



Rapports FAT

Station fédérale de recherches d'économie d'entreprise et de génie rural (FAT)

CH-8356 Tänikon TG Tél. 052-62 31 31

Août 1992

406

La ventilation du foin de A à Z

Jürg Baumgartner

Sommaire page 2

Le nombre des exploitations utilisant une installation de ventilation du foin continue à augmenter d'année en année. Selon le dernier recensement fédéral des entreprises, 43 561 installations de ce genre étaient en service en 1990. Depuis 1985, leur nombre a augmenté de 4607 unités ou de 920 par année. En même temps, le nombre de capteurs solaires est monté de 652 à 1534, ce qui correspond à une augmentation annuelle d'environ 180. S'y ajoutaient 1190 pompes à chaleur, recensées pour la première fois.

Un tiers des installations, dont beaucoup avec un ventilateur axial, ont un âge de vingt ans et plus. L'utilisation de capteurs solaires et les pressions accrues des tas de foin, dues à des coupes prématurées et à des taux d'humidité plus élevés du foin engrangé, demandent des ventilateurs radiaux, assurant une augmentation régulière de la pression. Le présent guide aide à choisir le ventilateur le plus approprié parmi les modèles figurant sur la liste actuelle et dont les données techniques ont été mesurées par la FAT. Il donne, en plus, quelques conseils quant à l'alimentation et à l'utilisation d'une installation de séchage en grange. D'autres chapitres renseignent sur les capteurs solaires et les pompes à chaleur.

Un hectare (ha) d'herbe fraîchement fauchée donne environ 30 décitonnes (1 dt = 100 kg) de matière sèche (MS). La teneur en MS s'élève à environ 18%, ce qui signifie que cette herbe contient encore 136.7 dt d'eau (fig. 1). Afin d'arriver à une teneur en MS d'environ 88%, taux auquel le fourrage peut être stocké, il faut faire évaporer 132.6 dt. Avec une installation de ventilation de 100 m² de surface de base, il faut toujours s'attendre à du fourrage gâté par la formation de moisissure. Ce n'est

que par la mise en œuvre d'une technique sophistiquée, par ex. dans une entreprise de déshydratation, qu'une quantité si importante d'eau peut être éliminée en trois à quatre heures et, par conséquent, sans pertes notables. Une telle capacité exige beaucoup d'énergie (environ 40 l de mazout et 12 kWh de courant électrique par dt d'herbe sèche).

Le préséchage sur place par la chaleur du soleil est toujours meilleur marché. Il reste toutefois des quantités consi-

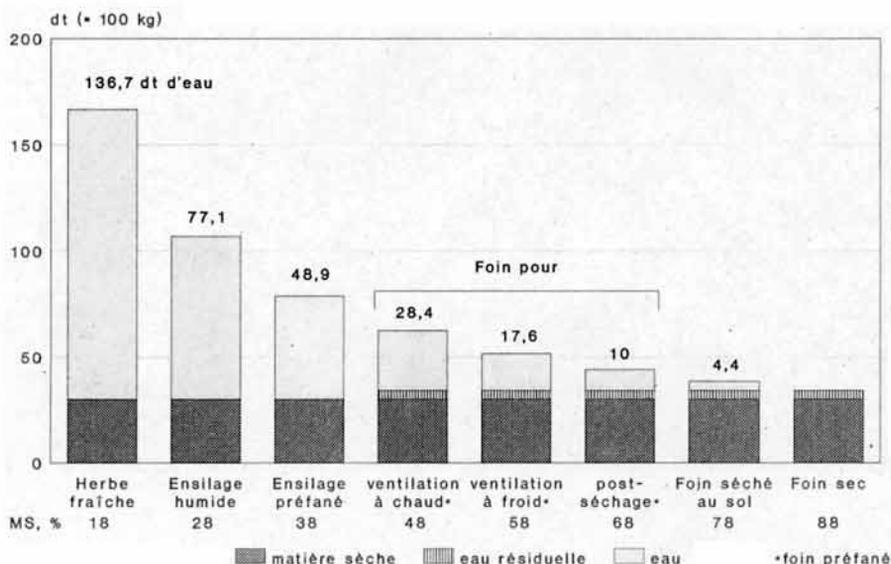


Fig. 1: La quantité d'eau à éliminer dépend du degré de préfanage. L'installation de ventilation peut exceptionnellement être alimentée de foin coupé et rentré le même jour (teneur en MS: env. 40%), mais seulement en une quantité limitée. Le foin séché au sol exsude un peu d'eau par suite de l'échauffement spontané.

Sommaire	Page
1. Planification d'une installation de ventilation du foin	3
1.1 Installation de séchage en surface	3
1.2 Calcul du besoin en foin	3
1.2.1 Détermination approximative du poids spécifique	4
1.2.2 Calcul du volume du tas	4
1.3 Détermination de la surface de base (AS) du tas	4
1.3.1 Forme du tas	4
1.3.2 Dimensions recommandées pour le tas	4
1.3.3 Tas de foin et de regain séparés?	4
1.4 Autres mesures	5
2. Choix du ventilateur	6
2.1 Débit d'air (QW)	6
2.2 Pression d'air (pW)	6
2.3 Choix du ventilateur	6
2.3.1 Contrôle du débit d'air minimal (QK)	7
2.3.2 Pression d'air (pK) à raison du débit d'air minimal	7
2.4 Pression de réserve (pD)	7
2.5 Puissance absorbée (Nel)	7
2.6 Rendement (Eta)	8
2.7 Bruit	8
2.8 Ventilateur radial ou axial? Plusieurs ventilateurs ou un seul?	10
2.9 Autres critères de sélection	11
3. Canaux d'aspiration et d'amenée d'air	12
3.1 Canal d'aspiration d'air	12
3.2 Canal d'amenée	12
3.3 Sortie de l'air	14
4. Grille	15
5. Cloisonnement	17
5.1 Construction à poutres	17
5.2 Revêtement de l'ossature	18
5.3 Ouvertures de prélèvement du fourrage	19
6. Plancher et sol	19
7. Dispositif de commande	20
7.1 Minuterie	20
7.2 Appareil de commande	20
7.3 Commande automatique	20
7.4 Utilisation de l'installation	21
8. Contrôle de la pression d'air	22
9. Capacité de séchage de l'installation	23
10. Procédés de ventilation	24
10.1 Ventilation à froid	24
10.2 Capteur solaire	24
10.3 Pompe à chaleur	28
11. Besoins d'investissement et énergie nécessaire	30
12. Conclusion	30
13. Bibliographie	32

dérables d'eau à évaporer par ventilation, suivant le degré de préséchage. Le graphique à bandes (fig. 1) montre que la ventilation à chaud (capteur solaire, pompe à chaleur ou poêle à air chaud avec chauffage au mazout) permet d'éliminer environ trois fois plus d'eau que le procédé «postséchage» (28.4 et 10 dt). Ce dernier dépend davantage des conditions météorologiques et implique davantage de pertes au champ puisqu'il demande généralement plus de deux jours de beau temps pour le préséchage sur place. Les installations de ventilation par le haut (fig. 2), les tours à foin (fig. 3) ainsi que les installations où l'air est aspiré au lieu d'être insufflé (fig. 4) se prêtent tout au plus à un postséchage, mais non pas au séchage de foin dont la teneur en MS est inférieure à 70%. Notons en plus que les installations de ventilation par le haut et les installations avec aspirateur ne peuvent être équipées ni d'un capteur solaire, ni d'une pompe à chaleur.



Fig. 3: Les tours à foin, de même que les installations de ventilation par le haut, ne se prêtent qu'à un léger postséchage et peuvent être utilisées pour prévenir l'échauffement spontané du foin. Pour autant que l'alimentation mécanique et le prélèvement mécanique du fourrage sont concernés, elles n'ont pas répondu aux attentes.

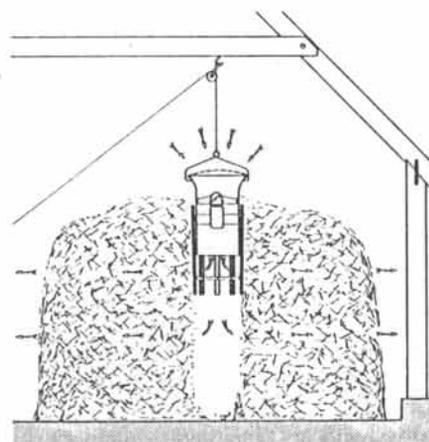


Fig. 2: Une installation de ventilation par le haut se prête à des tas de jusqu'à 50 m² de surface de base. L'air humide sortant du foin est réaspiré par le ventilateur au-dessus du tas. La grange doit être bien aérée, sinon les résultats sont peu satisfaisants.

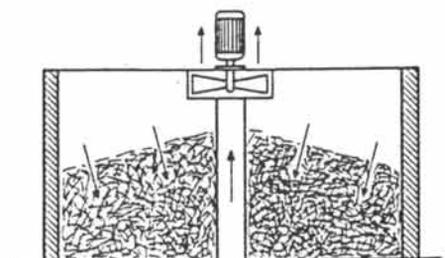


Fig. 4: La capacité de séchage d'une installation avec aspirateur est faible et ne peut guère être comparée à celle d'une installation de séchage en surface. Un ventilateur radial aspire l'air humide par un tuyau et le fait sortir du tas. Il est commandé par un thermostat placé à l'intérieur du foin.

1. Planification d'une installation de ventilation du foin

1.1 Installation de séchage en surface

En planifiant une nouvelle construction ou une transformation, on prévoit généralement une installation de ventilation par le bas, le tas de foin étant placé sur une grille (fig. 5). Les installations avec un canal principal et plusieurs canaux secondaires ne se sont pas imposées parce que le foin séchait irrégulièrement.

Comment planifier une installation de ventilation? Tout d'abord, il s'agit de déterminer l'encombrement aussi exactement que possible.

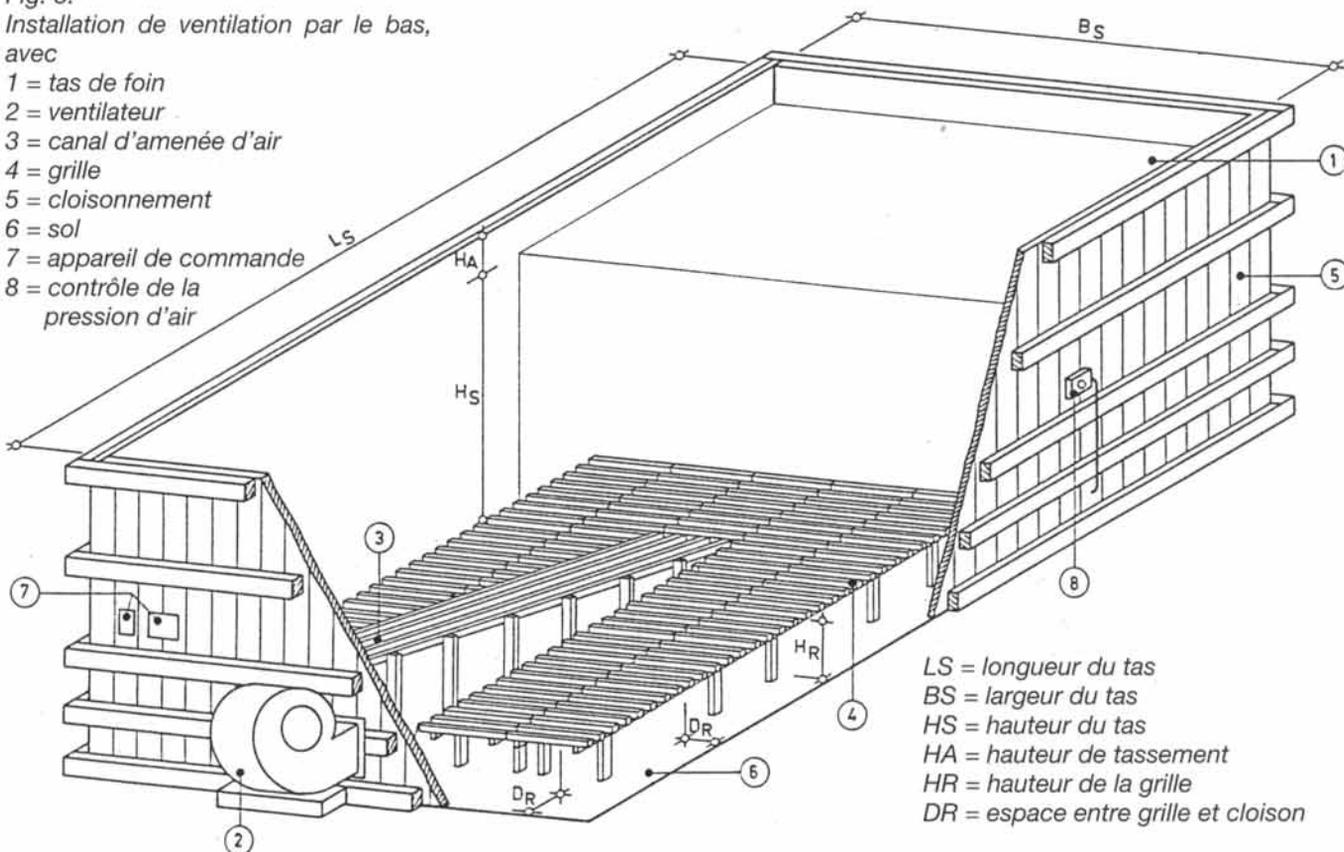
1.2 Calcul du besoin en foin

Le besoin en foin dépend des facteurs suivants:

- genre et nombre d'animaux consommant du fourrage grossier;
- durée de la période d'affouragement d'hiver (150 à 210 jours);

Fig. 5:
Installation de ventilation par le bas, avec

- 1 = tas de foin
- 2 = ventilateur
- 3 = canal d'amenée d'air
- 4 = grille
- 5 = cloisonnement
- 6 = sol
- 7 = appareil de commande
- 8 = contrôle de la pression d'air



- proportion de foin dans la ration fourragère, en kg de MS (compte tenu de l'ensilage, de l'herbe déshydratée, des aliments énergétiques, des aliments de production, des betteraves fourragères, etc.);

- vente ou achat régulier de foin. Le tableau 1 montre un calcul possible. Un autre calcul de la quantité de foin passe par l'estimation du rendement de la récolte et les surfaces de foin correspondantes.

Tableau 1: Calcul du besoin en foin

(les espaces vides servent à une planification concrète)

16__ vaches avec 4800 kg de lait	16 kg MS =	256 kg MS	_____ kg MS
4__ bovins d'élevage, 6 à 12 mois	4,5 kg MS =	18 kg MS	_____ kg MS
5__ bovins d'élevage, 13 à 18 mois	6,5 kg MS =	32,5 kg MS	_____ kg MS
3__ bovins d'élevage, 19 à 24 mois	8,5 kg MS =	25,5 kg MS	_____ kg MS
Total par jour		332 kg MS	_____ kg MS
Besoin pour 200 jours		66 400 kg MS	_____ kg MS
dont 1/3 foin		= 22 130 kg MS	_____ kg MS
15% de réserve		3 320 kg MS	_____ kg MS
Besoin en MS pour la période d'hiver		25 450 kg MS	_____ kg MS
Besoin en foin (88% MS)		28 920 kg foin	_____ kg foin
Foin vendu		10 680 kg foin	_____ kg foin
Total		<u>39 600 kg foin</u>	_____ kg foin

1.2.1 Détermination approximative du poids spécifique

Selon une étude effectuée à la FAT, le poids spécifique du foin peut aller de 51 à 129 kg de MS par m³. Il n'est donc pas possible d'indiquer une norme valable pour la Suisse entière.

Des résultats plus récents montrent que le poids spécifique dépend du stade d'utilisation, c'est-à-dire de la proportion de fibres brutes contenues dans le foin, et que la hauteur du tas joue également un rôle. L'influence de ces deux facteurs ressort du tableau 2. Le poids spécifique du foin engrangé au moyen de la griffe est de jusqu'à 20% inférieur par rapport au foin rentré à l'aide de la souffleuse. Les facteurs faisant augmenter le poids spécifique sont les suivants:

- grandes hauteurs de couche à l'engrangement;
- faible teneur en MS (humidité élevée à l'engrangement);
- fourrage fin et jeune;
- foin préfané, coupé court;
- fourrage riche en trèfle ou en herbes;
- travail mécanique au champ, par ex. écrasement;
- précompactage lors de la coupe par l'autochargeuse.

