

Le séchage en grange

LE SECHAGE DES FOURRAGES EN GRANGE (1)

LE SECHAGE ARTIFICIEL DES FOURRAGES VIEN DES U.S.A., OU LEUR VENTILATION ETAIT UTILISEE AVANT LA GUERRE, ET OU LA PREMIERE PUBLICATION D'IMPORTANCE vulgarisant la méthode a été faite par la Tennessee Valley Authority en 1945.

La ventilation du fourrage a suscité un grand intérêt dans les pays dont le climat est peu favorable à la dessiccation dans le champ : la Belgique, le Royaume-Uni, l'Allemagne, la Suède, la Suisse ont étudié et adopté cette technique. Actuellement il existe plusieurs dizaines de milliers d'installations en Europe.

La France y est venue assez tard, sans doute parce que son climat est heureux, ses agriculteurs habiles à saisir le beau temps, et qu'ainsi le problème se posait de façon moins aiguë que dans les autres pays, mais aussi parce que le retard relatif de notre mécanisation agricole existait dans tous les domaines.

par
C. Jouin

(1) Communication faite en Décembre 1961 au « Colloque technique sur les problèmes actuels de l'électrification rurale et les applications agricoles de l'électricité ». 121

Depuis les agriculteurs ont pris conscience des avantages que leur apportent les esclaves mécaniques, et se passionnent en néophytes pour les solutions modernes. Il n'est plus besoin de susciter leur intérêt pour les méthodes nouvelles, mais plutôt de les informer objectivement sur leurs avantages et leurs inconvénients et de fournir toutes les fois que cela est possible, des projets permettant des réalisations concrètes qui auront une valeur d'exemple.

La plupart des solutions modernes tendent à alléger le travail musculaire de l'homme : elles introduisent nécessairement un dispositif ou machine qu'il faut acheter ce qui immobilise des capitaux. Le séchage des fourrages en grange n'échappe pas à cette règle ; l'adoption du séchage en grange se traduit par une dépense supplémentaire, ce qui pose deux problèmes bien différents pour l'agriculteur : le financement de l'installation et son bien-fondé économique.

L'agriculteur risque de confondre ces deux notions : le financement est une notion claire, car elle se traduit par une dépense ; il lui est par contre difficile de bien juger si sa dépense est fondée économiquement, c'est-à-dire si en fin de compte il en tirera un profit.

C'est ce bien-fondé économique que nous ne devons jamais perdre de vue lorsque nous sommes amenés à préconiser une installation : en effet une dépense plus élevée au départ conduit à une meilleure qualité du fourrage, et permet souvent de réduire les achats onéreux de nourriture complémentaire. Tout projet de ventilation en grange devrait être assorti d'une justification économique basée sur une connaissance précise de la structure de l'exploitation et de ses besoins.

Mais l'économie d'un projet ne peut être basée de façon valable que sur une connaissance technique précise dont les éléments sont exposés ci-après.

1 — PRINCIPES DU SECHAGE EN GRANGE

Le séchage artificiel du fourrage en grange est destiné à soustraire ce dernier aux aléas climatiques. Il est d'autant plus utile que le fanage naturel est plus difficile : dans les régions à climat humide et lorsque l'on emploie des méthodes très intensives de culture du fourrage par exemple. Pour définir en termes précis les avantages du séchage en grange par rapport au fanage dans le champ il faut comparer les pertes de valeur nutritive du fourrage dans les deux cas. Le séchage en grange ne doit en tout état de cause intervenir que dans la mesure où les frais de son établissement et de

son emploi n'excèdent pas l'avantage dû à une moindre perte de valeur nutritive. On doit rechercher une articulation avec le chantier de récolte et des dimensions d'installation telles que le profit retiré de l'ensemble soit maximum. Cet optimum économique se situe évidemment de façon très variable suivant la structure de l'exploitation envisagée et le climat.

I — DONNEES DE BASE

La perte de valeur nutritive du fourrage dépend du temps pendant lequel il demeure humide avant d'être amené à une teneur en eau assez basse pour une conservation de longue durée. Tant qu'il n'est pas parfaitement sec, le fourrage dégage de la chaleur, du gaz carbonique et de la vapeur d'eau en utilisant l'oxygène de l'air. Ces produits proviennent de l'utilisation des réserves de la plante sous l'action conjuguée des enzymes et de micro-organismes tels que des moisissures.

Suivant la teneur en eau, la nature du fourrage et sa température, les réactions biochimiques qui prennent place sont différentes et donnent des produits de dégradation différents. En l'absence de connaissances suffisamment précises, on schématise l'extrême de ces réactions de façon à pouvoir en tirer les données quantitatives nécessaires.

Pour chiffrer la perte correspondante on raisonne sur la matière sèche (M.S.) contenue dans le fourrage : la perte de M.S. s'exprime en pourcentage du poids d'origine. Ainsi une perte de 10 g par kilogram de M.S. est égale à 1 %.

La composition d'un fourrage à la coupe est très variable, la nature de la plante et son état de maturité ayant une influence considérable sur la proportion des constituants. Pour fixer les idées, à maturité normale, la M.S. de la luzerne contient, à la coupe, *environ* :

- 15 à 20 % de matières azotées,
- 10 % de glucides solubles,
- 25 à 35 % de cellulose.

Les pertes n'affectent pas également tous les constituants ; elles affectent d'abord ceux qui donnent au fourrage sa valeur nutritive, c'est-à-dire les glucides solubles et les matières azotées ; aussi une perte globale de 1 % de M.S. correspond-elle à un pourcentage plus élevé de perte de la valeur nutritive ; la part exacte de la valeur nutritive perdue n'est pas bien connue, aussi nous contenterons-nous de n'exprimer en général la perte qu'en pourcentage de la M.S. Cette simplification est évidemment très dangereuse : elle sous-évalue très largement la perte de qualité.

Le carotène (provitamine A) contenu dans le fourrage frais subit aussi des pertes importantes, très variables suivant les conditions de conservation.

Quoique moins difficile à apprécier que la perte de valeur nutritive celle de M.S. n'est pas commode à mesurer. On mesure en général le dégagement du CO₂ en supposant que les réactions biochimiques — très complexes en fait — se réduisent à l'équation de combustion du glucose :
glucose + oxygène → gaz carbonique + eau liquide + calories.

Divers recoupements permettent de considérer cette formule comme utile, en attendant une connaissance plus précise.

On peut admettre que la perte de 1 g de matière sèche correspond au dégagement de 0,6 g d'eau (à l'état liquide) et de 3,8 kcal (kilocalories).

La figure 1 représente par exemple le dégagement de calories pour du trèfle blanc de maturité normale à diverses teneurs en eau M.H. (M.H. : teneur rapportée à la matière humide).

Les chiffres sont variables avec l'espèce considérée, avec l'état de maturité, avec l'état physique dans lequel se trouve la plante (une plante hachée ou écrasée présenterait une réaction plus intense).

La perte de M.S. et la chaleur dégagée croissent exponentiellement avec la température. La teneur en eau présente une action marquée sur le dégagement et la perte de M.S. (figure 1). On admet que ce dégagement et cette perte ne sont négligeables que lorsque la teneur en eau du fourrage est de 11 à 13 % M.H., aux températures usuelles de stockage.

La partie tiretée de la courbe de la figure 2 a été tracée par analogie avec les valeurs connues de dégagement de chaleur par le grain, et ce à titre indicatif, pour renseigner sur son allure probable ; des chiffres expérimentaux récents CNEEMA paraissent confirmer cette extrapolation.

Teneur en eau du fourrage

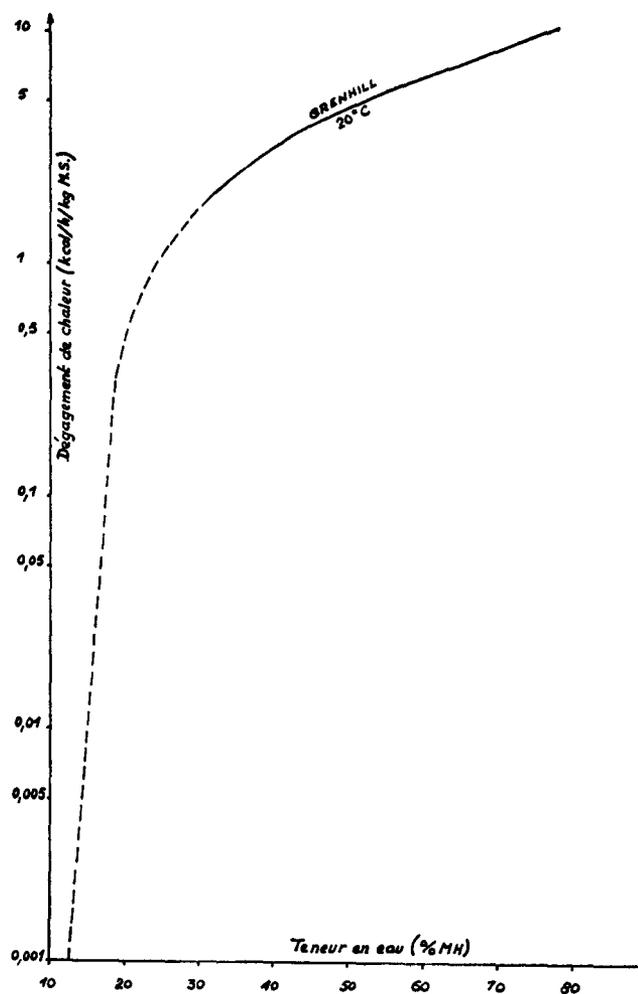
La teneur en eau du fourrage est rapportée à la matière humide.

La teneur en eau « m » rapportée à la matière humide (M.H.) est comprise entre 0 et 1. On l'exprime souvent en pourcentage.

Du fourrage sur pied présente une teneur en eau de l'ordre de 0,8 (M.H.) soit 80 %. Du fourrage « sec », en grange, présente habituellement une teneur en eau de 15 à 20 %.

Poids spécifique du fourrage

Le poids spécifique du fourrage est le poids de fourrage (kg) occupant un mètre cube.



e n g r a n g e fig. 1 — Dégagement de chaleur du fourrage en fonction de sa teneur en eau. 125

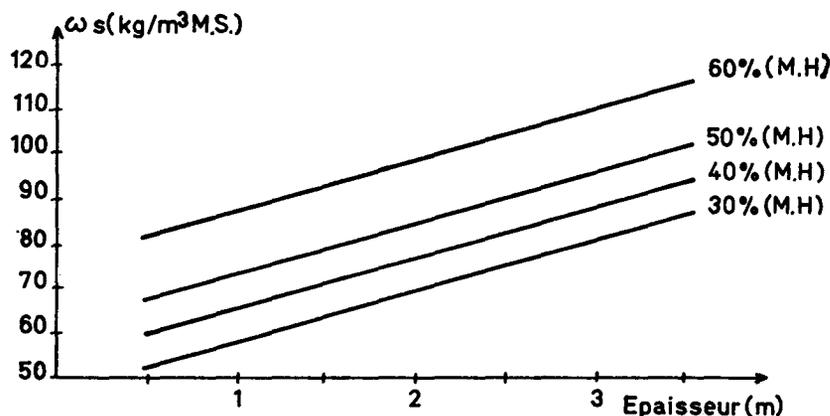


fig. 2 — Poids spécifique du fourrage en grange après séchage.

Le poids spécifique du fourrage varie dans de grandes proportions, suivant sa nature, son état physique (long, haché, tassé) sa teneur en eau.

Le poids spécifique de la *matière sèche* présente les valeurs approximatives suivantes :

— fourrage en vrac : le poids spécifique en grange après séchage dépend de la teneur en eau à l'engrangement et de l'épaisseur du tas, teneur en eau et épaisseur jouant en faveur du tassement : la figure 2 indique ces variations dans un cas particulier ;

— fourrage haché : le poids spécifique varie de façon considérable avec la longueur des brins hachés. Sans tassement, le poids spécifique de matière sèche, de l'ordre de 60 kg/m³ (M.S.) si la longueur de hachage est supérieure à 10 cm, passe à 80 kg/m³ (M.S.) pour une longueur de 3 cm, et croît très vite pour un hachage plus fin : plus de 120 kg/m³ (M.S.) pour une longueur de hachage de 1 cm ;

— fourrage pressé : le pressage à basse densité, qui est le plus répandu en France donne des balles de poids spécifique variant de 50 à 90 kg/m³ (M.S.), le pressage à moyenne densité de 80 à 140 kg/m³ (M.S.) : la valeur exacte dépend de la nature et de la teneur en eau du fourrage, et du serrage de la presse.

