couvert végétal avant la coupe. Le séchage du foin demande donc, à partir des mêmes facteurs météorologiques, une approche spécifique.

Le climat, l'humidité du sol, la maturité de la plante, l'espèce, les outils de fauche, la conduite du séchage ont tous une influence sur la vitesse de séchage de l'herbe et les agriculteurs peuvent, dans une certaine mesure, modifier tel ou tel de ces facteurs. La modification du climat peut être obtenue soit par une artificialisation de ce climat (séchage en grange), soit par le choix des dates de fauche. Mais l'effet *combiné* de ces différents facteurs reste mal connu, et surtout les décisions de l'agriculteur reposent :

— d'une part, en ce qui concerne les grandes caractéristiques du système fourrager, dont la chaîne de récolte, sur des appréciations fréquentielles ou « moyennes » du climat ;

— d'autre part, en ce qui concerne les opérations de récolte, sur l'appréciation par l'agriculteur des risques encourus.

Cela a conduit à modéliser le séchage du foin pour évaluer les « jours disponibles pour la fauche », ce qui sera l'objet de notre prochain article.

E. MUNIER,

Travail de fin d'étude, ENITA de Dijon - Quétigny (Côte-d'Or) ;

P. MORLON,

I.N.R.A., Systèmes Agraires et Développement, Dijon (Côte-d'Or).

LISTE DE MOTS-CLÉS

du séchage du foin

Evaporation de l'eau, facteurs physiques, foin, modèle physique, séchage.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BAKKER-ARKEMA F.W. (1984) : « Selected aspects of crop processing and storage : a review », *Journ. of Agric. Engin. Res.*, vol. 30, n° 1, p. 1-22.
- BECKHOFF J. (1975) : « The effect of the yield on green fodder drying », *Proc. 6th Gen. Meeting of Europ. Grassld. Fed.*, Madrid, 1975, p. 325-328.
- BROCHET P., GERBIER N. (1975) : *L'évapotranspiration (aspect agrométéorologique, évaluation pratique de l'évapotranspiration potentielle)*, monographie n° 65, Météorologie Nationale, Paris, 95 pages.
- BRUCK I.G.M., VAN ELDEREN E. (1969) : « Field drying of hay and wheat », *Journ. of Agric. Engin. Res.*, n° 14, p. 105-116.
- CABON G. (1986) : Accélérer la dessiccation du fourrage, communication faite au *Grenier de Theix*, (sous presse).
- CLANET V. (1980) : « Vitesse de séchage du fourrage et pertes au champ », *L'élevage bovin*, n° 93, p. 18-21.
- CLANET V. (1981) : « Pour réussir le séchage du fourrage au sol, savoir utiliser les données météo », *Fourrages Actualités*, p. 107.
- CLARK B.J., Mc DONALD P. (1977) : « The drying pattern of grass swaths in the field », *Journ. of Brit. Grassld. Soc.*, 32, p. 77-82.
- CLOTHIER B.E. (1978) : « The drying of hay and wilted silage in the field », *Proc. Agro. Soc. of New Zealand*, 8, p. 63-67.
- CLOTHIER B.E., TAYLOR A.O. (1980) : « Cutting and post cutting treatment effects on drying pasture hay », *New Zealand Journ. of Exper. Agric.*, 8, p. 41-44.
- DELORME R. (1983) : *L'eau et le végétal*, Cours de biologie végétale - ENITA 1^{re} année, p. 1-16.
- DEMARQUILLY C. (1977) : « Fertilisation et qualité du fourrage », *Fourrages*, 69, p. 61-84.
- DERNEDDE W. (1979) : « Treatments to increase the drying rate of cut forage », *Forage Conservation in the 80's*, Edited by C. THOMAS, Occasional Symposium 11, British Grassland Society, Hurley, Maidenhead, GB, p. 61-66.

- DYER J.A., BROWN D.M. (1977) : « A climatic simulator for field-drying hay », *Agricultural Meteorology*, 18, p. 37-48, Amsterdam.
- GATES D.M. (1980) : *Biological Ecology*, New-York, Springer-Verlag.
- HALL D.M., JONES R.L. (1961) : *Nature* (London), 191, p. 95-96.
- HARRIS C.E., THAINE R., SARISALO H.I.M. (1974) : *Journ. of Agric. Sc. Cambridge*, 83, p. 353-358.
- HARRIS C.E., TULLBERG J.N. (1980) : « Pathways of water loss from legumes and grasses cut for conservation », *Grass and For. Sc.*, 35, p. 1-11.
- HART R.H., BURTON G.W. (1967) : « Curing coastal Bermuda grass hay : effects of weather, yield and quality of fresh herbage on drying rates », *Agron. J.*, 59, 367-371.
- HENTGEN A., JEANNIN B. (1968) : « Influence du climat et du végétal produit sur les conditions de séchage des fourrages », *B.T.I.*, 226, p. 13-16.
- JEANNIN B., NICOLAUD J.P. (1973) : « Accélération du séchage du foin au champ », *5^e Journée du Grenier de Theix*, 1973, p. 9-18.
- JONES L., HARRIS C.E. (1979) : « Plant and swath limits to drying », *Forage Conservation in the 80's*, Edited by C. THOMAS, Occasional Symposium 11, British Grassland Society, Hurley, GB, p. 53-60.
- KLINNER W.E. (1975) : « Research and development in crop movement and conditioning », Agricultural Research Council, *Research Review*, 1, p. 51-58.
- KRUTZ G.W., HOLT D.A., MILLER D. (1979) : « For fast field drying of forage crops », *Agric. Engin.*, vol. 50, 8, p. 13-19.
- LUDER W. (1974) : *Influence des conditions climatiques et du peuplement sur le processus de séchage des fourrages*, FAT, Documentation de technique agricole, 75.
- LUDER W. (1982) : *Ermittlung der Erntegelegenheiten und des Verlustrisikos aufgrund von Klimadaten - Dargestellt am Beispiel der Raufutterernte*, thèse ETH Zurich, 174 p.
- MEIDNER H., SHERIFF D.W. (1976) : *Water and Plants*, Blackie (Glasgow and London).
- MUNIER E. (1986) : *Le séchage du foin au champ : adaptation en Lorraine de modèles météorologiques*, mémoire E.N.I.T.A. Dijon - Quétigny/I.N.R.A.-S.A.D. Dijon, 50 p.
- PERIGAUD S., DEMARQUILLY C. (1974) : « Influence de la fertilisation sur la qualité des fourrages », *Extrait du C.R. du Colloque C.E.E.*, Genève.

- PERRIER A. (1975) : « Étude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles », *Ann. Agron.*, vol. 26, 1, p. 1-18, 2, p. 105-123, 3, p. 229-243.
- SAVOIE P., PATTEY E., DUPUIS G. (1984) : « Interactions between grass maturity and swath width during hay drying », *Transactions of the ASAE*, vol. 27, 6, p. 1679-1683.
- S.R.V.A. (Service Vaudois 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.
- SPARKS W.R. (1980) : *Analysis of data from the Trawsgoed grass sowing trials. I. Wilting of a swath with a dry surface on dry days*, Unpublished Memorandum, available from National Meteorological Library, Bracknell.
- THOMPSON N. (1981) : « Modelling the field drying of hay », *Journ. of agric. sc.*, 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 p.
- 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, Landwirts, Jahrbuch, 45, 350-363.
- WILMAN D., OWEN I.G. (1982) : « Effects of stage of maturity, nitrogen application and swath thickness on the field drying of herbage to the hay stage », *Journ. of Agric. Sc.*, Vol. 99, 3, p. 577-586.