1.2.2 Calcul du volume du tas

Le volume nécessaire du tas se calcule selon la formule suivante:

volume du tas en m³ =

$$\frac{\text{quantité totale de foin en kg}}{\text{poids spécifique en kg/m}^3}$$

Exemple: $\frac{39\,600 \text{ kg}}{80 \text{ kg/m}^3} = 495 \text{ m}^3$

$$\frac{\text{kg}}{\text{kg/m}^3} = \dots \text{ m}^3$$

Tableau 2: Poids spécifique de foin avec 88% de MS

Stade d'utilisation selon ADCF*		Poids spécifique, kg/m ³	
		Hauteur du tas	
		3 m	6 m
2 à 3	précoce à mi-précoce	90	100
3 à 4	mi-précoce à mi-tardif	80	90
4 à 5	mi-tardif à tardif	70	80

* Association pour le développement de la culture fourragère

1.3 Détermination de la surface de base (AS) du tas

La hauteur du tas (HS dans la fig. 5) est à limiter à 5 m au maximum. Des tas plus hauts demandent trop de pression pour presser l'air de séchage à travers le foin.

En cas d'une nouvelle construction et d'affouragement uniquement au foin, on peut fonder la planification sur la norme de 7 à 8 m² de base par UGB. Il faut 1 à 2 m² de moins si le poids spécifique du foin est élevé (100 kg/m³) et 1 à 2 m² de plus si celui-ci est bas (70 kg/m³).

La surface de base du tas se conforme soit au plan de l'architecte, soit aux possibilités qu'offre le bâtiment existant. Le plan horizontal dépend souvent de l'écartement des fermes et non pas des dimensions optimales pour la ventilation.

Le calcul suivant donne la hauteur du tas:

$$\text{hauteur (HS) du tas en m} = \frac{\text{volume du tas en m}^3}{\text{surface de base en m}^2}$$

Exemple: $\frac{495 \text{ m}^3}{110 \text{ m}^2} = 4,5 \text{ m}$

$$\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2} = \dots \text{ m}$$

1.3.1 Forme du tas

Les tas longs et étroits (par ex. 5 x 20 m) sont plus difficiles à ventiler que les tas carrés ou ceux à base rectangulaire avec un rapport de 1:1.5 des côtés. La largeur maximale du tas dépend du système de déchargement. Dans le cas de la souffleuse avec répartiteur téléscopique, elle est limitée à 14 m.

1.3.2 Dimensions recommandées pour le tas

Il est indiqué de séparer en deux les tas de plus de 150 m² de surface de base. Il ne faut pas de cloison entre les deux demi-tas; il suffit d'interrompre la grille (fig. 6).

Les tas de plus de 150 m² de base comportent les inconvénients suivants:

- dans le cas d'une faible quantité de fourrage rentré, celui-ci ne peut pas être réparti régulièrement; aux endroits peu recouverts de fourrage humide ou pas du tout, une quantité trop importante d'air s'échappe, inutilisée, à travers les surfaces déjà sèches;
- les canaux d'aspiration et d'amenée d'air doivent être très largement dimensionnés pour ne pas être source de pertes de pression élevées; un ventilateur de 15 kW demande déjà un canal de 4 m² de section transversale;
- l'utilisation d'un capteur solaire est problématique; celui-ci doit présenter une grande surface pour que l'air soit chauffé de 5 à 6° C (= échauffement minimal que l'on cherche à atteindre);
- les installations comprenant une pompe à chaleur ou un déshumidificateur demandent une haute puissance de raccordement et occasionnent des frais d'investissement élevés.

1.3.3 Tas de foin et de regain séparés?

Le foin et le regain ne devraient pas être stockés séparément, car une séparation réduirait la capacité de séchage de 50% et ferait donc doubler la durée de séchage. La rentrée de la totalité du foin sur la moitié de la surface du tas donnerait par journée d'engrangement des hauteurs de couche élevées, liées à des pressions d'air accrues. Des problèmes dus à des durées de ventilation trop longues en seraient la conséquence (formation de moisissure).

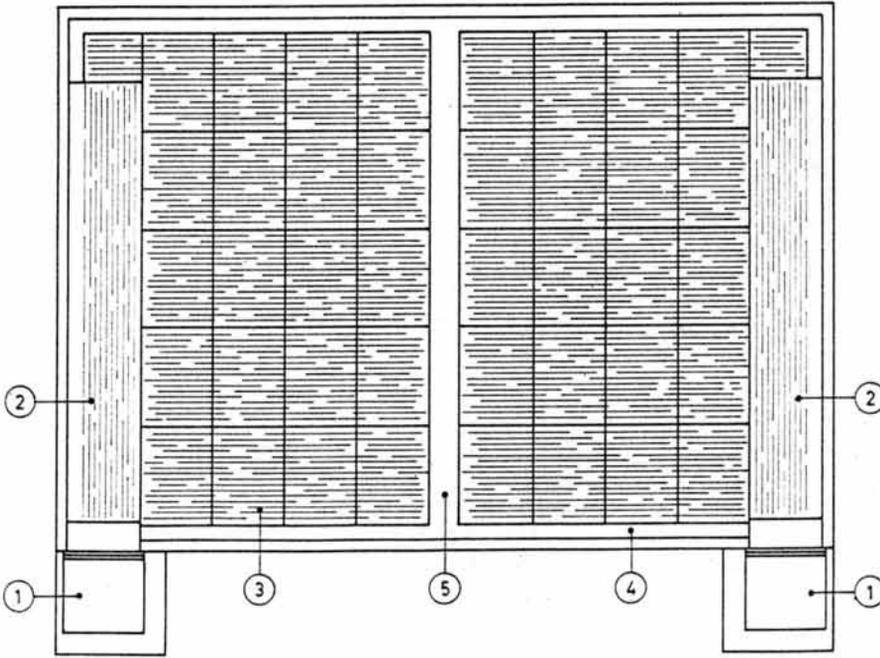


Fig. 6: Il ne faut pas de cloison de séparation si les deux demi-tas sont alimentés simultanément. Les ventilateurs (1) et les canaux d'amenée (2) font passer l'air sous les deux grilles (3). L'écartement des grilles (5) est deux fois plus grand que la distance (4) entre les grilles et la cloison.

le processus de séchage correspond à environ 20% de la hauteur de remplissage (= 20 cm pour 1 m de hauteur de couche).

La valeur DR détermine l'espace entre la grille et le cloisonnement. Elle doit être calculée de façon à ce que la surface de la grille s'élève à 75% de la surface de base du tas. Des valeurs indicatives se trouvent dans le tableau 3.

L'alimentation simultanée de deux tas (foin et regain mélangés) et l'utilisation de deux ventilateurs donnent, par contre, un séchage efficace.

1.4 Autres mesures

En planifiant une installation de ventilation, il ne faut pas oublier les mesures diminuant soit le volume du tas, soit l'effet de séchage. La hauteur de la grille (HR) doit être de 30 cm pour des tas de jusqu'à environ 50 m² de base, de 35 cm pour des tas de 50 à 100 m² et de 40 cm pour des tas plus grands. La hauteur (HA) à compter pour le tassement du foin qui se produit pendant

Tableau 3: Distance (DR) entre la grille et la cloison, en fonction de la surface de base du tas, en cm

Largeur du tas (BS) en m	Longueur du tas (LS) en m												
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
4	30	30	35	35	35	35	35	40	40	40	40	40	40
5	35	40	40	40	40	45	45	45	45	45	45	50	50
6	40	40	45	45	45	50	50	50	50	55	55	55	55
7	45	45	50	50	55	55	55	55	60	60	60	60	65
8	45	50	55	55	55	60	60	65	65	65	65	70	70
9	50	55	55	60	60	65	65	70	70	70	70	75	75
10	55	55	60	65	65	70	70	70	75	75	80	80	80
11	55	60	65	65	70	70	75	75	80	80	85	85	85
12	55	60	65	70	70	75	80	80	85	85	85	90	90
13	60	65	70	70	75	80	80	85	90	90	90	95	95
14	60	65	70	75	80	80	85	90	90	95	95	100	100

← les tas plus grands sont à séparer en deux

2. Choix du ventilateur

Le choix du ventilateur dépend en premier lieu de la surface de base et de la hauteur du tas. Ces deux valeurs déterminent le débit et la pression d'air nécessaires. Le rendement du ventilateur et son intensité sonore (bruit) sont d'autres critères de sélection. L'altitude et la température ambiante limitent la puissance absorbée du moteur. Le prix, le service après-vente, etc. jouent naturellement aussi un rôle. Le tableau 4 montre un calcul modèle pouvant servir d'exemple pour le choix du ventilateur.

2.1 Débit d'air (QW)

Le débit d'air optimal (QW) du ventilateur dépend de la surface de base (AS) du tas et s'élève à 0.11 m³/s par m² de surface. Pour un tas de 110 m² de base (exemple dans le tableau 4), il faut donc un débit d'air de 12.1 m³/s. Si le foin est normalement rentré le deuxième jour après la coupe, le débit peut être réduit de jusqu'à 10%. Il faut, par contre, jusqu'à 10% de plus si l'on fait sécher du foin préfané lourd avec moins de 60% de MS. Un excès d'air débouche sur une pression accrue avec une consommation d'énergie électrique correspondante. A noter, en plus, que la capacité de séchage ne peut guère être améliorée par une augmentation du débit d'air.

2.2 Pression d'air (pW)

Le débit et la pression d'air (pW) vont de pair. La pression nécessaire dépend de la hauteur du tas (HS), de la composition botanique du fourrage et du débit d'air spécifique (VL, tableau 5). Pour l'estimer, on part de la demi-hauteur du tas. Si l'installation de ventilation comprend un capteur solaire, une pompe à chaleur ou un déshumidificateur, il faut calculer un supplément (Z, tableau 5). Le poêle à mazout et les autres appareils équipés d'un ventilateur auxiliaire ne demandent pas de pression supplémentaire. Un tas de 4.5 m de

Tableau 4: Calcul modèle pour le choix du ventilateur

Calcul		Exemple	Planification concrète				
Base AS du tas (m ²):	selon chapitre 1.3	110	_____				
Hauteur HS du tas (m):	selon chapitre 1.3	4,5	_____				
Choix du ventilateur:							
Débit d'air QW (m ³ /s):	= AS x 0,11 – 10%	10,9 – 12,1	_____				
Pression d'air pW (mbar):	= 0,5 x HS x PF1 + Z1 (PF1, Z1 selon tableau 5)	4,8	_____				
Contrôle:							
Débit d'air QK (m ³ /s):	= AS x 0,07	min. 7,7	min. _____				
Pression d'air pK (mbar):	= HS x PF2 + Z2 (PF2, Z2 selon tableau 5)	5,5	_____				
Pression d'air pD (mbar):	= pK + 2	7,5	_____				
FAT n°.	QW (m ³ /s)	QK (m ³ /s)	pmax- pD (mbar)	Nel/ NelN (%)	Eta (%)	Bruit dB(A)	Prix Fr.
0001	7,1	–	–	–	–	–	–
0002	11,1	10,6	3,6	15	49	73	7500.–
0003	11,8	11,0	4,1	17	43	72	8000.–
0004	10,9	8,8	-0,6	–	–	–	–
Votre choix:							

haut exige une pression d'air de 4.8 mbar, y compris la pression supplémentaire pour le capteur solaire.

2.3 Choix du ventilateur

Après avoir déterminé le débit d'air (QW) et la pression (pW) nécessaires, on peut choisir le ventilateur approprié

parmi les modèles listés dans le tableau 6. Supposé qu'il faut une pression d'air de 5 mbar (= valeur arrondie de 4.8, voir tableau 4), on suit les chiffres de la colonne V8 de haut en bas. Tous les ventilateurs présentant, sur la ligne H1, un débit d'air entre 10.9 et 12.1 m³/s (10.9 = 12.1 – 10%) entrent en ligne de compte pour un premier choix. Ce sont tous les modèles à l'exception du no. 0001. Le type X1 est à éliminer par suite d'un débit d'air trop faible.

Tableau 5: Pertes de pression (PF) à travers le foin et d'éventuels éléments (Z) servant au conditionnement de l'air, en mbar

Débit d'air spécifique VL (m ³ /s par m ²)	0,11	0,07
Pertes de pression par m de hauteur du tas (mbar)		
Composition botanique du fourrage selon ADCF*:	PF1	PF2
équilibrée	A 1,6	1,1
riche en graminées ou en herbes	G, K 1,2	0,8
riche en trèfle	L 2,4	1,5
Pertes de pression par conditionneur (mbar)		
Conditionneur:	Z1	Z2
Capteur solaire	1,2	0,5
Pompe à chaleur	1,5	0,6
Déshumidificateur	0,7	0,3

* Association pour le développement de la culture fourragère

Tableau 6: Extrait de la liste des ventilateurs dont les données techniques ont été mesurées et calculée par la FAT (la liste complète peut être obtenue sur demande)

V1		V2		V3		V5			V8			V11	
FAT n°.	Liste de ventilateurs Page 1	Etat au 16.07.90		(mm CE ⁴⁾ *p mbar	(20) 2	(30) 3	(40) 4	(50) 5	(60) 6	(70) 7	(80) 8		
H1→ 0001	Maison A	n	960 tr/min	Q m³/s	8,7	8,2	7,7	7,1	6,4	5,9	5,2		
H2→ 84	Type X1	NelN	5,5 kW	Nel kW	5,5	5,9	6,1	6,0	6,1	6,3	6,3		
H3→ RE ¹⁾	Bruit dB(A) V 68 S 74 ³⁾	*pmax	10,1 mbar	Eta %	31	42	51	59	63	66	66		
H1→ 0002	Maison A	n	980 tr/min	Q m³/s	13,6	13,0	12,3	11,6	10,6	9,7	8,6		
H2→ 84	Type X1	NelN	9,2 kW	Nel kW	9,4	9,9	10,3	10,5	10,5	10,6	10,5		
H3→ RD ²⁾	Bruit dB(A) V 71 S 74 ³⁾	*pmax	11,1 mbar	Eta %	30	39	48	55	60	64	66		
H1→ 0003	Maison B	n	1043 tr/min	Q m³/s	13,5	12,9	12,4	11,8	11,0	10,2	9,3		
H2→ 84	Type Y	NelN	10,0 kW	Nel kW	10,3	10,9	11,2	11,7	11,5	11,7	11,7		
H3→ RD ²⁾	Bruit dB(A) V 71 S 73 ³⁾	*pmax	11,6 mbar	Eta %	26	36	44	51	57	61	64		
H1→ 0004	Maison C	n	660 tr/min	Q m³/s	15,6	14,1	12,6	10,9	8,8				
H2→ 84	Type Z	NelN	7,5 kW	Nel kW	7,3	8,0	8,1	8,4	8,3				
H3→ RD ²⁾	Bruit dB(A) V 69 S 71 ³⁾	*pmax	6,9 mbar	Eta %	43	53	62	65	64				

¹⁾ ventilateur radial monoflux

³⁾ V = de face

⁴⁾ CE = colonne d'eau

²⁾ ventilateur radial double flux

S = latéralement

2.3.1 Contrôle du débit d'air minimal (QK)

Le débit d'air de quelques ventilateurs baisse fortement lorsque la pression augmente, autrement dit: ces ventilateurs ne fournissent plus suffisamment d'air lorsque la hauteur du tas dépasse un certain niveau. Après la rentrée du dernier regain, un ventilateur devrait encore débiter un minimum de 0.07 m³/s par m² de base du tas. Cela donne 7.7 m³/s pour l'exemple au tableau 4.

2.3.2 Pression d'air (pK) à raison du débit d'air minimal

Le débit d'air minimal va de pair avec la pression d'air pK. Celle-ci s'entend pour un débit d'air spécifique (VL) de 0.07 m³/s par m² (selon tableau 5). Cette fois-ci, le calcul part de la hauteur totale (HS) du tas. La condition: QK = au min. 7.7 m³/s à raison de pK = 5.5 ou 6 mbar est remplie par les ventilateurs X, Y et Z du tableau 6.

2.4 Pression de réserve (pD)

Le ventilateur doit présenter une pression de réserve de 2 mbar au minimum; cela afin d'assurer un débit d'air suffisant au cas où l'on rentrerait exceptionnellement quelques charretées de foin plus lourd. Ainsi la pression maximale exigée (pmax dans le tableau 6, V3, H3) dépasse la pression pK de 2 mbar ou plus. Le modèle no. 0004 (type Z) est à éliminer, la réserve de pression étant insuffisante.