Equilibre hygroscopique du fourrage

La teneur en eau du fourrage tend constamment à se mettre en équilibre avec l'humidité de l'air qui le baigne.

La teneur en eau atteinte par le fourrage dépend avant tout de l'humidité relative de l'air, mais aussi de la température et de la constitution chimique du fourrage. En outre, l'équilibre obtenu est légèrement différent suivant que le fourrage est à l'origine plus ou moins sec que l'air (hystéresis).

L'humidité relative de l'air étant la variable la plus importante, la teneur en eau d'équilibre est représentée par une courbe exprimant la teneur en eau en fonction de l'humidité relative de l'air ; on trace plusieurs courbes, une pour chaque température.

L'équilibre hygroscopique est le reflet de la constitution chimique du fourrage ; celle-ci dépend de l'espèce, de l'état de maturité — (car la constitution chimique du fourrage change avec la maturité) et de la façon dont le fourrage a été traité après la coupe ; un fourrage subit du fait du traitement après la coupe des pertes foliaires et des changements de composition chimique qui ont une influence sur son équilibre hygroscopique.

C'est sans doute à la multiplicité des facteurs définissant l'équilibre hygroscopique que sont imputables les différences considérables constatées suivant les auteurs.

A titre d'exemple, la figure 3 donne les courbes d'équilibre hygroscopiques pour de la luzerne de maturité normale. La zone grisée autour de la courbe 20° C représente l'hystéresis : soumise à de l'air à 20° C, 60 % HR de la luzerne de maturité normale atteint 14 % MS si elle était humide, 12 % MS si elle était sèche à l'origine.

Résistance du fourrage au passage de l'air : perte de pression unitaire

Les techniques de séchage du fourrage en grange sont toutes basées sur le passage d'air dans la masse du produit. Le fourrage offre au passage de l'air une résistance que l'on vainc en exerçant une pression suffisante sur l'air.

La pression varie surtout avec la vitesse de l'air traversant le fourrage : la pression J nécessaire pour traverser l'épaisseur d'un mètre de fourrage (perte de pression unitaire) s'écrit, W étant la vitesse à laquelle l'air aborde le fourrage :

$$J \text{ (mm d'eau/m)} = kW^a \text{ (m/s)}$$

a et k sont des coefficients :

● a est voisin de 1,7. Sa valeur exacte dépend de la vitesse de l'air, de la taille du fourrage et de son poids spécifique.

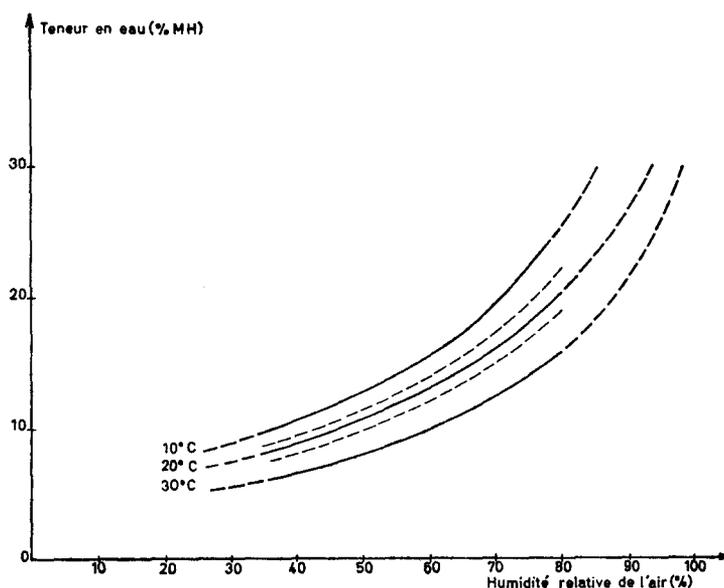


fig. 3 — Equilibre hygroscopique de luzerne de maturité normale.

● k varie suivant la taille des brins de fourrage et le poids spécifique.

La très grande diversité des fourrages rencontrés conduit à des valeurs très variables de la perte de pression suivant les auteurs. La perte de pression par mètre de fourrage traversé pour de la luzerne longue, de 70 kg/m^3 (M.S.) varie de 1 à 4 suivant les auteurs. La figure 4 résume les résultats retenus par les divers expérimentateurs cités. Elle indique, suivant une droite continue de pente 1,7 ($a = 1,7$) la valeur moyenne des résultats, et en lignes pointillées les valeurs extrêmes constatées.

Il n'a pas paru utile de donner les différentes courbes établies car elles ne s'ordonnent pas clairement en fonction des paramètres qui interviennent. La diversité des résultats doit attirer l'attention sur le fait que d'un cas à l'autre la pression nécessaire peut varier de façon importante, et — en attendant une connaissance plus approfondie — inattendue.

On peut dire cependant que la perte de pression est d'autant plus grande que le poids spécifique est plus élevé. Un fourrage fin, un fourrage haché, un fourrage vert (plus lourd donc se tassant plus), un fourrage tassé (au pressage

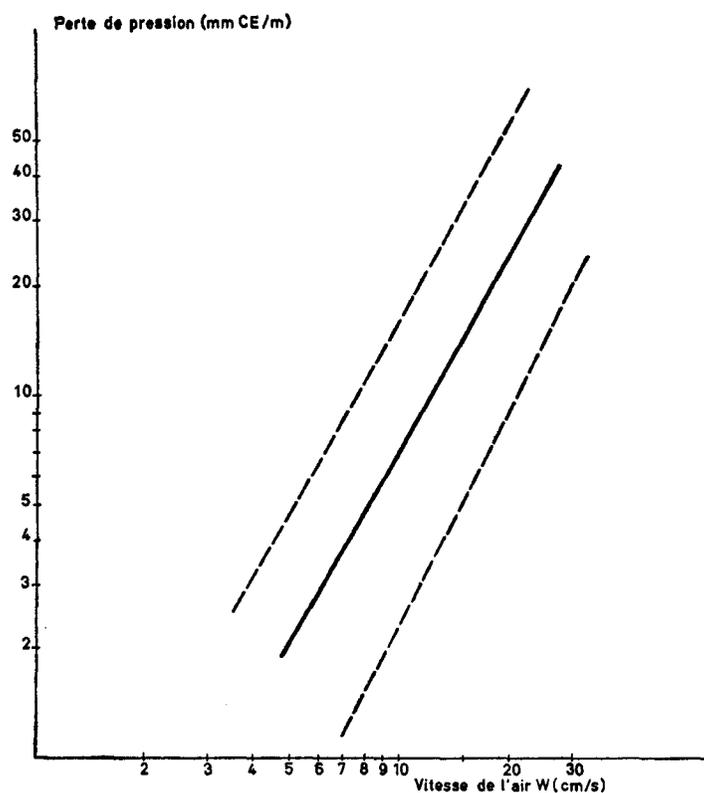


fig. 4. — Perte de pression de l'air traversant le fourrage.

ou à la mise en tas) donnent lieu à une plus grande perte de pression. Ainsi le fourrage de la base du tas, plus tassé, offre plus de résistance au passage de l'air que le fourrage du haut du tas.

Les indications précédentes se rapportent à un matériau supposé homogène et isotrope. En pratique le fourrage n'est pas homogène, à cause des différences de tassement, à cause de l'irrégularité des bottes et de leur entassement ; les différences qui en résultent expliquent en partie la dispersion des indications de la figure. Le fourrage n'est pas isotrope ; l'air se déplace

plus facilement le long des tiges que perpendiculairement à celles-ci. Dans le cas particulier du fourrage entassé en vrac, les tiges sont plus ou moins dans un plan horizontal et l'air s'écoule mieux horizontalement que verticalement. Dans le cas du fourrage pressé, il se trouve souvent qu'un andain irrégulier ait provoqué des paquets de fourrage dans la botte ; l'air s'écoulera mieux de part et d'autre de ces paquets et le cœur du paquet recevra moins d'air que la moyenne attendue.

II — PERFORMANCES A ATTEINDRE

1. Allure schématique du séchage

Supposons pour simplifier avoir entassé du fourrage humide dans une cellule verticale munie à sa partie inférieure d'un grillage sous lequel on envoie de l'air sec. La première couche de fourrage, peu épaisse, est traversée par une énorme quantité d'air ; la teneur en eau de cette couche mince s'établit rapidement à l'équilibre avec l'air sec ; l'air, de son côté, prend rapidement son équilibre avec le fourrage humide et perd ainsi tout pouvoir desséchant. Il s'établit ainsi dans la masse de fourrage une zone sèche, en bas de la cellule, une couche de séchage où l'air se charge de l'eau que perd le fourrage, le reste demeurant à la teneur en eau initiale (2).

La couche de séchage progresse aux dépens de la zone humide et au profit de la zone sèche, en établissant la transition entre elles.

Le séchage est terminé lorsque la zone sèche s'est étendue à toute la masse.

Il est important de calculer la vitesse de progression du séchage en fonction des données qui sont en bref la teneur en eau du fourrage, l'état et la vitesse de l'air envoyé dans le fourrage, de façon à pouvoir calculer les installations en conséquence.

Dans l'état actuel des connaissances on doit se résoudre à simplifier le calcul. Dans le cas où l'on emploie l'air ambiant ou légèrement réchauffé, on suppose que l'épaisseur de la couche de transition entre la zone

(2) En fait la zone humide ne conserve pas son humidité initiale jusqu'au moment où la zone de séchage l'atteint : les calories dégagées par le fourrage donnent à chaque niveau une possibilité supplémentaire d'évaporation, et, de ce fait même, l'humidité des couches supérieures dérive lentement vers des humidités plus basses.

sèche et la zone humide est négligeable. Il résulte de cette hypothèse que les débits d'air ainsi calculés pour sécher le fourrage définissent *la limite inférieure* réellement nécessaire. Tous les résultats calculés ci-dessous sont le résultat de cette hypothèse simplificatrice : *les débits nécessaires sont en fait très supérieurs aux débits calculés.*

Dans le cas particulier où l'on utilise de l'air chaud, l'humidité relative de l'air est très basse et la teneur en eau du fourrage obtenu serait inutilement basse ; on arrête le séchage avant que toute la masse soit séchée : le fourrage des dernières couches traversées est encore humide ; il faut dans ce cas utiliser des débits d'air très élevés, de telle sorte que la couche de transition entre la zone sèche et la zone humide soit très épaisse, et que, par conséquent, à la fin de l'opération, les premières couches ne soient pas trop humides et les dernières pas trop sèches. On ne peut, dans ce cas, faire l'hypothèse simplificatrice de calcul évoquée plus haut ; les connaissances actuelles ne permettent pas de calculer pour quel débit d'air et quelle température l'écart de teneur en eau entre les couches extrêmes sera acceptable.

2. Vitesse de séchage

Durée du séchage

Plus le séchage est lent et plus la perte de qualité qui en résulte est grande. La première couche au contact de l'air de séchage sèche immédiatement et ne se détériore pratiquement pas ; la dernière couche demeure pratiquement à la teneur en eau initiale jusqu'à la fin et c'est elle qui subit la détérioration la plus grande (3).

En partant des données existantes, on peut *par exemple* établir pour du trèfle blanc maintenu par la ventilation à 15° C, la perte de M.S. en fonction de la teneur en eau pour des durées déterminées. Les résultats sont rassemblés dans la figure 5. On voit par exemple que du fourrage à 50 % (M.S.) maintenu 5 jours à 15° C perd 9 % de sa matière sèche. A 20° C, les pertes seraient à majorer d'un quart.

Il faut noter que le calcul a été établi d'après les hypothèses précédentes, et en supposant que la perte est proportionnelle au poids de M.S. à l'origine ; il faudrait en toute rigueur supposer que la perte est proportionnelle au poids de matière demeurée utilisable pour la dégradation, matière

(3) Cette teneur en eau s'abaisse *en fait*, à cause des calories dégagées par le fourrage lui-même.

dont la nature et la teneur sont mal connues (on sait cependant qu'il s'agit essentiellement des glucides solubles, puis des protides). Les résultats indiqués sont donc très grossiers, ils sont donnés à titre indicatif pour fixer les idées.

Quantité d'eau à évaporer

La quantité d'eau à évaporer pour sécher le fourrage est facile à calculer. Pour sécher du fourrage de 50 % (M.H.) jusqu'à 18 % (M.H.) il faut évaporer 0,8 kg d'eau par kg de M.S. La quantité d'eau à évaporer croît de façon considérable avec la teneur en eau initiale : en partant de fourrage à 70 % il faut évaporer 4 à 5 fois plus d'eau qu'en partant de fourrage à 40 %.

Quantité d'air nécessaire pour sécher 1 kg de fourrage

La quantité d'air M nécessaire pour sécher 1 kg de fourrage se calcule à partir des courbes d'équilibre hygrosopique et du diagramme de l'air humide ; M est égal au rapport de la quantité d'eau à évaporer par kg de fourrage et de la quantité d'eau transportée par kg d'air. M s'exprime en kg d'air sec par kg de M.S.

Dans le calcul de M il faut tenir compte de l'eau supplémentaire évaporée par le dégagement spontané de chaleur : *cet apport n'est absolument pas négligeable*. En effet, la perte de 1 g de M.S. correspond à une possibilité supplémentaire d'évaporation de l'ordre de 3,5 g d'eau, compte tenu des propriétés de l'air humide. Une perte de 10 % de M.S. correspond à la possibilité d'évaporation de 350 g d'eau par kg de M.S. La valeur réelle de M dépend donc de la perte de M.S., et par conséquent de la durée de l'opération.

Débit spécifique

Le débit spécifique n est le débit d'air par kg de fourrage (M.S.) ; n s'exprime en kg d'air sec par heure et par kg de M.S. ; n est égal au rapport

$$n = \frac{M}{d}$$

M : quantité d'air pour sécher 1 kg de M.S. (kg air sec / kg M.S.)

d : durée du séchage (heures)

la valeur de n dépend des paramètres suivants :

- nature et état du fourrage,
- teneur en eau du fourrage,
- durée du séchage,

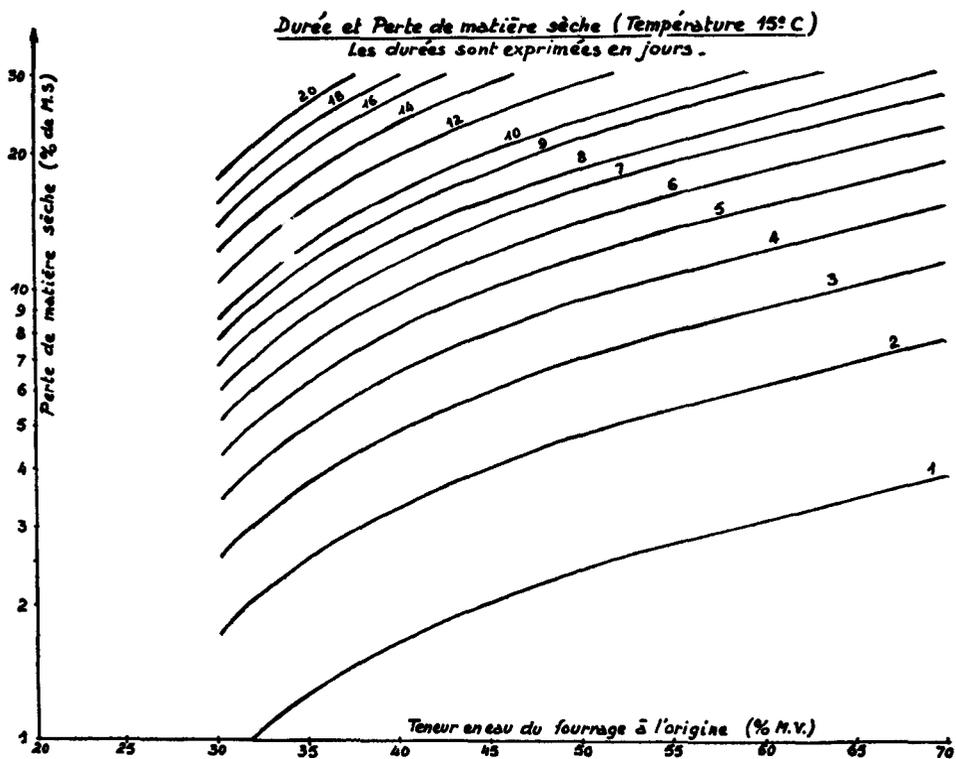


fig. 5 — Durée du séchage et perte de matière sèche.

- perte de qualité,
- état de l'air (température et humidité relative).

La perte de matière sèche du fourrage indiquée ci-dessous est celle concernant la dernière couche.

Des figures ont été établies à titre indicatif, pour de la luzerne entière de maturité normale et pour de l'air à 20° C, respectivement à 60 % (figure 6) et à 80 % (figure 7) d'humidité relative. Soulignons que ces figures, établies à partir de raisonnements extrêmement simplifiés, n'ont de valeur que comparative; des expériences en cours devraient permettre de serrer de plus près la réalité.

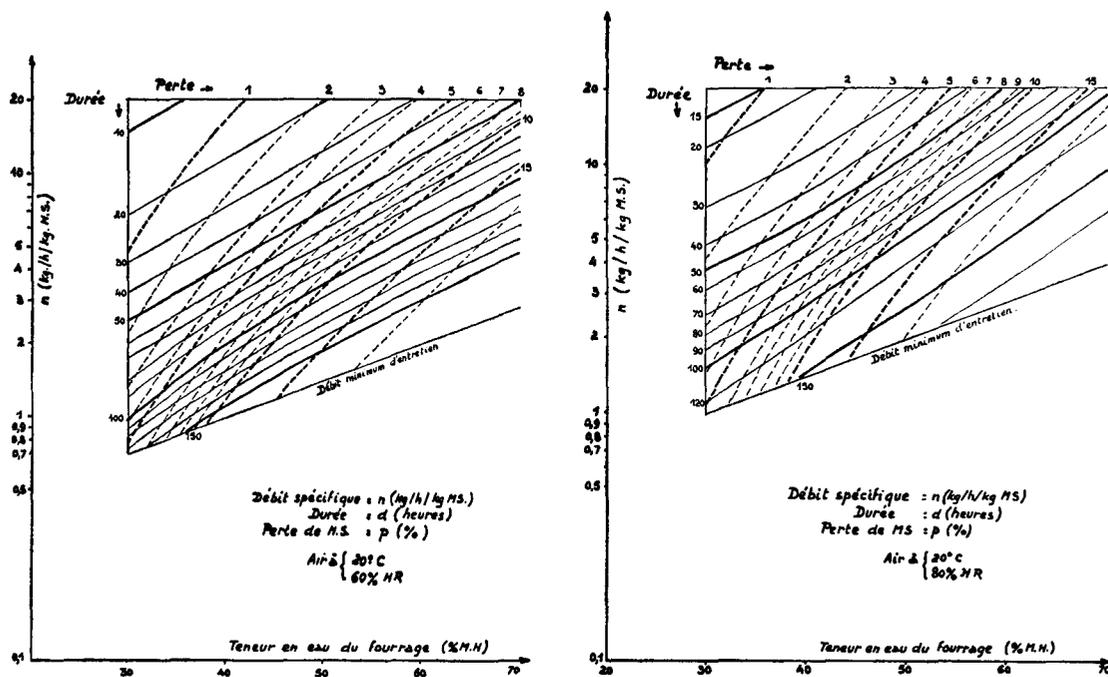


fig. 6 — Débit spécifique, durée, perte de M.S. (air 20° C. 60 %).
 fig. 7 — Débit spécifique, durée, perte de M.S. (air 20° C 80 %).

On voit par exemple que dans le cas du fourrage à 50 % (M.H.) soumis à un débit spécifique de 5 kg d'air sec / kg M.S., la durée et la perte seraient

état moyen de l'air	durée		perte % M.S.
	heures	jours	
20° C, 60 %	70	3	7
20° C, 80 %	110	4,5	12

L'examen des figures 6 et 7 attire quelques remarques :

- A égalité de débit spécifique, du fourrage engrangé à 50 % perd 2,5 fois plus de matière sèche que du fourrage engrangé à 40 %, et du fourrage engrangé à 60 %, 5 fois plus.
- A égalité de débit spécifique, la durée du séchage augmente de moitié quand on passe du fourrage à 30 % au fourrage à 50 %.
- A égalité de débit spécifique, la durée du séchage est moitié plus grande pour de l'air à 80 % que pour de l'air à 60 % ; la perte de qualité est des trois quarts supérieure.

Vitesse de progression du séchage

La vitesse V de progression du séchage est la vitesse à laquelle progresse la zone sèche aux dépens de la zone humide.

$$V = \frac{H}{d}, \text{ H étant l'épaisseur de fourrage et d la durée de l'opération.}$$

Si par exemple l'épaisseur H est de 2 mètres et la durée de 100 heures, la vitesse de progression du séchage est en moyenne de $\frac{2}{100} = 0,02$ m/h soit 2 cm à l'heure, soit 0,48 m par jour.

Cette notion est importante en pratique : le passage de fin de la zone sèche au début de la zone humide se traduit par un abaissement de température de quelques degrés centigrades, différence de température aisément décelable, et naturellement par une différence de consistance du fourrage qui offre moins de résistance à la pénétration d'une sonde lorsqu'il est sec. On peut apprécier ainsi où en est l'opération.

3. Echauffement du fourrage

Echauffement spontané

Le fourrage laissé à lui-même s'échauffe, les calories dégagées s'écoulent mal, car le fourrage est un bon isolant thermique, et la température monte.

La montée en température est très rapide : une masse de fourrage à 30 % demeurée sans ventilation passe de 15° C à environ 30° C au bout de 7 heures, 40° C au bout de 11 heures. Si le fourrage est à 40 - 50 ou 60 %, il passe à environ 30° C en 5 heures et à 40° C en 7 heures.

De telles montées en températures correspondent à une détérioration importante et grave : elles doivent être absolument évitées.

Débit d'entretien

On ne peut laisser du fourrage humide sans ventilation pendant plus d'une heure ou deux. On pourrait craindre cependant qu'à ne pas vouloir arrêter la ventilation si l'air est humide il y ait réhumidification du fourrage. En fait la zone sèche du fourrage s'humidifie légèrement, mais la zone humide continuera à sécher ; la réhumidification de la zone sèche n'est jamais très importante : dans les cas les plus défavorables l'air est rarement à plus de 90 % après être passé dans un ventilateur : les courbes d'équilibre hygroscopique montrent que la teneur en eau après réhumidification serait alors, compte tenu de l'hystéresis de l'ordre de 20 à 25 % seulement. La zone humide continue à sécher, par l'utilisation même des calories produites par le fourrage.

On peut chercher à réduire le débit spécifique d'air envoyé dans le fourrage. Le débit spécifique d'entretien peut être calculé par exemple sur la base d'une élévation de 1° C de la température sèche de l'air à la traversée du fourrage. Dans ce cas, le débit d'entretien nécessaire varie de 0,7 à 5 kg air sec / kg M.S. suivant l'état de l'air et la teneur en eau du fourrage d'origine. Ce débit spécifique d'entretien est porté dans les graphiques 6 et 7 ; *il faut le considérer comme une limite inférieure du débit d'air à envoyer.*

Les débits d'entretien calculés sont relatifs au début du séchage lorsque tout le fourrage est humide. Lorsque la moitié du fourrage est sec, ce débit pourrait être divisé en 2. Lorsque la presque totalité du fourrage est sèche ce débit minimum devient insignifiant, il ne faut cependant pas oublier que le fourrage séché n'est pas homogène et qu'il risque de se produire des points d'échauffement si le débit est insuffisant. Il est donc bon de considérer dans tous les cas le débit d'entretien comme le débit minimum : *ce n'est qu'à la fin du séchage que l'on peut ne pas souffler en période humide, et à la condition de prendre la précaution de vérifier qu'aucun échauffement n'a lieu.*

4. Cas où l'air est très humide

Distinction entre l'air à moins et à plus de 80 % H.R.

La teneur en eau du fourrage après séchage dépend de la température et de l'état hygroscopique moyens de l'air. A titre d'exemple, on obtient par ventilation les teneurs en eau suivantes pour du trèfle blanc de maturité

teneur en eau (% M.H.) obtenu par la ventilation

température moyenne de l'air (°C)	Humidité relative moyenne de l'air (%)				
	60	65	70	75	80
10	—	—	20	23	26
15	—	16	18	20	23
20	13	15	16	18	21
25	11	12	13	16	—

Or, la conservation ultérieure ne sera bonne que si le fourrage a été séché avec de l'air à 60 - 65 % H.R., cela signifie que la conservation ultérieure au séchage ne sera convenable que si le fourrage a été amené à une teneur en eau de l'ordre de 13 à 15 %. Il peut arriver que l'air utilisé durant la ventilation se trouve à une humidité supérieure à 65 % H.R. : le fourrage obtenu est trop humide et ne peut supporter sans perdre sa qualité une conservation de longue durée.