2.5 Puissance absorbée (Nel)

Le moteur électrique du ventilateur supporte une certaine surcharge. Selon les directives des fabricants, on peut le surcharger de 20% de la puissance nominale (NelN) à des altitudes allant jusqu'à 700 m et de 13% aux endroits plus hauts. L'utilisation d'un capteur solaire ou d'une pompe à chaleur limite la surcharge possible à environ 13% même à des altitudes inférieures à 700 m. Cela du fait que l'effet de re-

Tableau 7: Moteurs de ventilateurs: fusibles, section du conducteur et surcharges possibles

Section du conducteur mm²	Fusibles en ampères		Puissance nominale NelN kW		Puissance maximale admise en kW avec une surcharge de	
	normaux	à action retardée		ch	20%	13%
2,5/1,5	15	10	3	4	3,6	3,4
4/ 2,5	20	15	4	5,5	4,8	4,5
4/ 2,5	20	15	5,5	7,5	6,6	6,2
6/ 4	25	20	7,5	10,0	9	8,5
10/ 4	40	20	9	12*	10,8	10,2
10/ 6	40	25	10	13,5*	12	11,3
10/ 6	40	25	11	15	13,2	12,4
16/10	50	40	15	20	18	17
16/10	60	40	18,5	25	22,2	20,9
16	60	50	22	30	26,4	24,9

* ces moteurs ne sont pas des moteurs standard, c'est-à-dire un remplacement rapide peut s'avérer difficile en cas d'une panne.

froidissement de l'air dépend de sa densité et que celle-ci diminue lorsque la température monte. On cherche, dans le tableau 6, la valeur N_{el} (puissance absorbée) la plus élevée (H2, V5 - V8) et la divise par la puissance nominale N_{elN} (H2, V3); la multiplication par 100 moins 100 donne la surcharge en %. Les 15% du modèle no. 0002 (tableau 4) résultent du calcul: $(10.6 : 9.2 \times 100) - 100$ (selon tableau 6).

La situation quant au raccordement a-t-elle été examinée? La section existante de la ligne de raccordement et le genre de fusible (normal ou à action retardée) indiquent la puissance maximale du moteur électrique. Le tableau 7 donne une vue d'ensemble.

2.6 Rendement (Eta)

Le rapport entre la puissance mécanique débitée par le ventilateur (débit et pression d'air) et la puissance que le moteur du ventilateur absorbe du réseau électrique (wattage) est appelé rendement. Le ventilateur (moteur électrique compris) transforme la puissance absorbée d'autant mieux que le rendement est plus élevé.

Les rendements de différents ventilateurs ne doivent pas être comparés à raison d'une seule pression, car la pression monte de 2 mbar à pK (c'est-à-dire à 6 mbar dans l'exemple du tableau 4) au cours de la fenaison. Il est donc indiqué de faire la comparaison sur toute la plage d'utilisation du ventilateur. A cette fin, on calcule la moyenne arithmétique des différentes valeurs mesurées. Des différences de 2 à 3% sont insignifiantes et peuvent être dues aux moteurs différents, à des différences de tension des courroies trapézoïdales, à des coefficients arrondis, etc. Des différences de plus de 5%, par contre, peuvent bien avoir une influence sur le choix du ventilateur. Le tableau 8 montre quatre plages de rendement, allant de «faible» à «excellent».

2.7 Bruit

Les installations de ventilation équipées d'un capteur solaire ne posent généralement pas de problèmes à cet égard, le ventilateur étant placé dans un canal d'air. Dans les autres cas,

Tableau 8: Evaluation des rendements de 203 ventilateurs radiaux – au 1^{er} janvier 1991

Pression d'air (2 – pk)	Rendement en %				Valeurs extrêmes	
	faible	suffisant	bon	excellent	minimales	maximales
2 à 4	< 38	38 à 42	43 à 47	> 47	21	56
2 à 5	< 42	42 à 46	47 à 50	> 50	24	59
2 à 6	< 45	45 à 49	50 à 53	> 53	26	60
2 à 7	< 47	47 à 52	53 à 54	> 54	29	60
2 à 8	< 49	49 à 52	53 à 55	> 55	31	58

l'intensité sonore du ventilateur doit être prise en considération, particulièrement aux endroits où il faut avoir égard aux voisins. Le tableau 9 montre une évaluation des valeurs mesurées pour les ventilateurs (uniquement radiaux) figurant sur la liste selon tableau 6. La différence entre la valeur maximale et la valeur minimale est de 20 dB(A), ce qui signifie que le ventilateur le plus bruyant occasionne quatre fois plus de bruit que l'appareil le plus silencieux.

Les valeurs limites d'exposition au bruit sont définies dans l'Ordonnance sur la protection contre le bruit du 15.12.1986, en vigueur depuis le 1.4.1987. Le tableau 10 indique les valeurs limites valables pour les installations agricoles.

Le degré de sensibilité I est à appliquer dans les zones de détente, le degré II dans les zones d'habitation et dans celles réservées à des constructions et installations publiques, le degré III dans les zones d'habitation et artisanales (zones mixtes) ainsi que dans les zones agricoles, le degré IV dans les zones industrielles. Les exploitations agricoles sont généralement situées dans les zones à degré de sensibilité II ou III.

Les valeurs limites d'immission sont valables pour les installations existantes; les nouvelles installations, par con-

tre, doivent répondre aux valeurs de planification. Le jour dure de 07.00 à 19.00 h, la nuit de 19.00 à 07.00 h. Les immissions de bruit sont mesurées en décibels (dB[A]), au milieu de la fenêtre ouverte de locaux à usage sensible au bruit (pièces de séjour, chambres à coucher, etc.).

Sont également à considérer les corrections de niveau. Pour les installations de ventilation, les valeurs limites d'immission selon tableau 10 sont à réduire de 5 dB(A) (jour) resp. de 10 dB(A) (nuit). Une correction supplémentaire de - 6 dB(A) est imposée aux ventilateurs axiaux avec une forte audibilité des composantes tonales (= bruit à hautes fréquences). En cas de service intermittent pendant la nuit, les valeurs limites à respecter peuvent être plus élevées, suivant la durée de service et le nombre d'intervalles.

Si, par ex., la durée de service est prolongée jusqu'à 20.00 h et qu'en plus, on fait marcher le ventilateur deux fois une demi-heure pendant la nuit, la correction de niveau est de 7 dB(A); en cas de deux heures de service nocturne sans mise en marche, elle s'élève à 8 dB(A) (fig. 7). Les valeurs indicatives valables pour les nouvelles installations de ventilation du foin sont indiquées dans la dernière colonne du tableau 10. Comme le montre le tableau 9, les ven-

Tableau 9: Evaluation des émissions de bruit de 203 ventilateurs radiaux – au 1^{er} janvier 1991

Bruit mesuré	Niveau sonore en dB(A)				Valeurs extrêmes	
	très bruyant	bruyant	silencieux	très silencieux	minimales	maximales
de face	> 71	69 à 71	67 à 68	< 67	60	80
latéralement	> 74	72 à 74	70 à 71	< 70	62	81
Moyenne	> 73	71 à 73	68 à 70	< 68	61	80

Tableau 10: Valeurs limites d'exposition au bruit

Degré de sensibilité	Valeur de planification Lr en dB(A)		Valeur limite d'immission Lr en dB(A)		Valeur d'alarme Lr en dB(A)		Valeurs indicatives pour nouvelles installations de ventilation du foin dB(A)		
	Jour	Nuit	Jour	Nuit	Jour	Nuit	Jour	Nuit Vent. intermittente	Nuit Vent. continue
I	50	40	55	45	65	60	-	-	-
II	55	45	60	50	70	65	50	42-43	35
III	60	50	65	55	70	65	55	47-48	40
IV	65	55	70	60	75	70	-	-	-

dépasser environ 63 dB(A) en cas de service continu et 71 dB(A) en cas de service intermittent (pendant la nuit). Etant donné que la plupart des ventilateurs sont plus bruyants, il faut généralement des mesures d'insonorisation. La propagation du son peut être empêchée soit par dissipation, soit par absorption ou par les deux ensemble. C'est donc en posant un obstacle en direction du voisin et en imposant au son un détour aussi grand que possible que l'on peut résoudre le problème. L'obstacle doit être étanche et présenter un poids de 12 kg/m² au minimum pour que le son ne le fasse pas vibrer. Des panneaux de particules de bois de 19 mm d'épaisseur se prêtent bien à cet effet. Après avoir fermé tous les trous et fuites dans cette paroi protectrice, on recouvre les surfaces directement exposées au son d'un isolant sonore.

tilateurs très silencieux produisent un bruit de moins de 68 dB(A), cette valeur étant mesurée à 7 m de distance. Sans isolation acoustique, le voisin de l'autre côté de la rue (= distance de 7 m) ne serait probablement pas content. Heureusement, que l'intensité sonore

diminue de 6 dB(A) chaque fois que la distance double (fig. 8). Admettons une ferme dans une zone à degré de sensibilité III; le ventilateur est situé à 100 m de distance de la fenêtre de la chambre à coucher du voisin. Selon fig. 8, le ventilateur ne doit pas

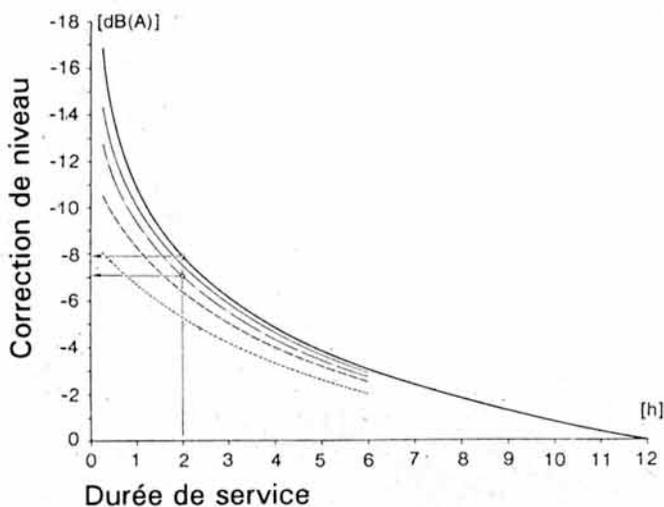


Fig. 7: Correction de niveau pour une durée de ventilation réduite, en fonction du nombre de mises en marche. Le bruit de mise en marche (à audibilité nette des composantes tonales) est généralement, pendant 30 secondes environ, de 10 dB(A) plus fort que le bruit de service.

pas de mise en marche ou bruit de mise en marche = bruit de service

- 1 mise en marche
- · - 2 mises en marche
- - - 4 mises en marche
- - - - 8 mises en marche

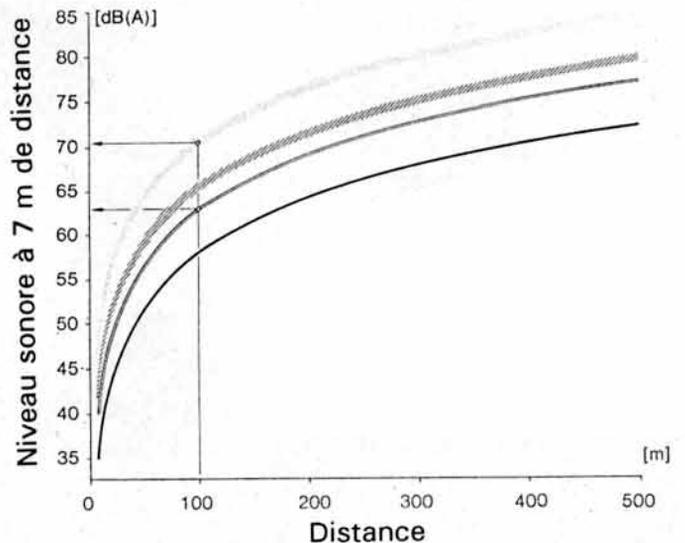


Fig. 8: Niveau sonore à 7 m de distance en fonction de la distance à laquelle la valeur limite (nouvelle installation, nuit) est atteinte.

- service intermittent*) dans les zones à degré de sensibilité III (47 à 48 dB[A])
- ////// service intermittent*) dans les zones à degré de sensibilité II (42 à 43 dB[A])
- ===== service continu dans les zones à degré de sensibilité III (40 dB[A])
- service continu dans les zones à degré de sensibilité II (35 dB[A])

*) 2 heures de marche, 2 mises en marche

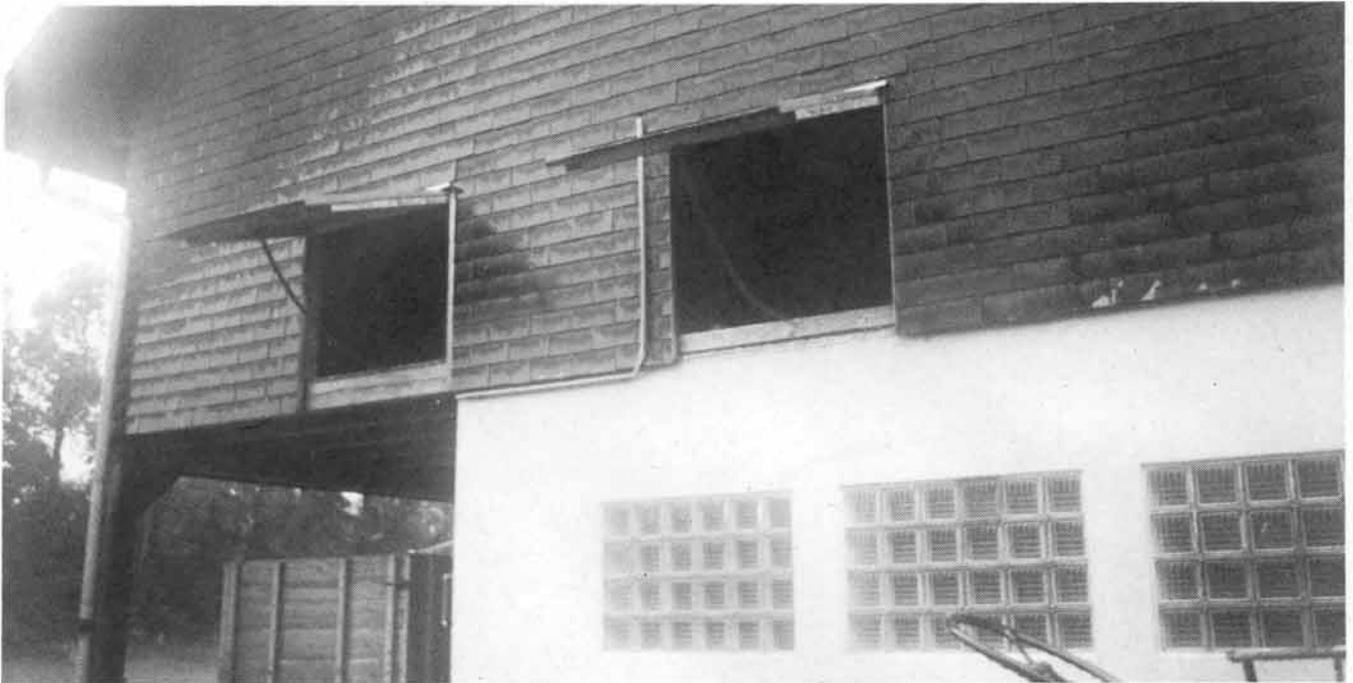


Fig. 9: Aspiration d'air par un ventilateur insonorisé. Avantages de cette solution: utilisation de la chaleur émise par la paroi, pas de mélange avec l'air sortant du tas. Le ventilateur est placé entre les deux orifices d'aspiration isolés.

Sont recommandés des panneaux de fibres minérales (laine minérale, laine de verre), du caoutchouc mousse ou de la paille. Afin d'éviter que les panneaux de fibres ne se détériorent sous l'effet du flux d'air (frottement), on peut les recouvrir d'un matériau laissant passer le son (tissu textile, plastique ou métallique, plaque perforée ou film mince). D'éventuelles petites fuites peuvent être négligées. Par contre, il importe que cette couche soit suffisamment épaisse. Nous recommandons 4 à 6 cm d'épaisseur au minimum pour les ventilateurs axiaux et 8 à 10 cm pour les ventilateurs radiaux dont la part de fréquences basses et difficiles à amortir est plus élevée.

La fig. 9 montre l'exemple d'un ventilateur insonorisé. Le Rapport FAT 332 fournit d'autres renseignements à ce sujet.