Dans le cas où l'air est en moyenne à plus de 80 % H.R., la teneur en eau du fourrage obtenu exige une ventilation continue qui n'a donc pas de fin : il en résulte évidemment des frais supplémentaires et des pertes de qualité importantes. *Il n'est donc pas possible d'utiliser de l'air à plus de 80 % d'humidité relative moyenne.*

Les solutions à apporter lorsque l'air est en moyenne à plus de 65 % H.R. consistent soit à utiliser l'air aux heures favorables, soit à le réchauffer.

Choix de l'air aux heures favorables

Lorsque l'humidité moyenne de l'air est inférieure à 80 % dans le climat envisagé, il est possible de procéder au séchage *en deux étapes* :

1^{re} *étape* : on sèche le fourrage jusqu'à l'équilibre et ce jusqu'à remplissage de la grange. Le produit obtenu ne peut supporter une longue conservation.

2^e *étape* : lorsque la grange est pleine de fourrage, on choisit l'air de façon à ce que son hygrométrie moyenne soit égale à 60 - 65 %. Il faut alors souffler durant les heures favorables. Les heures favorables sont celles

qui encadrent 15 heures ; le choix de ces heures peut être fait de la façon suivante : on mesure l'hygrométrie relative de l'air à 15 heures ; en reportant la valeur de l'hygrométrie sur un graphique établi à l'avance à partir des caractéristiques climatiques de la région on trouve les heures pendant lesquelles il faut souffler. Sur la figure 8 on voit par exemple que dans la région de Romilly si l'hygrométrie est à 15 heures de 50 %, il faut souffler de 8 heures à 22 heures pour avoir de l'air à 60 - 65 % H.R. en moyenne.

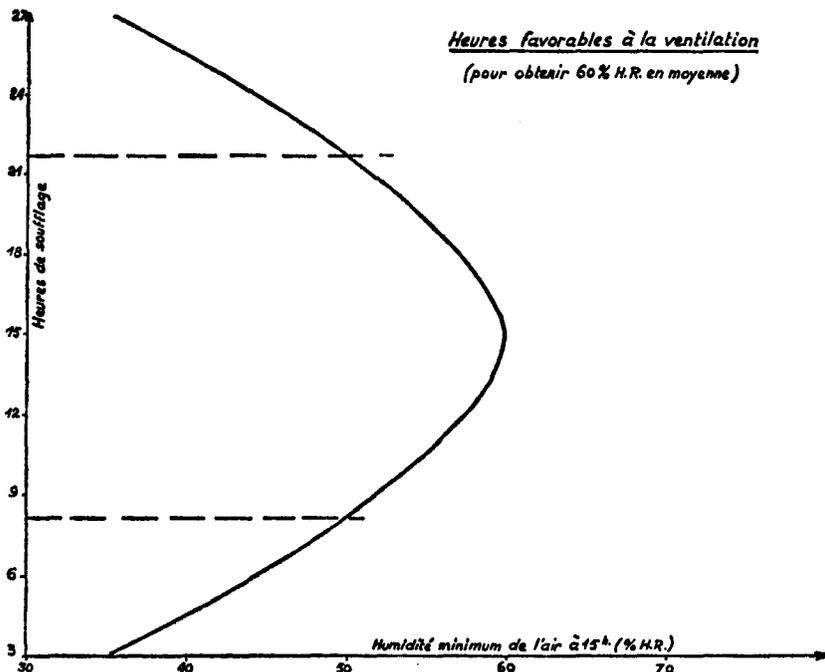


fig. 8 — Heures favorables à la ventilation.

N.B. — Ce procédé en deux étapes n'est pas utilisable si l'air est en moyenne à plus de 80 % H.R.

Réchauffage de l'air

Le réchauffage de l'air est obligatoire lorsque l'air est en moyenne à plus de 80 % H.R. ; il entre en concurrence avec le choix des heures favorables lorsque l'air a une humidité moyenne comprise entre 65 et 80 %.

a. Cas où l'air est à plus de 80 % H.R.

Il faut réchauffer l'air dès le début du séchage, et le porter à 60 - 65 % H.R.

La quantité de chaleur à mettre en jeu est de l'ordre de 1,5 kcal par kg d'air pour de l'air à 85 à 90 %, ce qui correspond à une élévation de température de 6° C.

Il faut adapter la puissance calorifique à l'hygrométrie moyenne, de façon à ne pas dépenser des calories en pure perte.

La quantité de chaleur pour sécher 1 kg de fourrage peut être calculée : elle est, par exemple, pour du fourrage à 50 % d'humidité de l'ordre de 500 kcal / kg M.S., c'est-à-dire 50 g de gaz propane ou de fuel domestique, ou 600 Wh de courant électrique.

b. Cas où l'air a une H.R. comprise entre 65 et 80 %

Il y a deux solutions :

1^{re} solution :

On peut dès le début réchauffer l'air de façon à obtenir en moyenne 60 à 65 % H.R. La quantité de chaleur sera toujours inférieure à 1 kcal par kg d'air, soit une élévation moyenne de température inférieure à 4° C.

Pour du fourrage à 50 % d'humidité, il faudra moins de 350 kcal / kg M.S., c'est-à-dire moins de 35 g de gaz propane ou de fuel domestique, ou moins de 400 Wh par kg de matière sèche.

2^e solution :

On peut utiliser la méthode du séchage en deux étapes et ne réchauffer que durant la seconde étape. Dans ce cas on souffle *continuellement* durant la seconde étape en réchauffant l'air pour qu'il atteigne 60 - 65 % H.R. en moyenne. Pour du fourrage à 50 % d'humidité il faudra moins de 100 kcal / kg M.S., c'est-à-dire moins de 10 g de gaz propane ou de fuel domestique, ou moins de 120 Wh par kg de matière sèche.

Il est évident que la seconde solution coûte moins cher mais conduit à une qualité moindre.

Séchage à l'air chaud

Nous avons vu jusqu'ici que les méthodes de séchage en grange consistent à envoyer de l'air à une humidité relative convenable dans le fourrage ; si

l'on réchauffe l'air on ne dépasse jamais une augmentation de température de 6° C. Enfin, le fourrage reste en place après l'opération.

Le « *séchage à l'air chaud* » est différent : on réchauffe l'air de plusieurs dizaines de degrés et il en résulte diverses conséquences :

L'équilibre d'humidité atteint par le fourrage peut être très bas : on doit arrêter l'opération *avant que* l'équilibre soit atteint, et de sorte *qu'en moyenne* la teneur en eau du fourrage soit de l'ordre de 13 %.

La teneur en eau du fourrage obtenue n'est pas homogène ; le fourrage est trop sec là où rentre l'air, trop humide là où il sort. Cet écart est d'autant plus grand que la température est plus élevée et le débit spécifique d'air plus faible. Pour obtenir un écart raisonnable il faut employer un débit spécifique et une température en accord avec eux : plus la température est élevée, plus le débit spécifique doit être élevé.

La puissance calorifique est importante ; il est nécessaire d'avoir un générateur d'air chaud coûteux.

Le débit d'air est important : on ne peut utiliser que de faibles épaisseurs de fourrage, sinon la pression nécessaire est trop grande. La puissance électrique est importante. Le séchage est très rapide, de durée inférieure à 1 jour.

Il en résulte que dans cette méthode le fourrage est placé temporairement sur l'aire de séchage : on a affaire à un véritable séchoir. L'aire de séchage est utilisée plusieurs fois dans l'année.

Cette méthode peut convenir au cas particulier de la récolte avec pressage à moyenne densité, assez peu répandu en France.

Les performances propres à cette méthode sont mal connues : ainsi on ne connaît pas les débits spécifiques à faire intervenir pour qu'à une température déterminée l'hétérogénéité due au séchage ne soit pas trop élevée.

5. Ventilateur

Calcul du débit d'air

Ayant déterminé à l'avance le volume V du chargement de fourrage et le débit spécifique d'air N, le débit total Q d'air est :

$$Q = N \cdot V$$

Q est exprimé en m³ d'air par heure.

140 N est exprimé en m³/h/m³ de fourrage.

Calcul de la pression

La pression nécessaire est la somme de la pression perdue dans les circuits de répartition de l'air et de la pression perdue en propre dans le fourrage.

La pression perdue dans les canalisations de répartition d'air est proportionnelle au carré du débit Q :

$$p_c = k Q^2$$

la valeur de k est facile à calculer.

La pression perdue dans le fourrage p_f se détermine de la façon suivante :

Supposons pour simplifier que l'écoulement de l'air dans le fourrage se fait en filets parallèles, la vitesse W de l'air dans le fourrage a pour expression :

$$W = \frac{Q}{S}, \text{ S étant la surface de l'aire de séchage.}$$

On a vu antérieurement que la perte de pression J par mètre de hauteur de fourrage est :

$$J = k' W^{1,7}$$

La perte de pression pour traverser l'épaisseur h de fourrage est :

$$p_f = k' h W^{1,7}$$

Or le débit spécifique N (m³/h par m³ de fourrage) est égal au quotient du débit total par le volume de fourrage :

$$N = \frac{Q}{S \times h}$$

d'où

$$N = \frac{W}{h} \text{ et } W = N h$$

L'expression de p_f devient :

$$p_f = k' h^{2,7} N^{1,7}$$

On voit donc que pour assurer un débit spécifique donné N, la pression nécessaire va croître avec la hauteur h, h étant porté à la puissance 2,7 : si on double l'épaisseur de la couche de fourrage à sécher il faut pour avoir le même débit spécifique, disposer d'une pression 7 fois plus grande.

Il en résulte qu'on ne peut pas dépasser en pratique une certaine épaisseur de fourrage, qui est généralement de l'ordre de 1 à 2 mètres.

Comme il faut entasser le fourrage sur des épaisseurs plus grandes que 2 mètres on tourne la difficulté de la façon suivante :

- on sèche une première couche, sur deux mètres par exemple,
- puis on entasse une seconde couche de même épaisseur : *le débit spécifique à prendre en compte ne s'applique qu'à la seconde couche,*
- puis une 3^e couche,
- etc...

Quel que soit le nombre de couches on garde en somme le même débit total, donc la même vitesse W de l'air.

Pour deux couches de même épaisseur h_0 , la pression dans le fourrage est :

$$pf = k' h W^{1,7} + k' h W^{1,7}$$

1^{re} couche 2^e couche

ou encore

$$pf = 2 k' h_0^{2,7} N^{1,7}$$

Pour trois couches

$$pf = 3 k' h_0^{2,7} N^{1,7}$$

La perte de pression est donc proportionnelle au nombre de couches grâce à l'artifice employé.

Si l'épaisseur totale est grande, la pression nécessaire devient importante : on s'arrange pour éviter que l'air ne traverse les couches déjà séchées, à l'aide de cheminées qui amènent directement l'air au contact de la dernière couche à sécher (voir plus loin l'emploi des « bouchons »).

Choix du ventilateur

On peut établir la « courbe caractéristique » de l'installation, qui indique les pressions nécessaires pour faire passer divers débits d'air dans le fourrage (figure 9).

On a tracé dans cette figure 3 droites indiquant la pression nécessaire pour traverser 1 - 2 et 3 couches de fourrage, ces couches étant placées après séchage de la couche précédente.

Le débit de fonctionnement est obtenu en superposant ces courbes à la courbe du ventilateur choisi. On voit que le débit varie suivant le nombre de couches : il est plus grand pour une seule couche, et plus faible pour plusieurs.

Or pour obtenir la qualité voulue il faut soumettre la couche traitée à un débit spécifique bien déterminé : *l'épaisseur des couches doit être d'autant plus faible que la hauteur du tas est plus grande.*

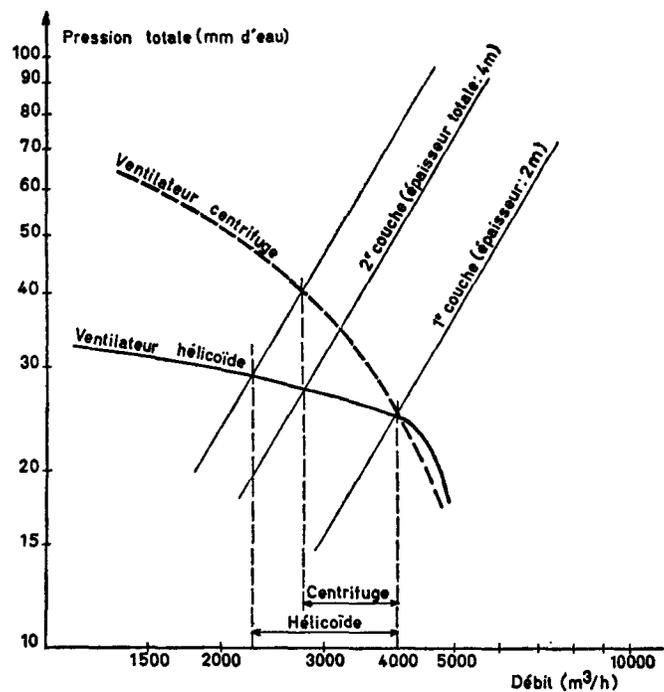


fig. 9 — Courbes caractéristiques de l'installation et du ventilateur.

Tout dépend d'ailleurs des caractéristiques du ventilateur : le graphique porte la courbe d'un ventilateur utilisé couramment, le ventilateur hélicoïde, cette courbe est « plate ». Si on utilise un ventilateur centrifuge, à courbe « plongeante », l'écart de débit est beaucoup moins grand d'une couche à l'autre.

Le ventilateur à choisir doit offrir une courbe telle que le débit d'air soit à peu près convenable suivant la hauteur de fourrage à installer (compte tenu évidemment de la teneur en eau, de la nature et du poids spécifique du fourrage).

Puissance du ventilateur : le ventilateur est défini par sa « courbe caractéristique » de la pression H en fonction du débit Q : la puissance P du ventilateur pour un point quelconque de cette courbe est égale à :

$$P = \frac{Q \times H}{r}$$

r étant le rendement de l'ensemble moteur ventilateur.

Le moteur doit avoir une puissance suffisante pour entraîner le ventilateur. Il est important que la puissance demandée par le ventilateur ne varie pas trop avec le débit : en particulier les ventilateurs qui consomment une puissance élevée lorsque le débit est grand sont toujours à proscrire ; c'est le cas de certains ventilateurs centrifuges.

2 — METHODES DE SECHAGE EN GRANGE

I — CALCUL DES INSTALLATIONS

Les installations de séchage en grange doivent être étroitement adaptées aux conditions de l'exploitation, c'est-à-dire au chantier de récolte qu'utilise l'exploitant, aux bâtiments dont il dispose, et au climat.

1. Surface et volume de stockage

L'installation doit pouvoir absorber la pointe de production fourragère, qui se situe en juin : soulignons en passant l'intérêt primordial d'étaler cette pointe en utilisant des productions fourragères différentes.

L'apport de fourrage en provenance du champ se fait de façon discontinue, on coupe une certaine surface, on provoque un début de fanage, qui dure 36 à 48 heures et on rentre le fourrage pour le placer sur l'aire de séchage. La quantité de fourrage ainsi apportée par une coupe dépend essentiellement de la capacité des machines dont dispose l'exploitant.

Les coupes vont se succéder à intervalles plus ou moins rapprochés qui dépendent de la surface totale consacrée aux fourrages, de l'étalement de leur maturité et du climat ; il faut évidemment déduire le fourrage qui est pâturé ou livré frais directement aux animaux, ce qui rend plus aiguë la pointe de production à sécher ; il faut déduire également le fourrage faisant l'objet d'autres moyens de conservation, généralement par ensilage, ce qui au contraire étale la pointe de production à sécher.

Dans chaque cas particulier, l'expérience de l'exploitant permet de fixer assez exactement le volume de chaque coupe et la fréquence des coupes.

Le poids de 1 m³ de fourrage rentré en vrac ou pressé à basse densité varie de 60 à 90 kg par m³ (poids spécifique du fourrage humide).

Une coupe de 10 tonnes occupera à l'enrangement un volume de l'ordre de 110 à 170 m³. L'épaisseur de la couche de fourrage doit être comprise entre 1 et 2 mètres : on voit qu'une aire de séchage de 100 m² pourra accueillir une coupe de 10 à 15 tonnes.

Mais il faut que le séchage de la première couche soit terminé avant d'en mettre une seconde : la durée du séchage en grange étant habituellement de l'ordre de 5 jours, il faudra autant d'aires de séchage que l'on fera de coupes en 5 jours. Si l'on fait par exemple une coupe tous les deux ou trois jours, il faut disposer de deux aires de séchage ; le débit d'air à mettre en œuvre devra évidemment permettre la ventilation simultanée des deux aires.

Adaptation aux bâtiments existants

On suppose que le bâtiment de stockage du fourrage habituellement utilisé est rationnellement disposé pour alimenter les animaux. Dans le cas contraire, il peut être opportun d'installer la ventilation près de l'aire de stabulation libre, sous un hangar bardé ou dans un silo ventilé spécial.

On peut grossièrement admettre que le poids de foin stocké par m³ est après séchage de l'ordre de 100 kg par m³. Ainsi une récolte donnant finalement 100 tonnes de foin occupera un volume de l'ordre de 1 000 m³.

La hauteur de stockage utilisable doit tenir compte de la possibilité de remplissage : un espace libre doit être laissé au-dessus du tas pour évacuer l'air. En pratique, suivant les cas, la hauteur varie de 3 à 10 mètres.

Le quotient du volume de la récolte par la hauteur moyenne de stockage donne la surface totale à consacrer à la ventilation. Toute cette surface doit être équipée de conduits d'amenée d'air ; on divise la surface en éléments correspondant à l'apport d'une coupe.

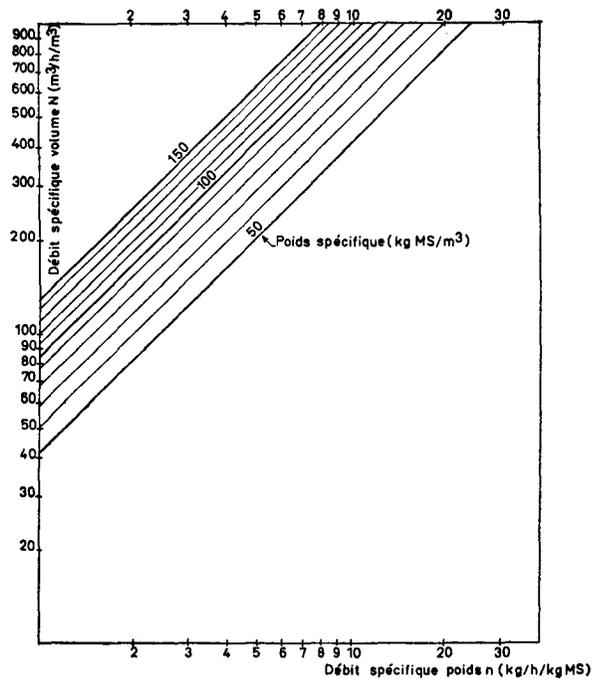
Si par exemple le poids total de fourrage sec récolté dans l'année est de 100 tonnes, occupant 1 000 m³, et si la hauteur utile de stockage est de 5 mètres, la surface totale est de 200 m², mais nous avons vu que l'aire de séchage élémentaire est de l'ordre de 100 m² pour une coupe de 10 à 15 tonnes, poids réel de fourrage en provenance du champ ; dans cet exemple on établira deux aires de 100 m² chacune.

2. Débit d'air : adaptation au climat

Le débit d'air total est égal au produit du volume V (m^3) de fourrage à ventiler simultanément par le débit spécifique N (m^3/h par m^3 de fourrage).

— le volume V du fourrage à ventiler serait dans l'exemple précédent (coupe de 10 à 15 tonnes) de 110 à 170 m^3 pour une aire soit $V = 220$ à 340 m^3 pour deux aires ventilées simultanément.

— Le débit spécifique N est exprimé en m^3/h par m^3 de fourrage, ce qui est une notion plus pratique que le débit spécifique n exprimé en kg/h par kg de fourrage sec : la figure 10 indique la relation mathématique entre n et N , qui dépend du poids spécifique de matière sèche du fourrage. Pour un



tourrage de poids spécifique égal à 80 kg/m³, on voit que $N = 130 \text{ m}^3 / \text{h}$ par m³ correspond à $n = 2 \text{ kg/h/kg}$.

Quelle valeur faut-il choisir pour le débit spécifique ? *Tout dépend de la teneur en eau du fourrage que l'on veut traiter et du climat.*

Si le climat est favorable, il sera facile d'engranger des fourrages à 35 ou 40 % d'humidité, qui sécheront en 5 jours avec un débit spécifique $n = 1,5$, soit $N = 100 \text{ m}^3/\text{h}$ par m³ de fourrage.

Si le climat est défavorable et si l'on ne peut guère engranger à moins de 45 ou 50 %, il faut là encore prévoir de sécher en 5 à 6 jours environ ; si l'on ne réchauffe pas l'air il faudra prendre $n = 3,5$, soit $N = 240 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^3$ de fourrage ; si l'on réchauffe l'air il faudra prendre $n = 2,4$ soit $N = 160 \text{ m}^3/\text{h}$ par m³ de fourrage.

En outre, il faut majorer le débit spécifique de 20 % pour tenir compte des fuites inévitables.

Ainsi, suivant le climat et si l'on veut limiter la perte de matière sèche du fourrage pour obtenir un produit de qualité il faudrait des débits spécifiques d'air allant de 125 à 300 m³/h par m³ de fourrage.

Débit total d'air Q (m³/h)

Le choix du débit total à retenir est assez difficile. Il faut tenir compte de deux faits : plus le nombre de couches de fourrage est grand, plus le débit produit par le ventilateur est faible ; mais ce sont les premières coupes qui donnent la plus grande quantité de fourrage : ces coupes correspondent heureusement aux premières couches.

Le débit sera choisi généralement de telle façon qu'il permette le traitement d'une première couche épaisse de deux mètres.

Ainsi pour une aire de 100 m², sur laquelle la première couche aura 2 mètres, le volume V est 200 m³, le débit variera suivant le climat de 25 000 à 60 000 m³/h.

Dans le cadre de l'exemple pris plus haut, il faudra ventiler simultanément deux aires de 100 m², c'est-à-dire disposer simultanément de 50 000 à 120 000 m³/h suivant le climat.

3. Pression d'air, ventilateur nécessaire

Ventilation de la première couche

Calculons d'abord la pression nécessaire pour ventiler la 1ère couche : elle est fonction :

- de la pression perdue dans les dispositifs de répartition
- de la pression perdue dans le fourrage.

Nous admettrons que la pression perdue dans le dispositif de répartition est de 8 mm d'eau.

La pression perdue dans le fourrage dépend de la vitesse de l'air : en supposant par exemple que l'air traverse verticalement la couche de deux mètres, les vitesses correspondant à 25 000 et 60 000 m³/h seront respectivement de 7 et 16 cm/s. Le calcul de la ventilation radiale, un peu plus complexe n'est pas exposé ici.

On peut calculer la perte de pression dans le fourrage ; admettons par sécurité que la pression nécessaire soit comprise entre la valeur moyenne et la valeur maximum indiquées sur le graphique : il faut 5 mm de pression pour 7 cm/s et 20 mm pour 16 cm/s, ceci pour 1 mètre d'épaisseur. Pour 2 mètres d'épaisseur, les pertes de pression sont : 10 mm et 40 mm.

La pression totale N nécessaire est donc :

- pour 25 000 m³/h : 18 mm
- pour 60 000 m³/h : 48 mm

— *puissance consommée P :*

La puissance électrique P consommée est donnée par la formule

$$P \text{ (kW)} = \frac{Q \text{ (m}^3\text{/h)} \times H \text{ (mm d'eau)}}{366\,372 \times r}$$

r est le rendement du groupe moteur ventilateur ($0 < r < 1$).

On peut admettre que r est de l'ordre de 55 % pour un bon ventilateur, P devient alors :

$$P = \frac{Q \times H}{200\,000}$$

Les puissances utilisées sont :

- pour 25 000 m³/h : 18 mm : 2,25 kW
- pour 60 000 m³/h : 48 mm : 14,4 kW

Ceci correspond à des moteurs de 4 et 23 ch.

Si le ventilateur est mauvais son rendement peut être la moitié de celui indiqué plus haut : la puissance nécessaire serait dans ce cas doublée ! Il est donc très important de s'assurer que le ventilateur présente bien dans toute la zone de son utilisation un rendement suffisant et d'exiger de la part des constructeurs que les ventilateurs qu'ils proposent aient fait l'objet d'essais

Avec un ventilateur normal, pour une aire de séchage de 100 m² et suivant le climat, les débits devront donc varier de 25 000 m³/h à 60 000 m³/h, les pressions de 18 à 48 mm, la puissance du moteur de 4 à 23 ch, et la puissance électrique utilisée de 2,25 à 14,4 kW.