2.8 Ventilateur radial ou axial? Plusieurs ventilateurs ou un seul?

Le ventilateur radial (fig. 10) présente les avantages suivants:

- en règle générale, la pression augmente continuellement de 2 à 8 mbar

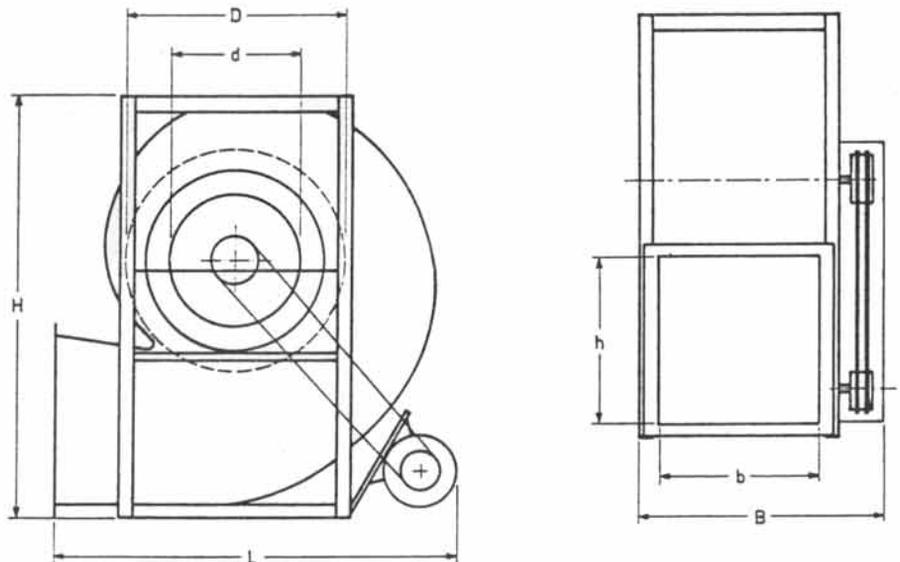


Fig. 10: Ventilateur radial avec les mesures:

L = longueur maximale

B = largeur maximale

H = hauteur maximale

d = diamètre intérieur de la buse d'aspiration

D = diamètre extérieur du rotor

b = largeur de la bouche de sortie

h = hauteur de la bouche de sortie

Ces mesures et d'autres indications figurent sur les feuilles de test particulières. Ces feuilles portent le numéro indiqué dans la colonne V1 du tableau 6 (ligne H1); elles peuvent être demandées à la FAT et permettent de repérer un certain type de ventilateur d'après les dimensions et les données techniques.

lorsque le débit d'air diminue; contrairement au ventilateur axial, il n'y a pas de zone d'instabilité (limite de pompage);

- le débit d'air ne diminue que faiblement lorsque la pression augmente;
- le ventilateur radial est en moyenne de 10 dB(A) moins bruyant que le ventilateur axial;
- le même ventilateur peut être utilisé pour des tas de foin de dimensions différentes; il suffit d'adapter le régime.

Les avantages du ventilateur axial (fig. 11), tels que:

- encombrement moindre et
- frais d'investissement plus modestes ne peuvent pas compenser ses inconvénients.

L'utilisation de plusieurs ventilateurs ou d'un seul n'a pas d'influence du point de vue technique. Pourvu que le débit

d'air total corresponde aux exigences et que les ventilateurs donnent plus ou moins la même progression de la pression, les systèmes à plusieurs ventilateurs présentent les avantages (+) et les inconvénients (-) suivants:

- + les petits ventilateurs demandent moins d'espace en hauteur et en longueur (mais étant donné que plusieurs ventilateurs sont placés les uns à côté des autres, la largeur totale qu'ils occupent, y compris les espacements nécessaires, dépasse de loin la largeur maximale d'un seul ventilateur);
- + la coupe transversale des canaux menant l'air vers la grille est plus petite; l'air se répartit bien au-dessous de la grille;
- + la mise en marche échelonnée des moteurs de plusieurs petits ventilateurs demande bien moins d'intensité initiale que le démarrage d'un seul moteur puissant;

+ lorsque l'un des ventilateurs tombe en panne, les autres fournissent un débit d'air minimal; ainsi il ne faut pas de réparation coûteuse si la panne se produit pendant un week-end;

- deux petits ventilateurs ou plus coûtent plus cher qu'un seul de puissance équivalente;
- les installations électriques sont plus coûteuses et demandent plus de travail;
- le rendement des ventilateurs plus puissants est généralement supérieur à celui des petits ventilateurs.

2.9 Autres critères de sélection

A part les aspects techniques, il faut également considérer le prix, les conditions de livraison et de garantie, le service après-vente et l'assistance prêtée par le fournisseur.

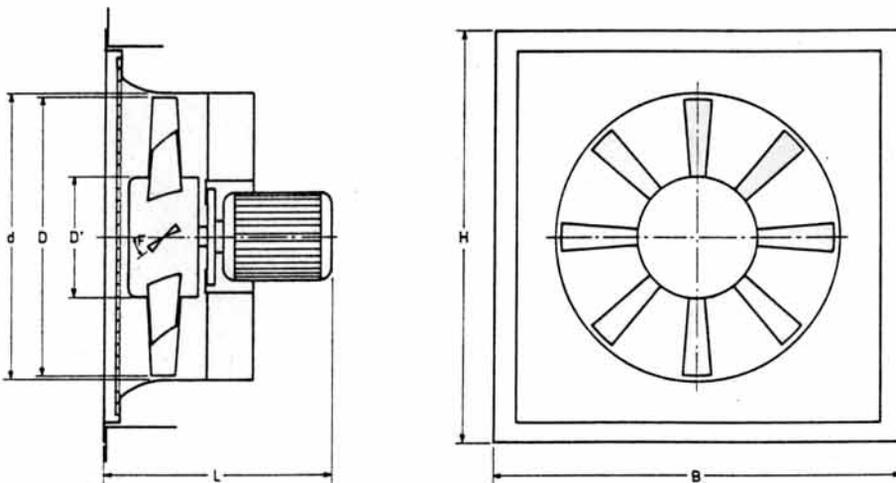


Fig. 11: La liste actuelle de la FAT ne comporte plus de ventilateurs axiaux, mais il existe encore sur le marché un bon nombre de modèles d'occasion.

d = orifice d'aspiration du ventilateur

D = diamètre extérieur du rotor

D' = diamètre du moyeu

L = longueur maximale

B = largeur maximale

H = hauteur maximale

L'angle des pales (F) de certains modèles est réglable, ce qui permet d'adapter le débit d'air à la surface du tas.

3. Canaux d'aspiration et d'amenée d'air

Si le ventilateur ne peut pas aspirer l'air directement de l'extérieur, il faut un canal d'aspiration. Cela sera toujours le cas si l'installation comprend un capteur solaire ou une pompe à chaleur. Un deuxième canal (canal d'amenée) sert à conduire l'air du ventilateur jusqu'au-dessous de la grille. Ces canaux sont à dimensionner de façon à ce que la vitesse moyenne de l'air ne dépasse pas 5 m/s. Le tableau 11 montre quelques valeurs indicatives, calculées en fonction de la surface de base du tas.

Tableau 11: Valeurs indicatives quant aux dimensions des canaux d'aspiration et d'amenée d'air (vitesse maximale de l'air: 5 m/s)

Surface de base du tas m ²	Section des canaux m ²	Mesures intérieures* m	Dimensions des poutres (espacement: 50 cm) cm
40	0,9	0,95 x 0,95	6/ 6
60	1,3	1,15 x 1,15	6/ 6
80	1,8	1,35 x 1,35	6/ 6
100	2,2	1,50 x 1,50	6/ 8
120	2,6	1,65 x 1,65	6/10
140	3,1	1,75 x 1,75	6/10
160	3,5	1,90 x 1,90	6/10
180	4,0	2,00 x 2,00	6/10

* la coupe des canaux ne doit pas forcément être carrée; un canal de 3,5 m² de coupe peut, par ex., également présenter les mesures intérieures 1,0 x 3,5 m

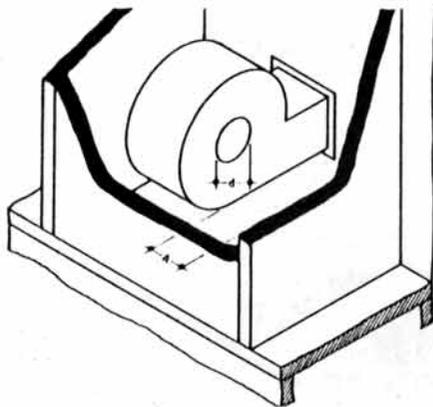


Fig. 12: La distance minimale A entre la paroi latérale et le ventilateur est égale au diamètre intérieur d de la buse d'aspiration du ventilateur.

3.1 Canal d'aspiration d'air

Dans un canal d'aspiration allant du capteur solaire vers le ventilateur, la vitesse de l'air devrait être inférieure à 4 m/s. La coupe de ce canal doit donc être agrandie de 20%.

Les ventilateurs radiaux placés trop près d'une paroi sont moins performants (fig. 12).

3.2 Canal d'amenée

Il existe plusieurs constructions permettant de conduire l'air du ventilateur vers la grille. Le canal cunéiforme est une des différentes possibilités. Il est à dimensionner selon le tableau 11. Pour le confectionner, on utilise de préférence des panneaux de particules de bois (fig. 13). Sur sa partie supérieure, on

pratique à la scie environ trois lumières par m², chacune mesurant 6 x 40 cm. C'est par ces lumières que l'air passe du canal sous la grille.

La hauteur h de l'ouverture latérale est d'environ 10 cm inférieure à celle de la grille. La longueur du canal se calcule à partir de la section nécessaire (selon tableau 11) et de la hauteur h. Un canal de 2.4 m² de section transversale (= tas de 110 m² de base) et muni des deux côtés d'une ouverture haute de 0.3 m (= grille de 40 cm de hauteur) aura une longueur L d'environ 4 m (2 x 4 x 0.3 = 2.4 m²).

Un déflecteur cunéiforme, placé à l'extrémité du canal, évite que le foin face au ventilateur ne sèche trop rapidement. On peut aussi monter des déflecteurs à l'entrée du tas si la vitesse de l'air à l'intérieur du canal dépasse 5 m/s. Comme le montrent les expériences,

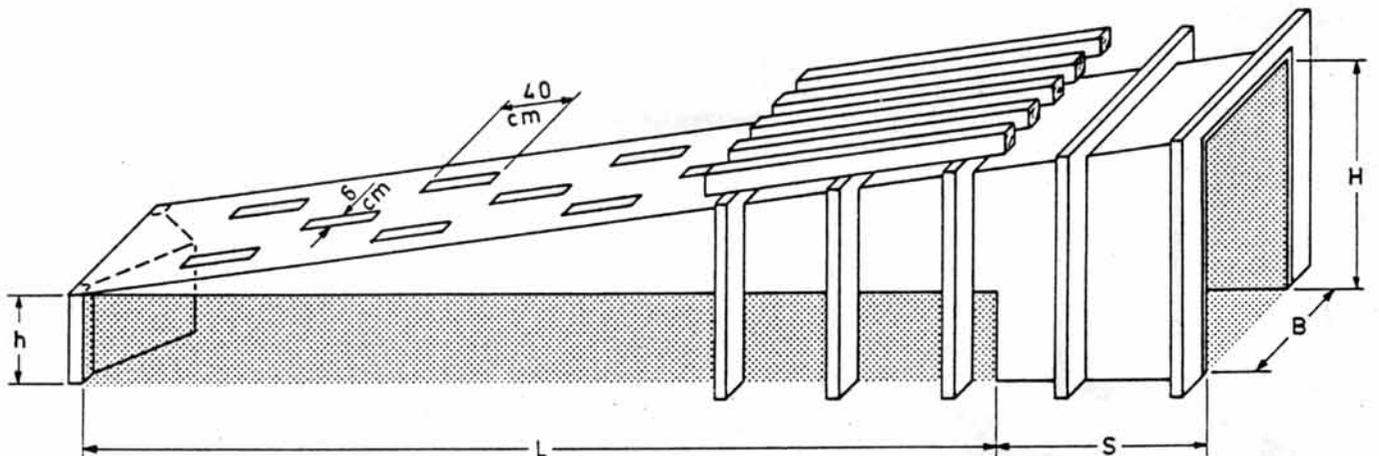


Fig. 13: La section H x B (hauteur du canal x largeur du canal) correspond à la surface h x L (hauteur x longueur de l'ouverture latérale); S = DR selon tableau 3. Le canal est à dimensionner selon le tableau 11 et non pas selon les dimensions de la bouche de sortie du ventilateur.

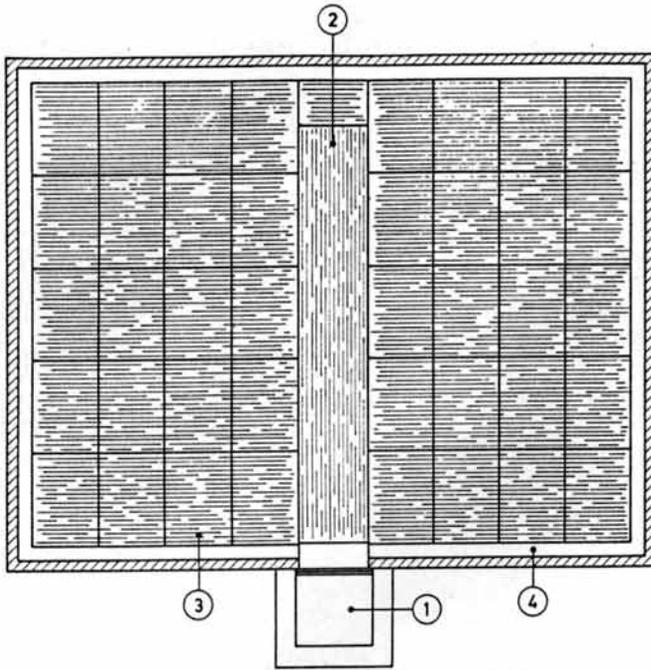


Fig. 14: Le canal d'amenée (2) laissant sortir l'air des deux côtés peut être plus court. Un canal plus long (avec des ouvertures latérales moins hautes) donne toutefois une meilleure répartition de l'air.

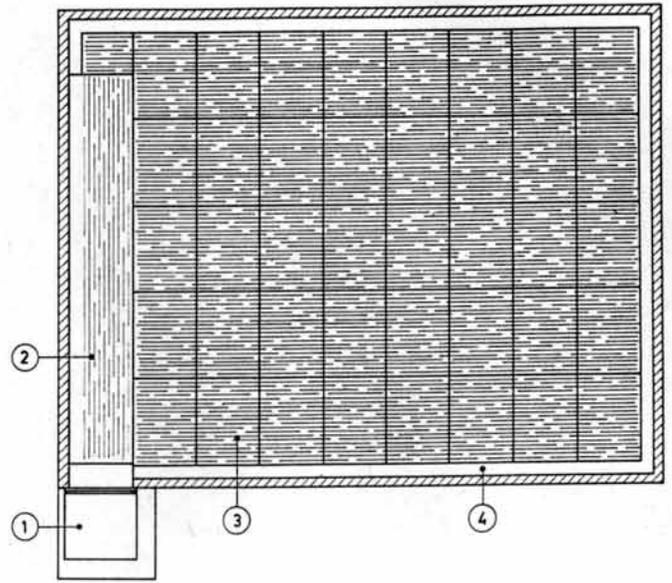


Fig. 15: Le canal d'amenée (2) avec ventilateur (1) confine à la cloison. On planifie des éléments de grille uniformes (3) et respecte l'espace recommandé (4).

ces, c'est aux endroits les plus proches du ventilateur, à côté du canal, que le foin sèche le plus lentement.

La construction portante du canal est disposée à l'extérieur. Les poutres à 50 cm d'intervalle sont à dimensionner selon le tableau 11, colonne 4.

Des lattes de toiture de 24 x 48 mm sont clouées sur champ, à des intervalles de 7.5 cm environ, sur la construction portante, au-dessus du canal d'amenée. Le tout forme une grille par laquelle l'air peut entrer dans le foin.

Si le canal d'amenée n'est pas situé au milieu du tas, les ouvertures latérales de sortie de l'air seront dimensionnées proportionnellement aux surfaces à ventiler. Un exemple:

Le canal divise les 110 m² de base du tas (section de sortie de l'air: 2.4 m²) en deux surfaces de 40 + 70 m². Les sections des ouvertures latérales seront alors de $2.4 : 110 \times 40 = 0.87 \text{ m}^2$ et de $2.4 : 110 \times 70 = 1.53 \text{ m}^2$.