Rappelons qu'il s'agit de cas extrêmes :

- d'un climat très favorable avec fourrage engrangé à 35/40 %
- d'un climat très défavorable avec fourrage engrangé à 45/50 %.

Dans ce dernier cas, il est utile de réchauffer l'air de quelques degrés, ce qui permet de diminuer le débit d'air : un réchauffage de 4° C par exemple permet de réduire le débit de 30 %, la pression de 50 % et la puissance de 65 %. Ainsi par exemple, le cas extrême de (60 000 m³/h, 48 mm, 23 ch) serait-il réduit à (42 000 m³/h, 24 mm, 8 ch), mais à la condition de disposer d'une puissance calorifique de $42\,000 \times 0,33 \times 4 = 56\,000$ kcal/h, ce qui correspond à 5 kg/h de propane ou de gas-oil, ou à une batterie de chauffe de 65 kW.

Il apparaît ainsi que dans un climat très humide le réchauffage est une solution viable au point de vue pratique.

Ventilation des couches suivantes

Que se passera-t-il lorsque l'on entasse du fourrage au-dessus de la première couche ?

Le débit d'air d'un ventilateur décroît lorsque l'on entasse d'autres couches. Si l'on monte à 5 mètres, par exemple, le débit traversant le fourrage va tomber de moitié environ si le ventilateur a une courbe plate (ventilateur hélicoïde) du tiers environ si le ventilateur a une courbe plongeante (ventilateur centrifuge). La seule solution est de mettre des couches plus minces : la 2^e couche sera seulement de 1,5 m et la 3^e couche de 1 m pour un ventilateur hélicoïde, la deuxième couche sera de 1,70 m et la troisième de 1,40 m pour un ventilateur centrifuge.

Que va-t-il se passer pour la pression ? La pression nécessaire sera tout simplement celle que peut fournir le ventilateur et qui est indiquée par sa courbe caractéristique ; cette pression est à peine plus grande pour un hélicoïde, bien supérieure pour un centrifuge.

En ce qui concerne la puissance consommée, elle sera à peu près invariable : c'est le cas pour tous les ventilateurs hélicoïdes et pour certains ventilateurs centrifuges (il est nécessaire s'il s'agit d'un ventilateur centrifuge, de choisir un ventilateur dont la puissance varie peu avec le débit).

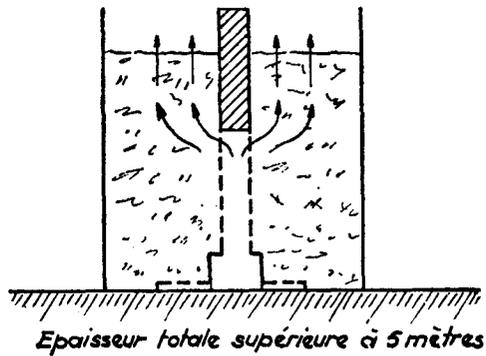
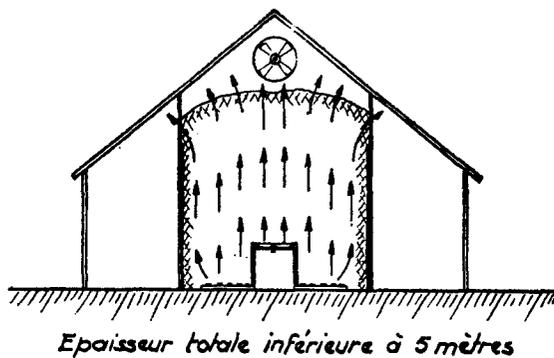


fig. 11 — Ventilation à plus et moins de 5 mètres de hauteur.

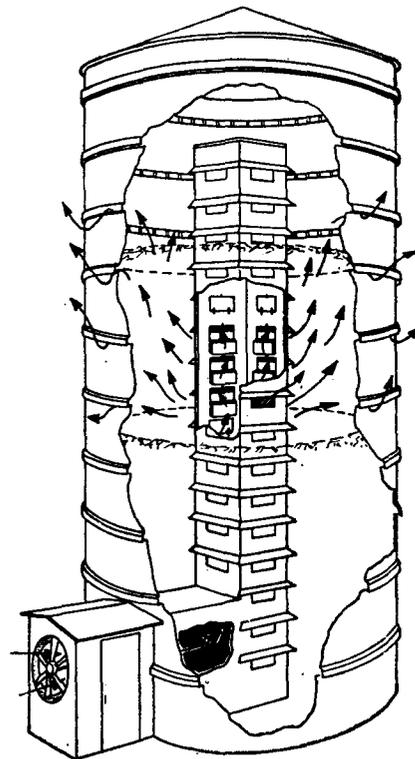


fig. 12 — Ventilation radiale.

En entassant le fourrage sur plus de 5 mètres (figure 11), le débit devient trop faible si on se contente d'entasser les couches sans précautions : on a alors recours à une solution utilisée dans les pays de montagne où les granges sont souvent très hautes (Allemagne, Suisse) et qui consiste à créer plusieurs cheminées au fur et à mesure que le tas s'élève : la seule couche de fourrage fraîchement entassé est ventilée et le débit devient à peu près indépendant de la hauteur totale du tas.

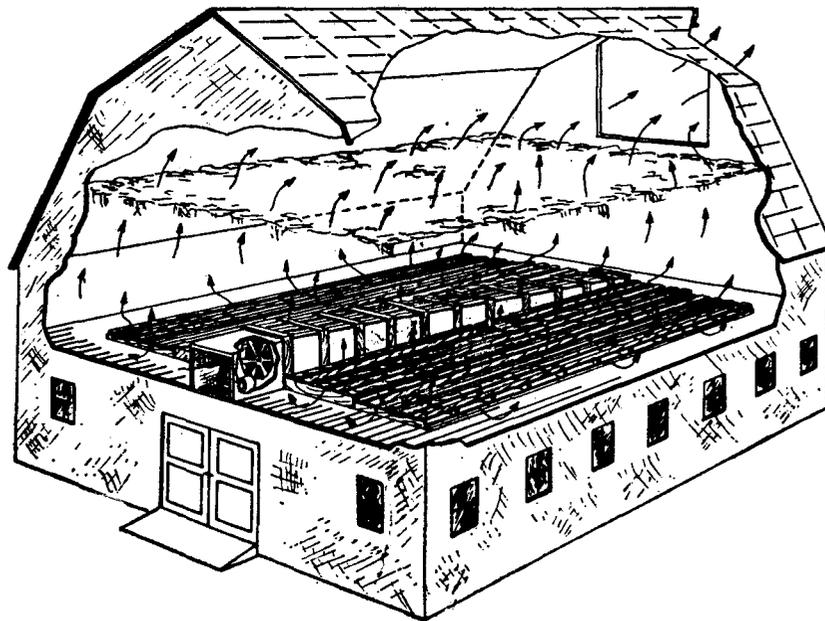


fig. 13 — Ventilation verticale.

II — REALISATION DES INSTALLATIONS

La structure de l'installation dépend des cas particuliers. *Le grand principe à respecter est de répartir également l'air dans toute la masse de fourrage à traverser.*

On utilise deux grandes catégories d'installations.

1. Installations à circulation d'air radiale

La figure 12 indique un schéma de cellule employé couramment aux Etats-Unis, où le volume des bâtiments est généralement restreint. Il s'agit en fait d'un véritable silo individuel, à parois perforées. L'air traverse le fourrage de la cheminée à la paroi ou de la paroi à la cheminée, suivant

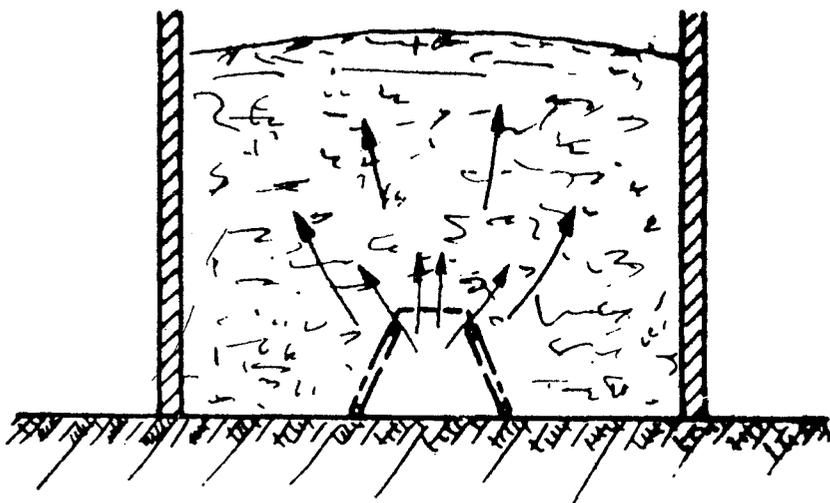
qu'on souffle ou qu'on aspire l'air. Des opercules obturent la cheminée là où il faut ; le conduit est assez grand pour qu'un homme puisse s'y déplacer. La section de la cheminée doit être en rapport avec le diamètre total du silo. On admet que la vitesse de l'air ne doit pas dépasser 5 m/s dans la cheminée ; les pressions nécessaires sont faibles car l'épaisseur de fourrage est faible. Le ventilateur hélicoïde convient particulièrement bien.

2. Installations à circulation d'air verticale

Ce sont les installations les plus courantes : elles utilisent les bâtiments disponibles. L'air circule du bas vers le haut. La figure 13 en donne un bon exemple. On y voit une canalisation principale, qui répartit l'air sous un caillebotis.

Dans le cas d'une aire étroite, le caillebotis peut être réduit et même supprimé (figure 14).

La figure 15 indique un exemple schématique de ventilation avec cheminées (cas où la hauteur de stockage dépasse 5 mètres).



152 fig. 14 — Ventilation avec gaine unique.

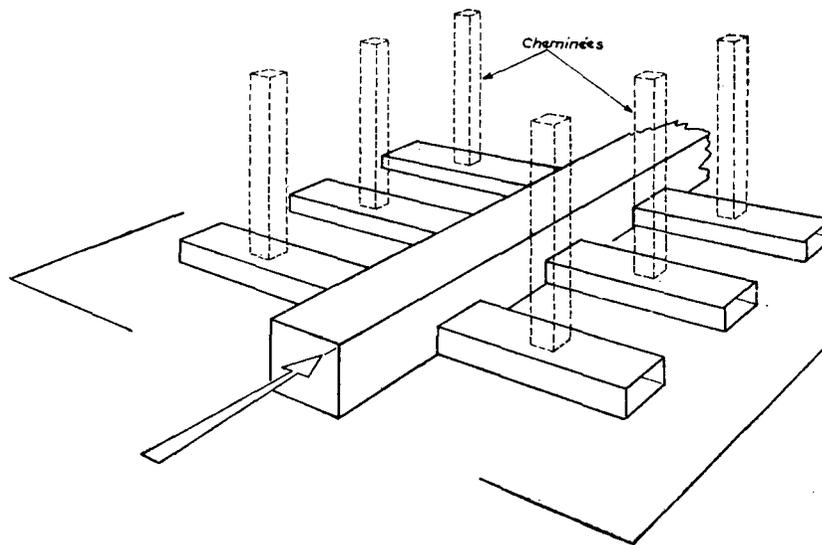


fig. 15 — Ventilation avec cheminées.

Dimensions des passages d'air

La canalisation principale doit avoir une section de passage telle que la vitesse de l'air ne dépasse pas 8 m/s pour le débit du ventilateur correspondant à la première couche de fourrage.

L'ouverture de passage de la canalisation principale au plancher à claire-voie ou aux gaines de répartition doit être telle que la vitesse de l'air y soit inférieure à 4 m/s ; suivant l'étendue du caillebotis, la hauteur de cette ouverture de passage peut varier de 6 à 25 cm.

Les lumières du caillebotis doivent avoir une surface égale à la moitié ou aux deux tiers de sa surface totale : l'écartement habituel est de 7 à 8 cm entre lattes.

Détails de réalisation

• *Canalisations*

La section de la canalisation principale peut diminuer à partir du ventilateur : l'air est mieux réparti. Mais cela nécessite une dépense supé-

rieure en matériaux de construction. La canalisation de hauteur constante a l'avantage d'être de montage plus simple. La section de la canalisation peut avoir toutes les formes (carré, rectangle, etc...) pourvu qu'on respecte les vitesses limites d'air.