Si le canal d'amenée confine à la cloison et que l'air ne sort que d'un seul côté (fig. 15), il faut une longueur L de 8 m. La répartition de l'air est d'autant meilleure que le canal est plus long.

L'espace s (= DR selon tableau 3) est fermé. La longueur totale du canal se compose de la longueur L de l'ouverture latérale et de l'espace s (fig. 13).

La disposition du canal d'amenée a peu d'importance pour autant que les dimensions spécifiées au tableau 11 soient observées. Dans les granges où le foin est rentré et prélevé à l'aide d'un

pont roulant, le canal risque moins d'être endommagé par la griffe s'il confine à la cloison. Les solutions présentant un canal d'amenée en diagonale (fig. 16) sont plutôt rares.

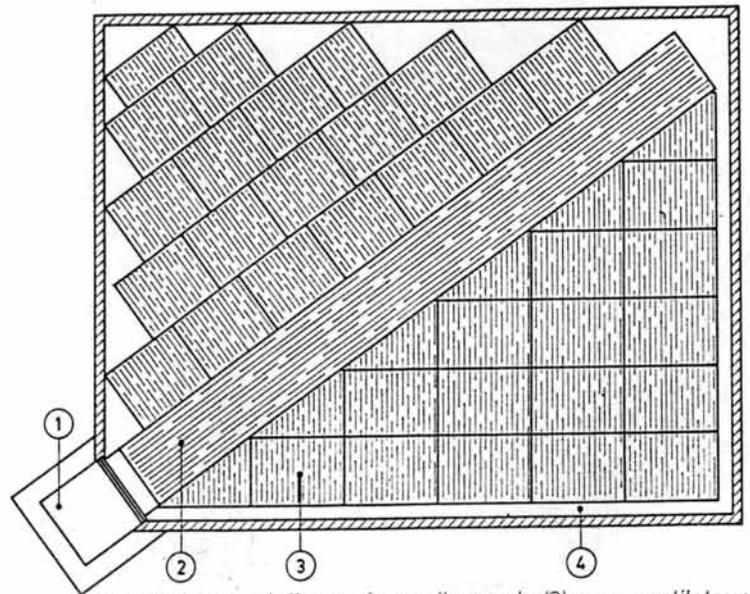


Fig. 16: Le canal d'amenée en diagonale (2) avec ventilateur placé dans un des quatre coins (1) implique soit des éléments de grille (3) découpés (en bas), soit des éléments de grandeur inégale et des espaces (4) irréguliers entre la grille et la cloison (en haut).

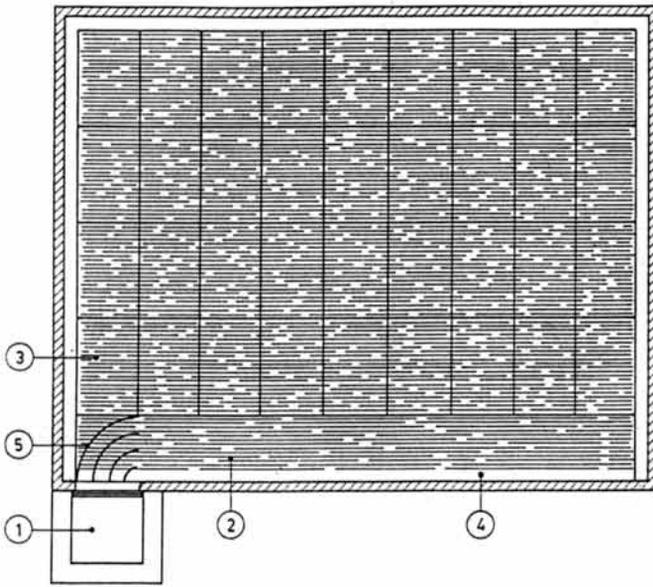


Fig. 17: Des tôles de guidage de l'air (5) sont ajoutées au ventilateur (1). L'air sortant du canal d'amenée (2) passe sous la grille (3). L'espace égal tout autour du tas (4) assure une répartition régulière de l'air.

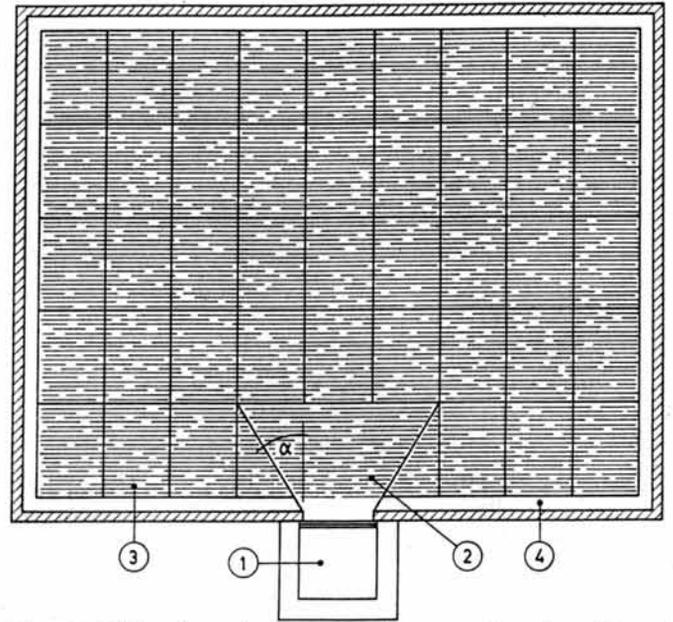


Fig. 19: Si l'angle α de ce genre de raccord conique (2) est supérieur à $5 - 6^\circ$, il se produit des tourbillons d'air occasionnant une perte de pression. Un élargissement soudain (section selon tableau 11) permet, par contre, de gagner un peu de pression; cela grâce à la transformation de pression dynamique (vitesse d'air) en pression statique.

La variante selon fig. 17 offre l'avantage de réduire la vitesse de l'air sortant du canal d'amenée et passant sous la grille.

Si le ventilateur doit être placé à l'intérieur du cloisonnement, le foin situé à proximité de lui sèche mal. Afin de prévenir des pertes dues à la formation de moisissure, on prévoit des tôles de guidage de l'air (fig. 18).

Les installations avec un canal d'amenée d'air selon fig. 19 donnent des résultats peu satisfaisants. Il vaut mieux faire passer l'air directement du ventilateur au canal (à une vitesse de 5 m/s, voir tableau 11 et fig. 13).

3.3 Sortie de l'air

A températures égales, l'air humide sortant du foin est plus léger que l'air sec et monte vers le toit. Il doit être évacué sans détours, sinon il se condense pendant la nuit et risque d'endommager la charpente. Il faut donc prévoir des ouvertures (faîtières ventilatrices, fenêtres à lamelles, etc.) dont la surface ne doit pas être inférieure aux valeurs spécifiées au tableau 11 (2.4 m^2 pour un tas de 110 m^2 de base).

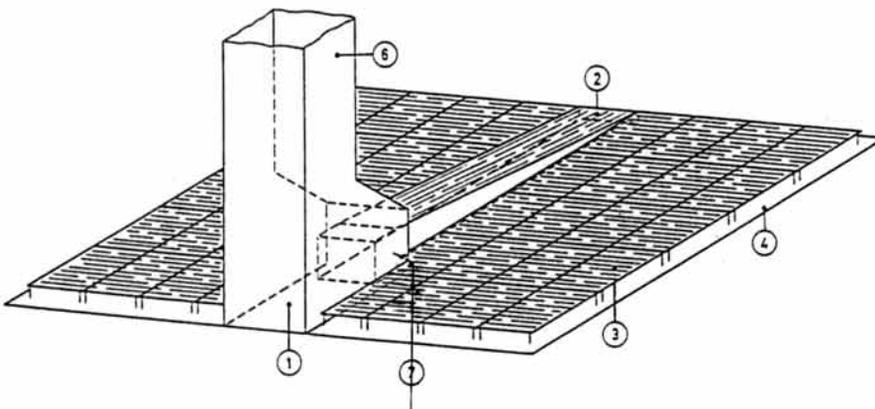


Fig. 18: Installation de ventilation avec canal d'aspiration (6) et chambre de ventilateur (1). Des tôles de guidage de l'air (7) montées à l'entrée du canal d'amenée (2) dirigent une partie de l'air vers les grilles (3) situées à côté de la chambre.

4. Grille

La grille à éléments selon fig. 20 s'est imposée. Les systèmes avec un canal principal et plusieurs canaux secondaires disposés sur la base entière du tas ne sont plus usuels, étant donné qu'ils ne permettent guère une répartition régulière de l'air.

Afin d'assurer la circulation et la compensation d'air au-dessous de la grille, la surface entière de celle-ci est maintenue à hauteur égale. Des hauteurs de grille différentes demandent un plan de montage et peuvent provoquer des difficultés dans les cas où l'on se sert d'un pont roulant (les éléments de grille risquant d'être endommagés par la griffe).

Pour déterminer la longueur L et la largeur B des éléments de grille (selon fig. 20), on dresse un schéma à l'échelle. On porte dans ce schéma d'abord la longueur et la largeur du canal d'amenée. Etant donné que l'air a tendance à fuir le long des parois sans traverser le foin, on prévoit un espace DR entre la grille et la cloison (selon tableau 3). Si la grille va jusqu'à la cloison, une bande de la largeur DR doit être recouverte de plaques en fibres dures. La surface restante de la grille est divisée en éléments à dimensions égales. Si un tas de forme défavorable exige des éléments à dimensions différentes, ceux-ci doivent être bien désignés et marqués sur le sol.

Des éléments de grille selon fig. 20 ou des parties d'éléments peuvent être achetés. Celui qui désire les construire

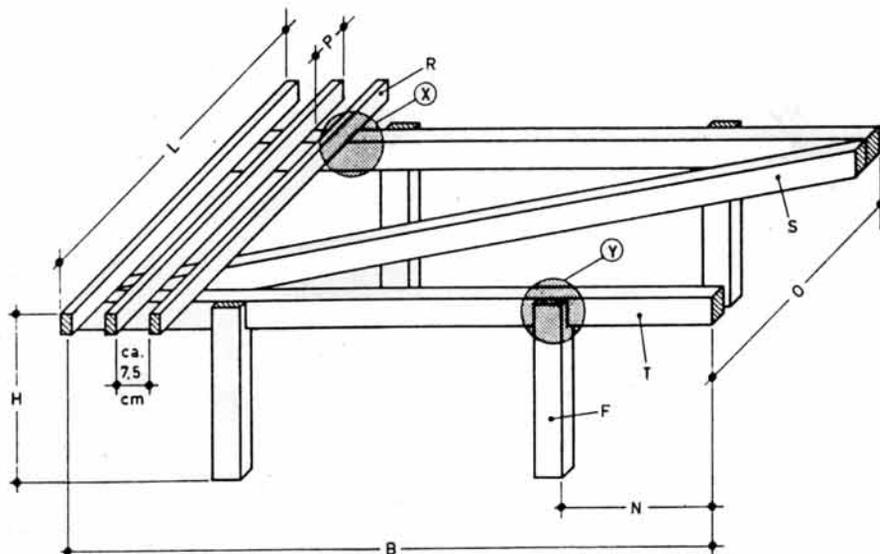


Fig. 20: Schéma de construction des éléments de grille.

- B = largeur de l'élément
- L = longueur de l'élément
- H = hauteur de la grille
- N = porte-à-faux des doubles lattes
- O = écartement des doubles lattes
- P = porte-à-faux des lattes de toiture

- R = lattes de toiture
- S = contrefort
- T = doubles lattes
- F = pied de l'élément
- Y = détails voir fig. 21
- X = détails voir fig. 22

lui-même peut le faire de la manière suivante: les doubles lattes horizontales T (60 x 60 mm), servant de portants, sont fixées aux pieds F (60 x 60 mm). Ces deux parties de la construction sont à assembler selon fig. 20 (Y) ou fig. 21 ($Y1$ ou $Y2$), de sorte que le raccord à vis (vis de 6 x 60 mm) n'ait pas à supporter seul le poids du fourrage. Les lattes de toiture R (24 x 48 mm) sont ensuite vissées (vis de 5 x 80 mm) ou clouées (clous de 3.5 x 90 mm) sur champ sur

les portants (fig. 22, détail $X1$). Les lattes de plus de 50 mm de hauteur doivent être encastrées d'environ 2 cm (selon fig. 22, détail $X2$) afin de ne pas basculer lorsque l'on met le pied sur la grille. L'assemblage selon détail $X3$ n'est pas recommandé: il demande des lattes plus fortes, ce qui fait augmenter le poids de l'élément; en plus, il réduit les surfaces de passage de l'air, ce qui provoque des pertes de pression accrues de l'air de séchage.

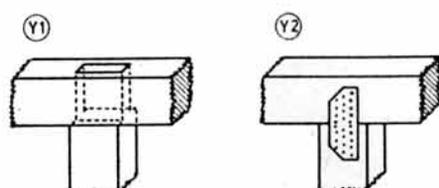


Fig. 21: Différentes façons de fixer le pied de l'élément.

Y (fig. 20) = pied encastré à moitié (3,2 cm environ)

$Y1$ = assemblage par tenon et mortaise

$Y2$ = assemblage par plaque cloutée

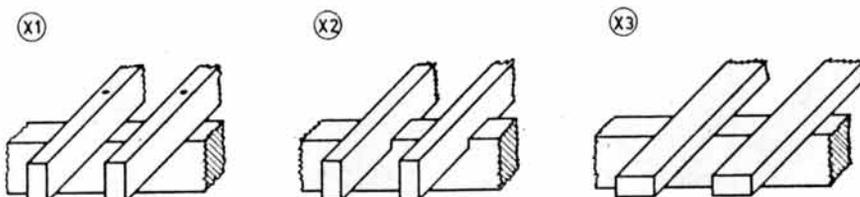


Fig. 22: Détails de construction de la grille.

$X1$ = lattes de toiture vissées ou clouées sur champ

$X2$ = les lattes plus hautes de 50 mm doivent être encastrées

$X3$ = assemblage à déconseiller puisqu'il entrave le passage de l'air

Le contrefort S assure que l'élément conserve exactement son angle; on le monte contre les portants T et on y cloue les lattes de toiture R.

Afin d'éviter de faire basculer des éléments entiers en mettant le pied dessus, on respectera les mesures spécifiées au tableau 12.

Les grilles sur lesquelles on peut passer au tracteur (fig. 23) feront exception aussi à l'avenir. Une construction renforcée avec des distances d'appui réduites assure que la grille ne s'écroule pas sous le poids du tracteur (fig. 24). Les pertes de pression augmentent si le volume d'air passant par la grille est insuffisant.



Fig. 23: Vue d'une grille permettant le passage au tracteur.

Tableau 12: Mesures recommandées pour les éléments de grille
(selon fig. 20)

Largeur de l'élément (B) cm	Longueur de l'élément (L) cm	Porte-à-faux des doubles lattes (N) cm	Ecartement des doubles lattes (O) cm	Porte-à-faux des lattes de toiture (P) cm	Hauteur de la grille (H) cm	Surface de base du tas m ²
100	100	15	70	15	30	jusqu'à 50
100	120	15	90	15		
100	150	15	120	15		
120	100	20	70	15	35	jusqu'à 100
120	120	20	80	20		
120	150	20	100	25		
150	100	25	70	15		
150	120	25	80	20	40	jusqu'à 150
150	150	25	100	25		

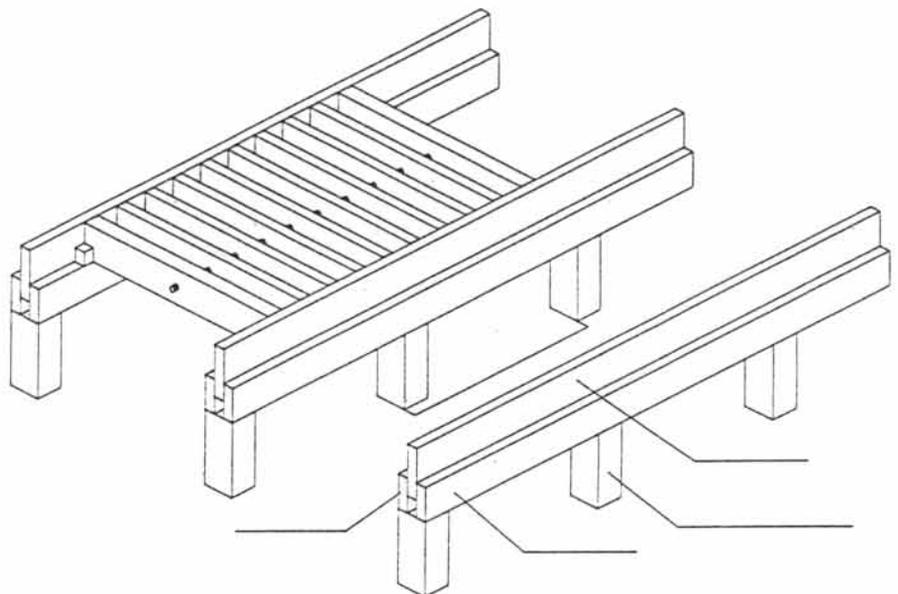


Fig. 24: Détails de construction d'une grille permettant le passage au tracteur. La grille se compose de lattes de 40 x 100 mm, longues de 720 mm; l'espace réservé au passage de l'air s'élève à 80 mm. Un tube d'acier de 20 mm de diamètre assure que les lattes ne basculent pas sous le poids du tracteur.

5. Cloisonnement

Les cloisons s'opposent aux pertes d'air et assurent que l'air de séchage traverse le foin régulièrement de bas en haut et qu'il ne s'échappe pas sur les côtés. En plus, elles absorbent la pression exercée latéralement par le fourrage entreposé.

5.1 Construction à poutres

Le cloisonnement peut être construit de plusieurs manières. Les conditions sont tellement différentes dans la pratique que nous ne pouvons que donner quelques instructions générales. On sait que la pression latérale exercée par le foin entreposé augmente du haut vers le bas. On compte actuellement avec une augmentation de 800 N (New-

ton) par mètre de hauteur, de sorte qu'il faut s'attendre à une pression superficielle de 4000 Pa (Pascal) exercée au niveau du dernier mètre inférieur d'un tas de 5 mètres de hauteur.

On donne normalement à toutes les poutres horizontales H (fig. 25) les mêmes dimensions. Afin d'éviter une flexion trop forte des panneaux, on réduit les intervalles vers le bas (selon tableau 13). Si l'on préfère des interval-

Fig. 25: Exemple de construction d'une cloison.
 S = exécution en panneaux de bois aggloméré
 F = avec grille supplémentaire pour plaques en fibres dures
 H = poutres horizontales
 Bi = fermes
 V = supports verticaux
 A = intervalles entre les poutres
 B = hauteurs du tas

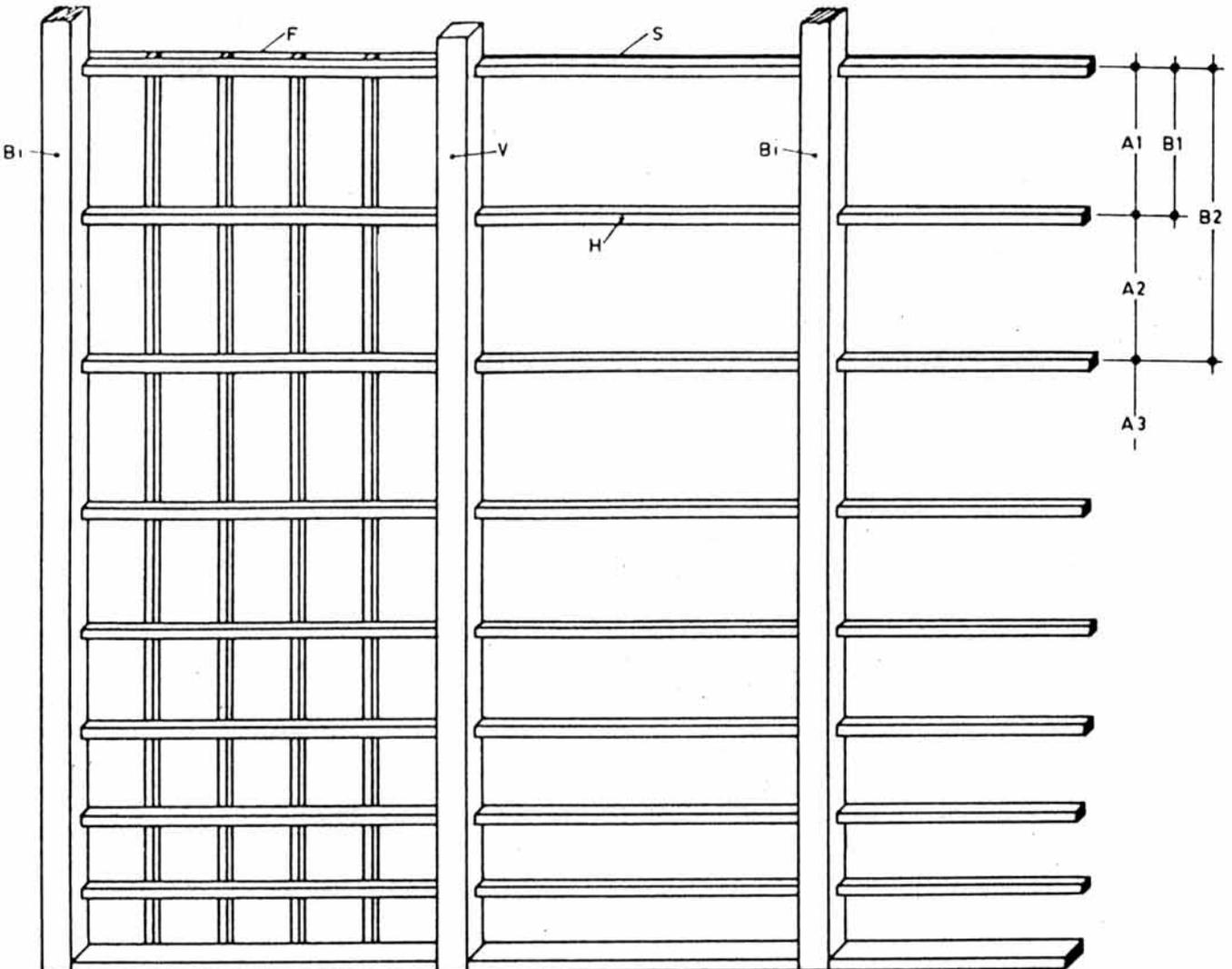


Tableau 13: Ecartement des poutres horizontales

(en commençant par la poutre supérieure;
A = écartement des poutres; B = hauteur du tas; en cm)

	Panneaux de bois aggloméré									
	Épaisseur des panneaux, cm									
	1,0		1,6		1,9		2,2		4,0	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Poutre supérieure	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0
1 ^{re} poutre	75	75	105	105	110	110	125	125	190	190
2 ^e poutre	75	150	95	200	100	210	115	240	160	350
3 ^e poutre	70	220	85	285	90	300	100	340	140	490
4 ^e poutre	60	280	80	365	85	385	95	435	125	615
5 ^e poutre	55	335	75	440	80	465	85	520	-	-
6 ^e poutre	55	390	70	510	75	540	85	605	-	-
7 ^e poutre	55	445	65	575	75	615	-	-	-	-
8 ^e poutre	50	495	65	640	-	-	-	-	-	-
9 ^e poutre	50	545	-	-	-	-	-	-	-	-
10 ^e poutre	50	595	-	-	-	-	-	-	-	-

les réguliers, on choisira l'espace minimal correspondant à telle ou telle hauteur totale. Celle-ci se compose de la hauteur de la grille HR, de la hauteur du tas HS et de la hauteur de tassement HA (selon fig. 5). L'écartement des poutres dépend non seulement de la hauteur du tas, mais également de l'épaisseur des panneaux.

L'écartement des fermes de la grange va généralement de 4.4 à 5 m au maximum. Si l'on pose un support vertical supplémentaire V entre les fermes (selon fig. 25), les intervalles entre les poutres verticales se réduisent à 2.5 m au maximum. Les supports supplémentaires, hauts de jusqu'à 6 m, peuvent présenter les dimensions suivantes (en cm): 10/26, 14/22, 12/24 ou 18/20.

Le tableau 14 indique les coupes transversales des poutres horizontales, fonction de la portée, pour des panneaux de bois aggloméré de 1.6 cm d'épaisseur. Des poutres plus faiblement dimensionnées peuvent être uti-

lisées pour des panneaux plus minces, et vice versa.

5.2 Revêtement de l'ossature

Le revêtement de l'ossature se constitue de panneaux de bois aggloméré (Novopan, Homplax) d'épaisseurs différentes. Il faut prêter une attention particulière aux fuites d'air. On se sert donc de préférence de panneaux à rainure et à languette que l'on achète, ou de panneaux que l'on rainure soi-même et assemble à l'aide d'une languette rapportée (fig. 26).

On a également utilisé pour les cloisons des plaques en fibres dures (Pavatex) de 5 mm d'épaisseur. Ces plaques minces sont pourtant très sensibles aux influences mécaniques; elles ne résistent ni aux pierres projetées par la souffleuse, ni aux coups de pince de la griffe. En plus, elles risquent de se ramollir si le fourrage est très humide. Une forte flexion provoquant des fuites d'air en

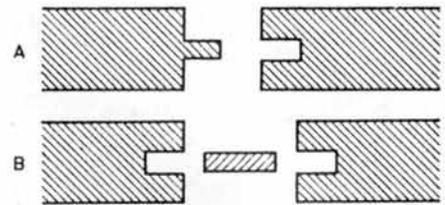


Fig. 26: Sont recommandés des panneaux de bois aggloméré avec rainure et languette (A) ou avec rainure et languette rapportée (B).

est la conséquence. Voilà pourquoi on utilise aujourd'hui, dans le cas d'une nouvelle construction, des panneaux de bois aggloméré, plus épais, et depuis peu également du lambris.

Les panneaux de bois aggloméré sont vendus dans les dimensions 260 x 205 cm et 413 x 183 cm. Afin de réduire à un minimum les découpures, on tiendra compte de ces mesures standard en planifiant la hauteur totale et l'ossature.

Les poutres et les entrails faisant saillie dans le tas sont également à revêtir de panneaux. La fig. 27 montre un exemple.

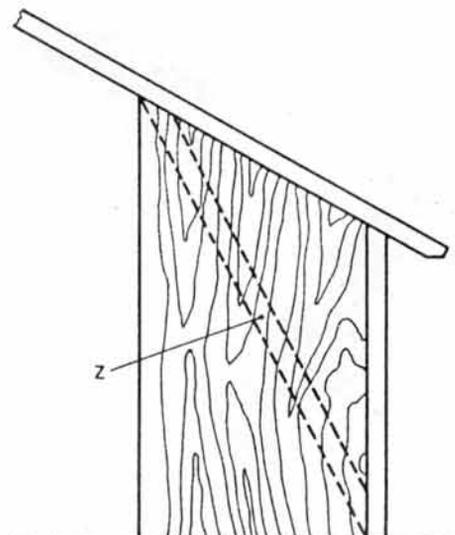


Fig. 27: Les poutres obliques et les entrails (Z) faisant saillie dans le foin entreposé doivent être revêtus de cette manière. Si le revêtement va le long des poutres, il se produit des fuites d'air dues au tassement du foin.

Tableau 14: Dimensions des poutres horizontales pour des panneaux de bois aggloméré de 1,6 cm d'épaisseur, en fonction de la portée (= intervalle entre les supports verticaux)

Portée cm	Section des poutres horizontales, en cm						
	8/10	6/12	8/12	14/16	12/18	8/22	10/20
200	x	x	-	-	-	-	-
250	-	x	x	-	-	-	-
440	-	-	-	x	x	x	x
500	-	-	-	-	x	x	x

x = adéquat; - = inadéquat

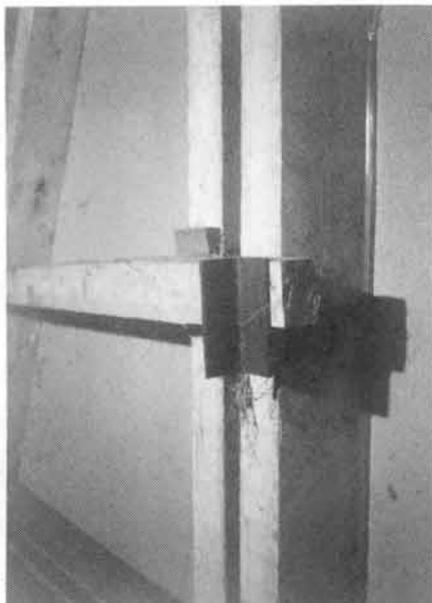


Fig. 28: La porte est verrouillée par des poutres transversales; construction permettant d'éviter des fuites d'air.



Fig. 29: Les éléments de cloison amovibles doivent être bien calfeutrés. Juste au-dessus du sol, la pression d'air s'élève à 5 – 6 mbar (= 500 - 600 Pa).

5.3 Ouvertures de prélèvement du fourrage

Pendant la période d'affouragement, le foin doit être amené vers l'animal. Le prélèvement sans griffe exige la présence d'une ou de plusieurs ouvertures dans une des cloisons. Si le foin est prélevé au moyen d'une griffe, il faut prévoir au minimum une entrée à hau-

teur du sol pour le nettoyage et la repose des éléments de grille. Des portes pouvant être verrouillées (fig. 28) ou des éléments de cloison amovibles (fig. 29) sont de bonnes solutions.

Etant donné que le foin doit être contrôlé quotidiennement pendant le séchage, il est indiqué de monter une échelle fixe contre la cloison pour éviter des accidents.

6. Plancher et sol

En montant une installation de ventilation du foin dans un bâtiment existant avec un plancher en bois, il faut faire attention aux déperditions d'air. L'étanchéité des couvercles des ouvertures de déversement doit être contrôlée en particulier; le cas échéant, on les pourvoit de profilés en caoutchouc. Si le foin est stocké sur un sol bétonné non isolé, il faudra s'attendre à un refroidissement de l'air de séchage. La déperdition de chaleur atteint environ 0.1° C par mètre courant de chemin de l'air. Entre le ventilateur et l'angle le plus reculé d'un tas de foin long de 20 m, la température de l'air baisse donc de 2° C en chiffre rond.

Lors d'une nouvelle construction, il faut prévoir la pose d'un lit de pierres ou une couche de béton d'argile expansée, suivant la nature du sol. Les sols froids peuvent être isolés par des panneaux de bois aggloméré; au cas où il se produirait toujours de l'eau de condensation, on intercale des plaques de mousse de polyuréthane dure.

De très faibles différences de niveau (de jusqu'à 20 cm) peuvent être égalisées par des hauteurs différentes de la grille. Cela vaut également pour des sols bombés.

Les fig. 30 et 31 montrent deux possibilités d'égaliser des différences de niveau de plus de 20 cm.

Les éléments de grille doivent être posés de niveau, sinon ils risquent de provoquer une pression latérale supplémentaire sur les cloisons.

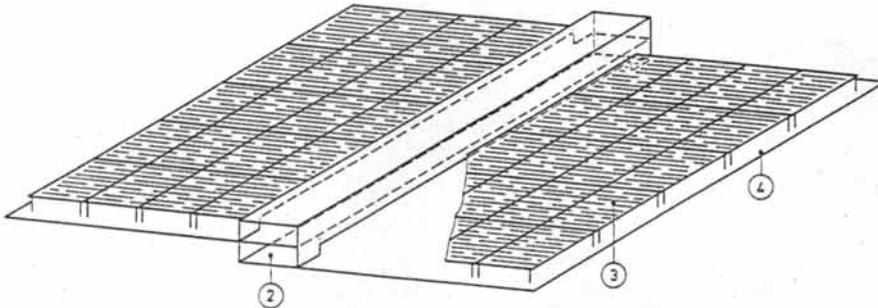


Fig. 30: La différence de niveau est égalisée par le canal (2). Du côté de la grille plus basse (3), l'air sort par le bas du canal; du côté de la grille plus haute, il sort par le haut du canal. Les autres mesures (espace entre la grille et la cloison [4], etc.) restent les mêmes.