Dans le cas d'une grande hauteur, on ménage des cheminées réparties à raison d'une pour 15 à 20 m² ; lors du remplissage de l'aire, on dispose des « bouchons » en bois, de 2 m de haut environ, à la partie supérieure du fourrage (figure 16) ; le bouchon est rehaussé chaque fois qu'une nouvelle couche de fourrage est installée ; il se crée ainsi une cheminée à mesure que l'épaisseur du fourrage augmente. Cette cheminée est destinée à favoriser la montée de l'air vers les dernières couches entassées et à les aérer de façon suffisante sans avoir recours à des pressions d'air trop élevées.

Dans le cas d'emploi d'un caillebotis, il faut que le fourrage le déborde largement (figure 17). Si cette précaution n'est pas prise une grande partie de l'air passe sur le côté, spécialement quand on charge de nouvelles couches.

Dans le cas où un mur limite le tas, la distance entre caillebotis et mur doit être de 80 cm environ, quelle que soit la hauteur.

Dans le cas où le tas est libre, il faut que le fourrage déborde de la moitié de la hauteur du tas $d = \frac{h}{2}$.

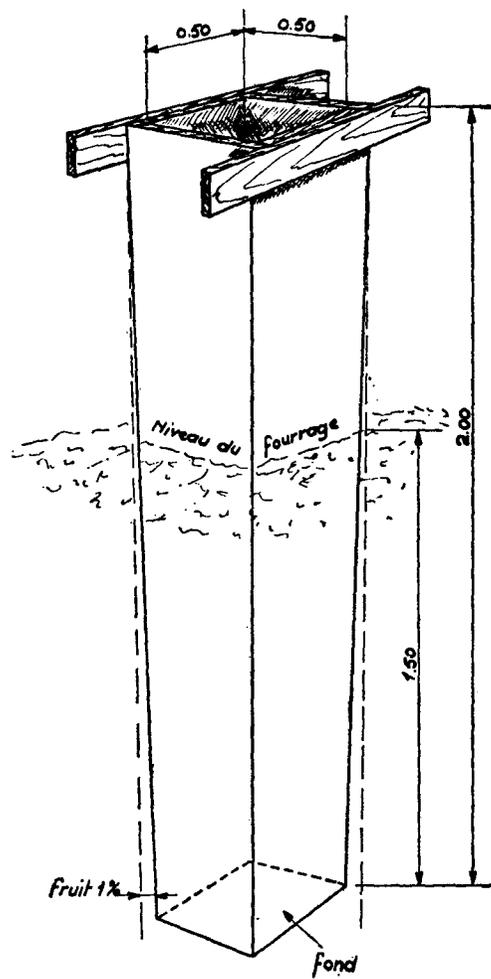
Il faut éviter les angles droits que font les murs entre eux en disposant un pan coupé étanche (en isorel dur par exemple) ; sans cette précaution, l'air passe dans l'angle : il est perdu pour le fourrage.

• *Plancher*

Le plancher doit être étanche à l'air. Si les planches qui le constituent sont disjointes, on peut réaliser l'étanchéité avec du papier fort ou du carton goudronné. Dans ce cas, il faudra évidemment reviser l'étanchéité après chaque vidange complète, et si besoin est, coller à nouveau du papier sur l'ancien.

Si l'on doit faire un séchoir à l'étage d'un bâtiment long (ex. fenil) le séchoir à gaine unique convient bien : on aménage alors des ouvertures dans ce plancher pour amener l'air provenant des ventilateurs (les ventilateurs sont placés sous la gaine).

Dans le cas de sol en terre, il peut être intéressant de creuser les canalisations dans le sol. Cette solution n'est à adopter qu'avec prudence,



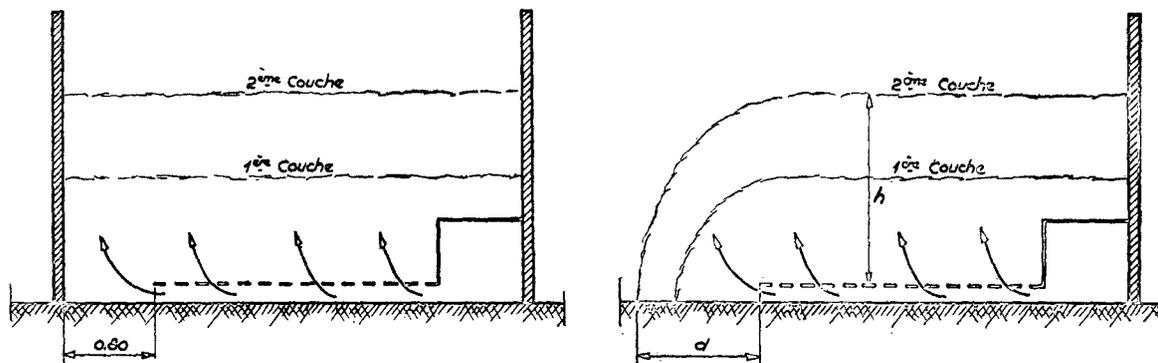


fig. 17 — Emplacement du tas sur le plancher à claire-voie.

parce que la seule humidité du sol ralentit la vitesse de séchage et les gaines peuvent se remplir d'eau de pluie.

• *Prise d'air du ventilateur*

La prise d'air doit avoir une section égale à 1,5 fois la section de la canalisation principale.

Lorsque le ventilateur fonctionne, les pales sont parfois invisibles, aussi est-il prudent de limiter la prise d'air par un grillage.

L'humidité relative de l'air est plus forte du côté à l'ombre que du côté ensoleillé, plus forte près du sol qu'en hauteur. Il faut en tenir compte pour l'établissement des prises d'air. Cependant, les différences sont assez faibles pour ne pas justifier l'adoption d'une solution complexe pour prendre l'air au Sud et en hauteur.

Il est toutefois important de placer l'entrée d'air à l'abri des pluies dominantes qui risquent d'endommager le ventilateur. Dans le cas où la prise d'air se trouve à côté de l'évacuation il est possible que l'air évacué soit à nouveau aspiré par le ventilateur, ce qui doit être absolument évité.

Les ouvertures de prise et d'évacuation doivent donc être opposées : la prise d'air du côté des vents dominants, l'évacuation du côté opposé aux vents dominants.

- *Bruit du ventilateur*

Le bruit du ventilateur peut être gênant spécialement dans le cas des grands ventilateurs hélicoïdes. On peut l'éliminer en partie par un dispositif d'insonorisation généralement obtenu à l'aide d'une chicane dont les parois seront tapissées d'un matériau mou (laine de verre, plaques de paille pressée). L'efficacité de ce dispositif sera complétée par une orientation adéquate de la prise d'air : l'ouverture doit être dans la direction opposée aux locaux d'habitation.

- *Evacuation de l'air usé*

L'évacuation de l'air usé doit être prévue, en utilisant une ouverture placée aussi haut que possible (lanterneau par exemple) : si l'on n'utilise pas de ventilateur pour évacuer l'air, la (ou les) ouverture doit être telle que la section totale de passage de l'air permette une vitesse de l'ordre de 1 m/s soit une section de 3 m² pour 10 000 m³/h ; on peut aussi utiliser un (ou des) ventilateur déplaceur d'air placé en haut du pignon par exemple, et dont le fonctionnement sera asservi à celui des ventilateurs principaux.

- *Protection du ventilateur*

Bien entendu, le branchement électrique doit être fait avec soin, car les risques d'incendie sont grands, et il faut placer un coffret disjoncteur de protection avant le ventilateur.

- *Réchauffage de l'air*

Les puissances calorifiques à mettre en jeu sont inférieures à 50 000 kcal/h. On peut utiliser comme source calorifique un simple brasero de coke, un poêle à mazout de ménage (à caléfaction) : ces procédés ont l'inconvénient majeur d'être difficiles à régler et de présenter de grands risques d'incendie. Il existe des réchauffeurs d'air spéciaux, à l'électricité ou au propane équipés de bons dispositifs de régulations.

Ces sources de chaleur doivent toujours être installées par des spécialistes : une résistance électrique mal placée peut conduire à des pertes de pression importantes, et le brûleur à propane peut provoquer des explosions si les dispositifs de sécurité (veilleuse, vanne automatique arrêtant le débit de gaz en cas d'extinction) ne sont pas prévus et mis en place par des installateurs compétents. Ces combustibles présentent l'avantage d'une grande souplesse d'utilisation : il est possible de faire varier d'une manière continue

la puissance calorifique fournie. Les appareils sont simples, dépourvus d'échangeur, très légers et peu coûteux à l'achat, mais le combustible est cher.

On peut aussi utiliser des « générateurs d'air chaud » utilisant à la fois le fuel domestique et le propane : le gaz liquéfié sert à pulvériser le fuel domestique.

Un générateur d'air chaud au charbon est un simple calorifère dont le tirage peut être accéléré et réglé par un ventilateur ; cet appareil est toujours muni d'un échangeur. Le réglage de la combustion doit être assuré par un thermostat efficace. Le calorifère doit présenter une autonomie suffisante de marche, 12 heures au moins. L'emploi d'un ventilateur entraîné par un moteur thermique, enfin, permet un réchauffage adéquat de l'air, par utilisation de la chaleur « perdue » par le moteur ; cette solution est particulièrement recommandable quand la puissance électrique disponible est insuffisante.

III — EMPLOI DE LA VENTILATION EN GRANGE

Il ne faut jamais oublier que le séchage dans le champ est le meilleur procédé lorsque les conditions sont favorables : pour sécher aussi vite du fourrage frais sur aire de séchage que dans le champ, par beau temps, il faudrait mettre en œuvre des débits spécifiques supérieurs à 1 500 m³/h par m³ de fourrage ! La ventilation en grange se contente donc de prendre le relai du fanage dans le champ pour parfaire la dessiccation : il faut toujours rentrer du fourrage aussi sec que possible ; l'opération de séchage en grange sera d'autant moins coûteuse.

En règle générale on engrange le lendemain de la coupe.

Dans le cas où le fourrage est ramassé à la presse, il faut faire des bottes moyennement serrées : si elles sont trop serrées, l'air ne passera pas au niveau du lien et le fourrage moisira, pas assez serrées il sera difficile de reprendre les bottes après séchage. Seule l'expérience permet de se rendre compte du serrage optimum.

1. Chargement

Le chargement doit faire l'objet d'un soin particulier, qu'il s'agisse de fourrage long, haché, ou pressé. Toute hétérogénéité dans le chargement se traduit par des difficultés ultérieures dans le séchage pouvant aller jusqu'à la moisissure des parties tassées. Il est indispensable de bien répartir le

fourrage *sans jamais marcher directement dessus* : il faut disposer sur le tas des planches, ou un caillebotis léger, ou une échelle qui serviront de plateforme de travail déplaçable. Le long des parois verticales le fourrage doit être plus tassé qu'ailleurs, d'autant plus qu'il est plus humide, car en cours de séchage il se produit un retrait de la masse qui laisse passer l'air en pure perte le long du mur.

L'épaisseur de la couche dépend de la quantité de fourrage apportée par la coupe : il faut utiliser toute la surface prévue à la construction sinon l'air passera là où il n'y a rien, et ne passera pas à travers le fourrage.

Il faut cependant éviter de mettre moins de 1 mètre d'épaisseur : le volume de la coupe doit donc être accordé à l'installation de ventilation.

Le tas doit déborder du caillebotis.

— 1^{re} couche : on peut mettre jusqu'à 2 mètres de hauteur ; cela dépend des indications données par celui qui a calculé l'installation. Si le fourrage est très humide il faut en mettre moins épais. Si par exemple, l'installation a été calculée pour du fourrage à 40 %, la hauteur pour du fourrage à 50 % devrait être réduite du tiers ou du quart (tout dépend du type de ventilateur employé).

— 2^e couche et suivantes :

Pour charger la couche suivante, il faut attendre que le séchage de la couche précédente soit à peu près terminé, ce qui est facile à vérifier soit en tâtant le fourrage en plusieurs endroits là où sort l'air, soit en mesurant la température de la dernière couche du fourrage, soit en mesurant l'humidité de l'air qui sort du fourrage. Il faut toujours se rappeler que le séchage progresse dans le sens du courant d'air et que c'est le fourrage se trouvant à la sortie de l'air qui est le dernier séché.

— Dans le cas où l'épaisseur finale du tas est de 5 mètres environ il faut mettre des couches d'autant plus minces que le tas est plus haut, et que le fourrage est rentré plus humide.

— Dans le cas d'une épaisseur totale supérieure à 5 mètres, on emploie des cheminées dont la fabrication a été décrite plus haut. L'épaisseur des couches à charger doit être légèrement décroissante avec la hauteur du tas, et doit être réduite si le fourrage est humide.