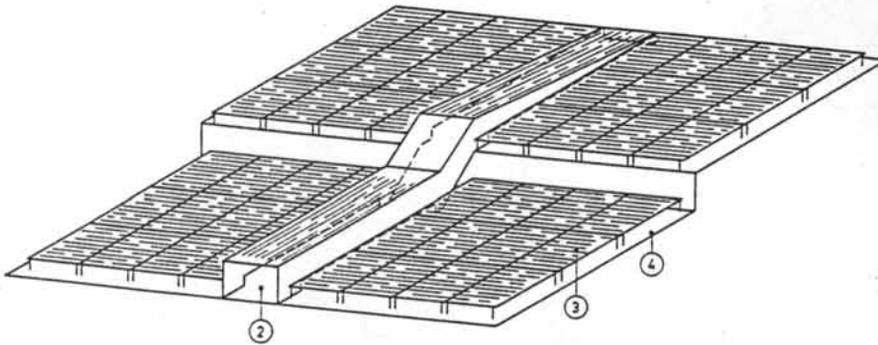


Fig. 31: Le canal (2) forme un angle d'environ 45°. Il n'y a pas de grille au-dessus de la pièce de raccord (dont la face supérieure est entièrement fermée). Les ouvertures latérales du canal sont à dimensionner en fonction des quatre surfaces partielles.

7. Dispositif de commande

Un dispositif de commande est indispensable. Le foin se réhumidifie déjà la première nuit après la rentrée si le ventilateur est en marche continue.

7.1 Minuterie

Est recommandée comme équipement minimal une minuterie réglable de quart d'heure en quart d'heure et mettant le ventilateur en marche ou l'arrêtant selon le choix. Les intervalles et les heures de marche devraient être faciles à régler.

7.2 Appareil de commande

La combinaison d'une minuterie et d'un hygrostat donne un appareil de commande. Celui-ci fait marcher le ventilateur, par ex., dès que l'humidité relative de l'air est inférieure à 80%. Le reste du temps, le foin est ventilé par intervalles. Puis, l'hygrostat est successivement réglé à une humidité relative de moins de 60%, cela jusqu'au séchage complet du foin.

Notons toutefois que la capacité d'absorption d'eau de l'air de séchage, c'est-à-dire la déficience de saturation, ne dépend pas seulement de l'humidité relative de l'air, mais également de sa température. Il existe plusieurs appareils travaillant selon ce principe. Un bouton de réglage permet d'introduire le degré d'humidité du foin, l'échelle allant de «humide» à «sec».

7.3 Commande automatique

Les appareils contrôlant également l'air sortant du tas offrent le plus de confort. La température de l'air sortant est mesurée à l'aide d'une ou de plusieurs sondes. Le principe est le suivant: tant que l'air sortant du tas est plus froid que l'air entrant, l'appareil fait marcher le ventilateur en permanence; sinon, celui-ci passe au service intermittent (dix minutes de marche et une heure

d'intervalle). Une sonde est placée dans le canal d'amenée d'air, une ou plusieurs autres sur le tas de foin.

Un autre appareil, avec une sonde près de l'ouverture d'aspiration du ventilateur et une ou plusieurs autres sur le tas, mesure la température et l'humidité relative de l'air. Un microprocesseur calcule l'humidité absolue de l'air de séchage à partir de ces données.

Tant que l'air absorbe de l'eau, le ventilateur marche en permanence. L'appareil de commande le fait passer au service intermittent dès que l'air commence à réhumidifier le foin (douze minutes de ventilation chaque heure resp. toutes les cinq heures en cas de foin humide resp. sec).

La fiabilité des appareils de commande automatique dépend fortement de l'emplacement des sondes placées sur le tas. Celles-ci donneront de faux signaux si elles sont exposées directement à la lumière et à la chaleur. Le ventilateur est arrêté trop tôt si la sonde se trouve sur une partie déjà sèche du foin; si, par contre, elle est placée au dernier endroit encore humide, il y a risque de surventilation.

7.4 Utilisation de l'installation

On fait marcher le ventilateur pendant une heure chaque fois après avoir rentré du foin préfané, sans considération des conditions météorologiques du moment. Si l'installation ne comporte pas de pompe à chaleur ou de poêle à mazout, le service continu pendant la nuit occasionne non seulement une réhumidification du foin, mais également une consommation inutile de courant électrique. L'emploi d'une minuterie ou d'un appareil de commande, automatique ou non-automatique (fig. 32), permet de réduire la consommation de courant de jusqu'à un tiers. La minuterie est à programmer de façon à ce que du fourrage lourd soit ventilé environ quatre fois une demi-heure pendant la nuit. Ensuite, on prolonge les intervalles et réduit la durée de ventilation au fur et à mesure du séchage.

Les appareils de commande doivent être nettoyés et contrôlés régulièrement. Les sondes sont à contrôler au moins une fois avant chaque période d'utilisation. Pour contrôler la précisi-

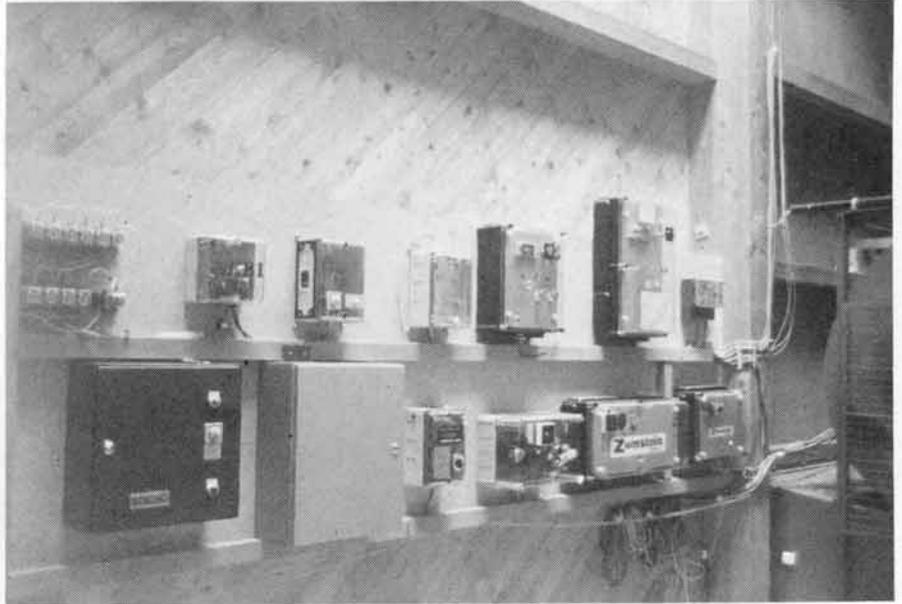


Fig. 32: Différents appareils de commande (automatique et non-automatique) ont été testés à la FAT. Dans quelques cas, l'hygrostat n'a pas répondu aux exigences. Des sondes inexactes ont été remplacées.

on de mesure de l'humidité, on enveloppe la sonde d'un chiffon humide; si l'appareil indique 90 à 100% au bout d'une heure, il est en ordre. L'emploi d'un appareil de commande ne libère

pas l'agriculteur du contrôle quotidien du foin. Le contrôle de la pression d'air est recommandé comme mesure supplémentaire.

8. Contrôle de la pression d'air

Le contrôle de la pression d'air au-dessous du tas permet de tirer des conclusions quant au débit d'air du ventilateur. Le résultat du contrôle permet à son tour de décider s'il faut entreposer, la fois suivante, peu de fourrage ou beaucoup, du fourrage bien préséché ou lourd. On se note les pressions d'air et les hauteurs du tas pendant plusieurs années et obtient ainsi un bon aperçu de ce que l'installation de ventilation peut encore supporter.

La méthode de mesure de la pression est simple. On fixe une sonde au sol, à peu près au centre d'un élément de grille, l'extrémité brasée dirigée vers le ventilateur (fig. 34). Un tuyau de plastique raccorde les sondes (une ou deux par tas) à des manomètres en U. Pendant que le ventilateur est en marche, le niveau des colonnes d'eau se modifie dans les petits tubes de verre. La différence de niveau entre les deux colonnes d'un manomètre indique la pression d'air en mm CE (colonne d'eau). 10 mm CE correspondent à environ 1 mbar = 100 Pa (Pascal).

Il est recommandé de surveiller la pression d'air aussi lorsque l'on utilise un capteur solaire ou une pompe à chaleur. Dans ce cas, le tuyau de plastique

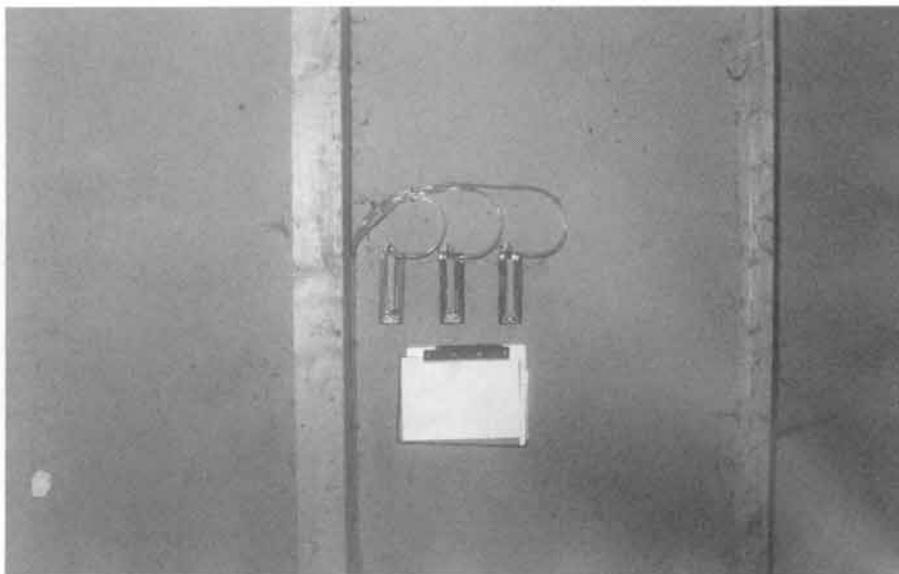


Fig. 33: De simples manomètres en U facilitent la surveillance du tas. Une échelle graduée peinte sur la face intérieure de la cloison indique la hauteur en mètres et décimètres. Une feuille de papier divisée en colonnes et un crayon à portée de la main facilitent le contrôle.

se termine dans la chambre du ventilateur, une sonde (selon fig. 34) n'étant pas nécessaire. Une pression supérieure à 15 – 20 mm CE indique que les dimensions du capteur solaire sont inadéquates.

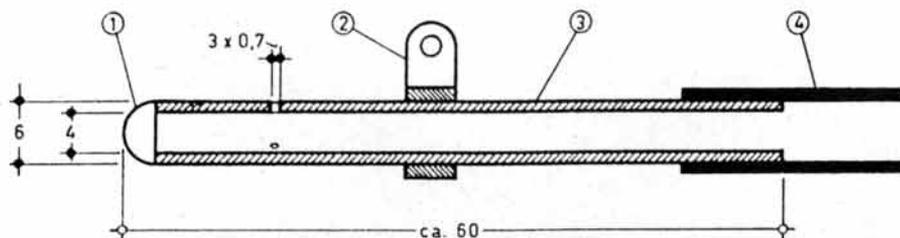


Fig. 34: Sonde de contrôle de la pression d'air, avec trois alésages pour l'entrée d'air (mesures en mm).

- 1 = extrémité soudée et arrondie
- 2 = bride de fixation
- 3 = tube de laiton
- 4 = tuyau de plastique

On peut aussi se passer du manomètre et simplement utiliser un tuyau de plastique transparent (4); on lui donne la forme d'un U et le fixe sur une planche de bois au moyen de brides (2).

9. Capacité de séchage de l'installation

La capacité de séchage d'une installation de ventilation du foin dépend des facteurs suivants:

- surface de l'installation;
- humidité relative et température de l'air aspiré;
- teneur en MS du fourrage au moment de l'engrangement;
- débit d'air du ventilateur;
- stade d'utilisation du fourrage (une proportion plus élevée de fibres brutes donne une meilleure déshumidification);
- composition botanique du fourrage (les fourrages équilibrés et riches en herbes sèchent bien);
- longueur de coupe (une coupe courte favorise le processus de séchage).

La déficience de saturation de l'air peut être calculée en fonction de la température et de l'humidité relative (tableau 15).

La déshydratation par m³ d'air de séchage se détermine à partir de la déficience de saturation. Comme le montre la fig. 35, elle dépend également de la teneur en MS du foin préfané.

Le foin préfané ne peut pas être ventilé pendant une durée illimitée; après un certain temps, on court le risque de provoquer de la formation de moisissure, suivant la température (tableau 16).

Afin de prévenir des pertes par moisissure, il faut faire sécher le foin préfané dans les 2.5 à 14 jours, suivant le procédé de séchage et les conditions météorologiques. De courtes périodes de mauvais temps (de jusqu'à 10 jours) peuvent être franchies par une ventilation intermittente parce que la température de l'air sortant du tas tombe en dessous de 15° C.

Tableau 15: Déficience de saturation en g/m³, en fonction de la température et de l'humidité relative de l'air
(les valeurs indiquées s'entendent pour une hauteur barométrique de 1 bar)

Humidité relative de l'air (%):	40	50	60	70	80	90
Température de l'air (°C):						
2	3,4	2,8	2,2	1,7	1,1	0,6
4	3,9	3,2	2,6	1,9	1,3	0,6
6	4,4	3,7	2,9	2,2	1,5	0,7
8	5,0	4,2	3,4	2,5	1,7	0,8
10	5,7	4,8	3,8	2,9	1,9	1,0
12	6,5	5,4	4,3	3,3	2,3	1,1
14	7,4	6,2	4,9	3,7	2,5	1,2
16	8,4	7,0	5,6	4,2	2,8	1,4
18	9,5	7,9	6,3	4,7	3,2	1,6
20	10,7	8,9	7,1	5,4	3,6	1,8
22	12,0	10,1	8,1	6,1	4,0	2,0
24	13,6	11,3	9,1	6,8	4,6	2,3
26	15,3	12,7	10,2	7,7	5,1	2,6
28	17,4	14,3	11,5	8,6	5,8	2,9
30	19,2	16,1	12,9	9,7	6,5	3,3

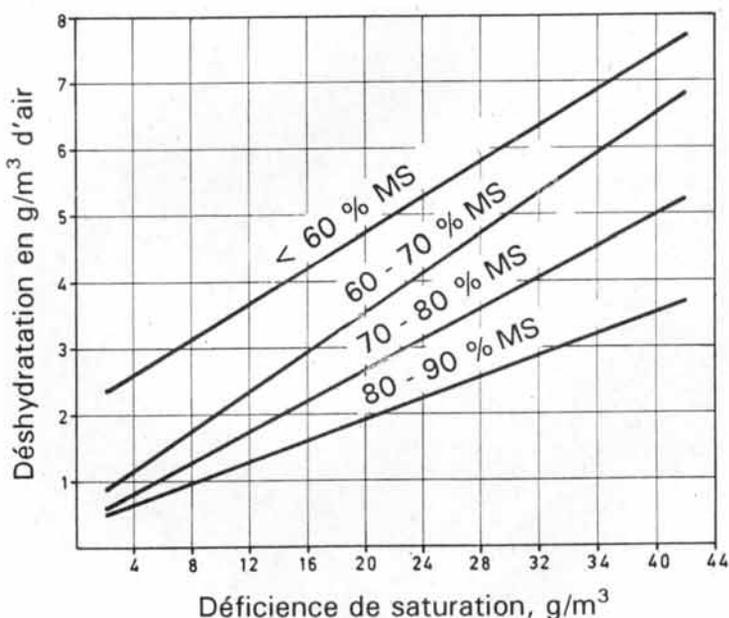


Fig. 35: La capacité d'absorption d'eau de l'air de séchage dépend de la déficience de saturation de l'air et de la teneur en MS du fourrage. Le graphique présente les résultats d'essais effectués à la FAT, totalisant 2250 heures de ventilation.

Tableau 16: Danger de formation de moisissure par l'air humide sortant du tas (selon Lehmann et Hartmann)

Température de l'air sortant, °C	15	20	25	30 à 40
Durée de ventilation maximale en h	140	80	70	60
Nombre de jours à 10 h (ventilation à froid)	14	8	7	6
Nombre de jours à 12 h (capteur solaire)	11 ² / ₃	6 ² / ₃	6	5
Nombre de jours à 24 h (pompe à chaleur)	6	3 ¹ / ₃	3	2 ¹ / ₂

10. Procédés de ventilation

Il existe différents procédés qui permettent d'améliorer la capacité de séchage d'une installation de ventilation à air froid. Leurs avantages et inconvénients sont récapitulés dans le tableau 17.