Dans le cas où le temps est défavorable il est indispensable de réduire la surface de chaque coupe de façon à mettre une épaisseur moindre de fourrage sur le tas. Si le temps redevient favorable augmenter la surface de la coupe et charger plus épais.

2. Conduite de la ventilation

Dans aucun cas on ne doit arrêter la ventilation même la nuit, même s'il pleut, même s'il y a du brouillard tant qu'il reste du fourrage humide dans le tas. S'il existait des ventilateurs à deux vitesses, on pourrait réduire le débit dans les moments défavorables, mais sans jamais descendre en dessous de 125 m³/h d'air par m³ de fourrage humide.

Lorsque la couche intéressée est considérée comme sèche on peut arrêter la ventilation, mais il faut revenir au bout de 24 heures, mettre en route le ventilateur et marcher au-dessus du tas (sur une échelle) : si certaines parties du tas ne sont pas parfaitement sèches on le reconnaît à la moiteur et à l'odeur dégagées. Il faut alors souffler quelques heures de plus.

1 — On ne dispose pas d'un réchauffage de l'air :

S'il fait assez beau, les couches successives de fourrage seront séchées sans encombre jusqu'à la teneur en eau de conservation de longue durée, c'est-à-dire au-dessus de 15 %.

Dans le cas contraire, il faudra se contenter de sécher le fourrage jusqu'à la teneur en eau que permet l'air disponible (plus de 15 %).

Dès que le tas est terminé et séché, on procède à un deuxième temps de séchage, destiné à amener *la totalité* du tas à la teneur en eau de longue conservation. On choisit alors, et seulement alors, les heures favorables à l'aide d'une mesure d'hygrométrie de l'air à environ 15 heures, et en reportant la valeur trouvée sur un graphique spécial. Il est commode d'utiliser un hygromètre à cheveux, mais cet appareil est peu précis et se dérègle facilement ; il est préférable d'utiliser un psychromètre, c'est-à-dire un couple de thermomètres dont l'un a son bulbe entouré d'un coton humidifié ; on place les deux thermomètres *dans la veine d'aspiration du ventilateur* ; la lecture prend une minute ; on reporte ensuite l'indication dans une table psychrométrique où on lit l'humidité relative de l'air.

Le deuxième temps de séchage peut durer plusieurs semaines : il faut vérifier comment évolue la teneur en eau de la dernière couche de fourrage traversée par l'air, et s'arrêter quand la teneur en eau de cette couche tombe en-dessous de 15 % d'eau. Il est recommandé de mesurer la teneur en eau du fourrage, au four ou à l'huile, les méthodes subjectives étant ici insuffisantes.

2 — On dispose d'un réchauffage de l'air :

Il faut considérer le réchauffage de l'air comme une assurance contre le mauvais temps, qui intervient seulement en cas de nécessité. En effet, le réchauffage de l'air est toujours coûteux et il faut l'éviter s'il n'est pas

absolument nécessaire (à moins que l'installation n'ait été conçue avec l'emploi constant du réchauffage, dans un climat très défavorable par exemple).

Dans le cas où le climat n'est pas très défavorable il peut suffire de sécher le fourrage avec l'air tel qu'il est, couche par couche. Quand le tas est terminé et séché, on parfait le séchage en un deuxième temps avec de l'air réchauffé, jusqu'à dessiccation convenable de la dernière couche.

Le problème est de ne pas trop chauffer. En se basant sur la mesure de l'hygrométrie relative de l'air on peut utiliser un graphique établi à partir des données météorologiques qui donne l'élévation de température à réaliser, ou la durée journalière de la chauffe avec résistance électrique... etc..., suivant la valeur de l'hygrométrie à 15 heures.

Dans le cas où le climat est franchement défavorable, plus de 80 % d'humidité *en moyenne* il faut chauffer dès le début, en réglant le chauffage comme il vient d'être dit suivant l'hygrométrie de l'air à 15 heures ; on sèche le fourrage en un seul temps.

Remarques sur la conduite de la ventilation

1 — Le séchage en deux temps, qu'il fasse appel à de l'air réchauffé, ou non, ne peut être utilisé dans les tas de fourrage où il y a des cheminées, car on ne peut parfaire le séchage des couches inférieures.

2 — Le choix des heures de ventilation, ou de l'intensité du réchauffage en fonction des caractéristiques de l'air peut être rendu automatique.

3 — CHOIX TECHNIQUE ET ECONOMIQUE

I — GENERALITES

Il ne faut pas perdre de vue que l'installation de séchage et de conservation prend le relai du chantier extérieur de récolte et de fanage. Il y a un lien technique évident entre le chantier extérieur et l'installation de séchage, cette dernière devant être physiquement adaptée au chantier de récolte. Quant à l'économie du projet, elle ne peut être raisonnée que dans l'ensemble englobant à la fois ces deux parties et la distribution aux animaux.

Les opérations de récolte-conservation consistent à prendre la récolte sur pied dans le champ et à la mettre à la disposition de l'animal en temps voulu.

La récolte sur pied représentant une certaine valeur potentielle, pour amener le fourrage à la disposition de l'animal, l'agriculteur doit consentir deux dépenses distinctes :

— *la dépense visible* causée par le chantier (amortissement des machines et des bâtiments, entretien, dépenses de main-d'œuvre et d'énergie),

— *la dépense occulte* correspondant à la perte de valeur nutritive du fourrage.

Le coût total des opérations rapporté à la valeur origine potentielle du fourrage sur pied est donc la somme de deux termes :

coût total = coût visible du chantier + coût occulte dû aux pertes.

Le chantier le plus économique est celui dont le coût total est le plus bas.

Le coût visible du chantier est assez facile à apprécier : un chantier bien adapté techniquement coûte 15 à 25 % de la valeur d'origine du fourrage.

Le coût occulte dû aux pertes dans un chantier traditionnel ne recourant pas au séchage en grange est important et extrêmement variable : il varie de 20 à 60 % de la valeur d'origine. (C'est cette variation même, due aux aléas climatiques qui est à l'origine de l'emploi de méthodes de travail moins sensibles au climat, dont fait partie la ventilation en grange).

L'introduction de la ventilation en grange accroît généralement le coût visible, car la réduction de la dépense due à la simplification du chantier de récolte proprement dit ne compense pas l'accroissement de dépense due à la ventilation. Le coût occulte doit donc être abaissé dans le cas de la ventilation en grange : la diminution des pertes est due dans ce cas :

— au fait que la ventilation soustrait dans une certaine mesure le fourrage aux aléas climatiques, la ventilation permet d'accueillir en grange le fourrage après un séjour de 2 jours environ sur le champ au lieu des 4 à 7 jours nécessaires ou plus sans son intervention : il est évidemment plus facile de trouver 2 jours consécutifs de beau temps que 4 ou 6 jours. Cet avantage est très difficile à chiffrer et dépend des types de climat : on peut le considérer comme une assurance contre le mauvais temps ;

— au fait que la ventilation donne lieu — *si elle est suffisante* — à une perte moindre de valeur, car :

- il y a dans tous les cas moins de perte mécanique car les opérations de fanage étant moins nombreuses le fourrage est moins cassant à la reprise ;

- il y a moins de perte de qualité par fermentation, *à la condition que la ventilation sèche le fourrage assez vite.*

Le problème économique est finalement de trouver, compte tenu de la dimension et de la structure de l'exploitation, *pour quelle valeur du coût visible* (du chantier global récolte + conservation) le coût total est le plus faible. En outre, il faut déterminer dans le coût visible *quelle doit être la part*

du chantier récolte et du chantier conservation (on peut par exemple réduire le plus possible le coût visible du chantier de récolte, en procédant au hachage et au chargement simultané ; le produit à sécher est très riche en eau et le coût visible du chantier de séchage est très important ; par contre le coût occulte dû aux pertes est très faible : c'est le cas des usines de déshydratation du fourrage).

Il y a donc à distinguer dans le choix économique d'un chantier de récolte-conservation :

- la part technique dévolue au chantier de récolte,
- la part technique dévolue au chantier de conservation,
- le coût visible de chacun des chantiers,
- le coût occulte dû aux pertes de chacun des chantiers.

Le choix optimum est-il possible ?

Dans l'état actuel des connaissances, l'évaluation du coût occulte dû aux pertes est extrêmement imprécise : *l'imprécision est de l'ordre de grandeur du coût visible du chantier !* Il en résulte qu'on ne peut faire de choix justifié ; il y a de grands progrès à apporter dans ce sens.

Ainsi s'attache-t-on actuellement à un objectif plus limité qui est de définir non le coût visible optimum, mais le seuil à partir duquel le chantier de conservation en grange est favorable.

Il s'agit de savoir :

— à quelle teneur en eau on choisit de rentrer le fourrage : il est évident que le coût visible du chantier de conservation est d'autant plus élevé que le fourrage est rentré plus humide,

— quelle est alors la dépense minimum à consentir pour que l'emploi de la ventilation soit favorable.

Il est très important de souligner qu'une installation de ventilation doit en tout état de cause conduire à une perte de qualité moindre que celle qui se produirait dans un chantier traditionnel. *Il faut toujours que la durée de dessiccation en grange soit inférieure à ce qu'elle aurait été sur le champ à partir du moment où le fourrage est retiré du champ.*

On admet actuellement que le fourrage destiné à la ventilation est normalement rentré à 40 % (M.H.) mais que les installations doivent pouvoir traiter du fourrage rentré à 50 % en cas de temps exceptionnellement défavorable.

La dépense à consentir pour que l'intervention de la ventilation soit utile doit être telle que la durée du séchage n'excède pas 4 jours dans le cas normal, 7 jours dans le cas le plus défavorable.

On peut se demander s'il est intéressant d'accroître la vitesse de séchage, le coût visible augmentant et le coût occulte diminuant : c'est là un des aspects de la recherche du chantier optimum ; les connaissances actuelles ne permettent pas de répondre à cette question.

Il paraît important de répéter qu'une installation de ventilation doit en tout état de cause conduire à une perte de qualité moindre que celle qui se produirait dans le chantier traditionnel : il faut toujours que la durée de dessiccation en grange soit inférieure à ce qu'elle aurait été sur le champ à partir du moment où le fourrage est retiré du champ.

II — COUT DU SECHAGE EN GRANGE

Pour fixer les idées nous donnons ci-dessous quelques indications sur le coût du séchage en grange (en 1961).

On suppose que la capacité de stockage existe et que le climat est assez favorable.

Le coût du motoventilateur installé

Il est de l'ordre de 1 000 à 1 500 NF pour 100 m².

Le coût des conduits de répartition d'air, caillebotis... etc.

Il est du même ordre que celui du ventilateur, soit 1 500 NF pour 100 m².

Amortissement

La durée d'amortissement à prendre en compte est de 10 ans pour le groupe motoventilateur et 3 ans seulement pour les gaines qui demandent un entretien constant.

Coût annuel

Si la hauteur de fourrage est de 5 mètres, le poids de fourrage est de l'ordre de 50 tonnes.

Le coût correspondant à l'annuité d'amortissement - entretien sera donc de l'ordre de 8 à 12 NF par tonne.

L'énergie électrique nécessaire pour sécher une tonne de fourrage étant de l'ordre de 80 à 100 kWh par tonne, le coût de l'énergie est de :

8 à 10 NF par tonne (électricité à 0,10 NF/kWh)

164 ou 12 à 15 NF par tonne (électricité à 0,15 NF/kWh)

Au total le coût annuel de la ventilation d'une tonne de foin sec atteint 15 à 25 NF par tonne.

Le coût d'une installation réelle variera dans une très large mesure avec les conditions locales et le climat. Il est important de l'apprécier dans chaque cas particulier. Si l'on compare ce coût « visible » à la réduction de coût « occulte » due à l'emploi de cette technique on voit que le seuil de rentabilité correspond à une perte de valeur de l'ordre de 10 % de la valeur origine du fourrage. En d'autres termes, si la ventilation en grange permet, comparée à la récolte avec fanage dans le champ, d'économiser 10 % sur les pertes, il est bon de l'utiliser. Il semble que la simple réduction de risque dû au mauvais temps soit de cet ordre et que l'engouement manifesté par les agriculteurs pour la ventilation soit justifié.

Mais il ne s'agit là que du dépassement d'un seuil économique : tous nos efforts doivent tendre dans l'avenir à aller au-delà et à présenter aux utilisateurs les solutions optimum qu'ils sont en droit d'exiger.

C. JOUIN

Ingénieur du Génie Rural au C.N.E.E.M.A.