10.1 Ventilation à froid

L'emplacement du ventilateur joue un rôle important quant à la durée de séchage et, par conséquent, à la consommation de courant électrique. Ainsi il est recommandé d'installer le ventilateur à la face sud ou ouest du bâtiment. La capacité d'absorption d'eau de l'air de séchage augmente si l'air est dirigé à travers des surfaces ensoleillées (toit, paroi de la grange, cour). Lorsqu'il y a un tas de fumier, des arbres ou des eaux ouvertes à proximité (ce qu'il faudrait tâcher d'éviter), on place le ventilateur dans une chambre et fait aspirer l'air par le haut. L'air sortant du tas ne doit en aucun cas être réaspiré. Lorsque le ventilateur aspire l'air en dessous du toit, on parle déjà d'un capteur solaire pour le séchage en grange.

10.2 Capteur solaire

Les rayons solaires E (fig. 36) chauffent une surface sombre (= absorbeur), par ex. un toit d'éternit. Une partie des rayons (R) se reflète, une autre transmet de la chaleur (J) à l'environnement proche. Reste la chaleur T. Dans le cas du capteur solaire translucide (fig. 37), c'est sur la sous-toiture sombre que les rayons solaires sont transformés en chaleur.

L'absorbeur chauffe l'air de séchage. L'échauffement de l'air donne l'énergie utile N. Le rendement correspond au rapport entre N et E.

Le but de l'échauffement de l'air de séchage consiste à diminuer l'humidité relative et à augmenter la capacité d'absorption d'eau de cette quantité d'air. Lorsque, par exemple, la température de l'air monte de 15°C à 21°C, l'humidité relative baisse de 90% à environ 60%. Ce taux suffit au séchage complet du foin préfané jusqu'à une teneur de 88% de MS environ. Selon les expériences, la performance d'un capteur solaire peut être considérée comme satisfaisante si l'élévation de la température de l'air atteint 6°C avec un rayonnement solaire de 800 W/m² (fig. 38).

Listons maintenant les facteurs qui ont une influence sur la performance d'un capteur solaire:

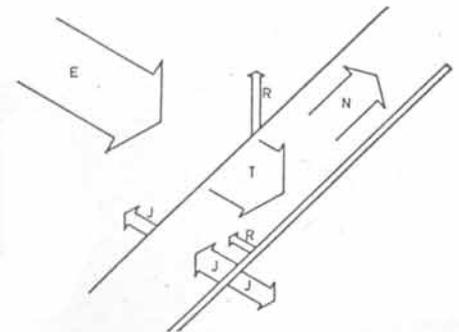


Fig. 36: Schéma d'un capteur solaire.
 E = rayons solaires
 R = réflexion
 J = perte de chaleur
 T = lumière passant à travers la couverture translucide ou chaleur dans le cas d'une couverture sombre
 N = énergie utile (échauffement de l'air)

Exposition

Le capteur solaire est à installer de façon à être exposé au rayonnement solaire le plus longtemps et le plus complètement possible. Pendant les mois de mai à septembre, un toit incliné de 20° et exposé plein sud permet d'utiliser au mieux l'énergie solaire (= 100% au tableau 18). Un toit incliné de 50° et exposé au nord n'utilise le rayonnement solaire qu'à 32%.

Tableau 17: Avantages et inconvénients des différents procédés de séchage du foin

Procédé	Avantages	Inconvénients
Ventilation à froid	<ul style="list-style-type: none"> - investissement modeste - frais de séchage peu élevés 	<ul style="list-style-type: none"> - dépend des conditions météorologiques - faible capacité de séchage
Capteur solaire	<ul style="list-style-type: none"> - frais d'énergie peu élevés - frais de séchage peu élevés 	<ul style="list-style-type: none"> - dépend des conditions météorologiques
Couverture translucide (par ex. polyester, polycarbonate, plaques de verre)	<ul style="list-style-type: none"> - rendement élevé - relativement peu de pertes lors de faibles débits d'air et de coups de vent sur la surface du capteur 	<ul style="list-style-type: none"> - peu de résistance à la grêle - jaunissement et usure - matériaux combustibles - défavorable du point de vue esthétique
Couverture opaque (par ex. éternit, tôle, tuiles)	<ul style="list-style-type: none"> - peu voyante - solide - résistante au feu et à la grêle 	<ul style="list-style-type: none"> - rendement légèrement inférieur - pertes de pression plus élevées, surtout avec l'éternit - rendement réduit des capteurs exposés au vent
Poêle à mazout	<ul style="list-style-type: none"> - ne dépend pas des conditions météorologiques - haute capacité de séchage 	<ul style="list-style-type: none"> - frais d'énergie et de séchage élevés - danger d'incendie et de pollution des eaux
Pompe à chaleur	<ul style="list-style-type: none"> - ne dépend pas des conditions météorologiques - haute capacité de séchage 	<ul style="list-style-type: none"> - frais d'investissement élevés - frais de séchage élevés - haute puissance absorbée

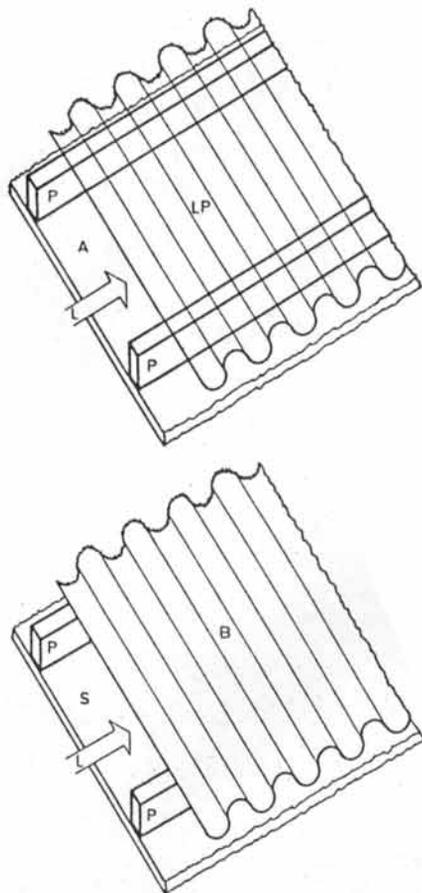


Fig. 37: En haut: capteur translucide; en bas: capteur recouvert d'un matériau sombre.

- P = pannes ou chevrons
- LP = plaques translucides
- A = absorbeur (panneau de bois aggloméré, noir)
- B = éternit, tôle ou tuiles (= absorbeur)
- S = panneau de bois aggloméré ou bâche
- L = flux d'air

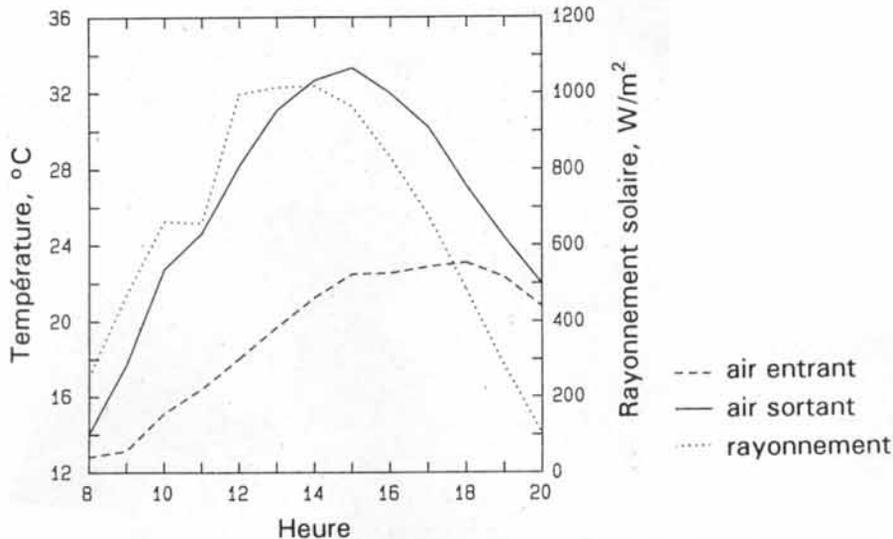


Fig. 38: Evolution de la température et du rayonnement global dans le cas du capteur solaire utilisé à la FAT (capteur en matière plastique). Le toit est incliné de 18° et présente une surface de 96 m². Exposition: écart de 4° par rapport au sud.

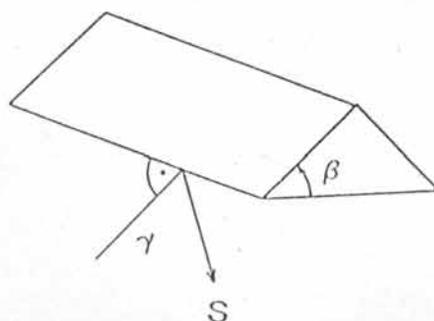


Fig. 39: L'exposition d'un toit est définie par les deux angles suivants:
 γ = écart par rapport à l'exposition plein sud
 β = inclinaison du toit

Surface

Un capteur de grande surface est plus performant qu'un petit.

Rendement

Plus il est élevé et meilleure est l'utilisation de l'énergie solaire. Le rendement peut être amélioré si l'on optimise la vitesse d'avancement de l'air, particulièrement dans le cas des capteurs recouverts d'un matériau sombre.

Vitesse de l'air dans le capteur

Une vitesse élevée dans le capteur donne une bonne turbulence de l'air et, par conséquent, un bon échange de chaleur entre le revêtement du toit et

Tableau 18: Degrés d'utilisation du rayonnement direct par comparaison à l'exposition idéale plein sud et à une inclinaison du toit de 20°

Ecart par rapport au sud γ	Inclinaison du toit β				
	Degrés	10°	20°	30°	40°
0 sud	98	100	99	96	89
30	97	99	98	94	88
60	95	94	92	89	83
90 ouest/est	91	88	84	79	72
120	88	81	73	65	57
150	86	76	65	52	39
180 nord	85	74	62	47	32

l'air de séchage, autrement dit: un rendement élevé.

Perte de pression due au capteur

Le ventilateur aspire l'air de séchage entre le toit et le panneau de bois aggloméré formant la sous-toiture. L'entrée de l'air depuis l'extérieur et son passage le long de la face inférieure du toit, généralement ondulée, provoquent une perte de pression. Celle-ci augmente très rapidement lorsque la vitesse d'avancement de l'air monte (au carré de la vitesse!). La perte de pression devrait être limitée à 1 mbar. Exceptionnellement, et pourvu que le ventilateur présente une pression de réserve suffisante, cette limite peut être repoussée à 1.5 mbar = 15 mm CE (raison pour laquelle la pression doit être contrôlée!). Ces valeurs comprennent également les pertes de pression se produisant dans le canal collecteur jusqu'au ventilateur, à condition que les conduits d'air soient dimensionnés comme indiqué dans le tableau 11. La perte de pression due au capteur solaire exige un moteur de ventilateur de 25 à 35% plus puissant. Cette puissance supplémentaire est toutefois

plus que compensée par la réduction de la durée de séchage, réduction due à l'échauffement de l'air. Somme toute, la consommation de courant électrique est inférieure en comparaison de la ventilation à froid.

Hauteur des canaux

Celle-ci est à choisir de façon à obtenir la vitesse optimale de l'air. Plus les canaux sont bas et meilleur sera le rendement, mais plus importante sera aussi la perte de pression due au capteur!

Longueur du capteur

Le rendement baisse avec une longueur accrue du capteur solaire. En plus, il faut alors prévoir des canaux relativement hauts pour éviter des pertes de pression accrues.

D'une part, on cherche à obtenir un rendement aussi élevé que possible, c'est-à-dire un échauffement de l'air de 6° C au minimum. D'autre part, la perte de pression dépassera la valeur limite de 1 mbar (ou de 1.5 mbar au maximum) si la vitesse d'avancement de l'air est trop élevée.

Un programme pour PC, développé à la FAT, calcule, suivant les dimensions du capteur solaire, le rendement, le degré d'échauffement et la vitesse d'avancement de l'air ainsi que la perte de pression pour des canaux de hauteur différente. Le tableau des résultats apparaissant sur l'écran ou imprimé sur papier, selon le choix, indique les hauteurs optimales des canaux avec les pertes de pression et les degrés d'échauffement de l'air correspondants.

Certains bureaux d'architecture, des vulgarisateurs agricoles, des conseillers en machinisme agricole, etc. se servent déjà de ce programme. Pour le moment, la FAT offre également ses services pour calculer des capteurs solaires. A cette fin, il lui faut les informations récapitulées dans le tableau 19.

Explications quant au questionnaire:

- L'indication de l'altitude est indispensable pour les calculs; les chiffres entre parenthèses indiquent l'altitude minimale et maximale possibles.
- Selon le choix, les calculs se font pour un ou deux tas, ventilés séparément ou simultanément par de l'air provenant du même capteur solaire.

Tableau 19: Questionnaire pour le calcul d'un capteur solaire

(Données à introduire)

Conseiller:	Nom: _____ NPA, lieu: _____	Adresse: _____ Téléphone: _____	
Exploitation:	Nom: _____ NPA, lieu: _____ Altitude: _____ (200-1700 m)	Adresse: _____ Téléphone: _____	
Nombre de tas:	_____ (max.: 2 par capteur)		
Base du tas 1:	_____ (30-200 m ²)	Base du tas 2: _____ (30-200 m ²)	
Hauteur du tas 1:	_____ (3-8 m)	Hauteur du tas 2: _____ (3-8 m)	
Débit d'air 1*:	_____ (2-24 m ³ /s)	Débit d'air 2*:	_____ (2-24 m ³ /s)
avec pression de:	_____ (mbar)		
* Débit d'air total, si on utilise plusieurs ventilateurs par tas!			
Type de capteur:	_____ (1: éternit brun, ondulation transversale 2: éternit brun, ondulation longitudinale 3: aluminium brun, ondulation transversale 4: polycarbonate translucide, ondulation transversale 5: couverture en tuiles)		
Longueur totale:	_____ (5-60 m dans le sens du flux d'air; canal collecteur compris)		
Longueur partielle:	_____ (0-30 m, demi-canal collecteur compris)		
Largeur:	_____ (1-40 m en travers par rapport au flux d'air)		
Hauteur des pannes:	_____ (12-50 cm = hauteur max.)		
Ecart par rapport au sud:	_____ (0° = plein sud; 90° = est; 180° = nord; 270° = ouest)		
Inclinaison du toit:	_____ (0° = toit plat; 50° = toit raide)		

Envoyer également un plan dessiné du capteur!

– Surface de base et hauteur du tas: sont à indiquer, dans les limites des valeurs notées entre parenthèses, soit les dimensions planifiées (si l'installation n'a pas encore été construite), soit les dimensions réelles. Si la surface de base du tas est exceptionnellement supérieure à 200 m², on la divise en deux. On calcule donc deux tas et tient compte du total des deux valeurs résultant des calculs.

– Débit d'air d'un ventilateur existant: la liste de ventilateurs de la FAT renseigne sur les débits d'air fournis à raison d'une certaine pression d'air. A défaut d'une indication correspondante, le programme PC propose une valeur adéquate.

– Le programme établit des calculs pour cinq types différents de capteurs solaires (fig. 40).

Type 1:

– éternit brun, ondulation transversale (par rapport au flux d'air); toit à pannes (fig. 43)

– rendement: 40 à 50%

– surface (valeur indicative): 2 à 3 fois la surface de base du tas

Type 2:

– éternit brun, ondulation longitudinale, par ex. toit de tuiles transformé, à chevrons (fig. 44)

– rendement et surface = type 1

Type 3:

– aluminium brun, ondulation transversale

– rendement: 45 à 55%

– surface (valeur indicative): 1.5 à 2.5 fois la surface de base du tas

Type 4:

– polycarbonate translucide, ondulation transversale

– rendement: 55 à 65%

– surface (valeur indicative): 1 à 2 fois la surface de base du tas

Type 5:

– tuiles (calcul fait pour un toit à chevrons)

– rendement: 30 à 40%

– surface (valeur indicative): 2.5 à 3.5 fois la surface de base du tas

Les avantages et inconvénients des différents types de capteurs solaires sont récapitulés dans le tableau 17.

– La longueur du capteur solaire est la dimension allant dans la direction du flux d'air. La longueur totale se calcule toujours canal collecteur compris (fig. 41). Lorsque l'air est aspiré de deux côtés, on compte une longueur partielle plus le demi-canal collecteur. La lar-

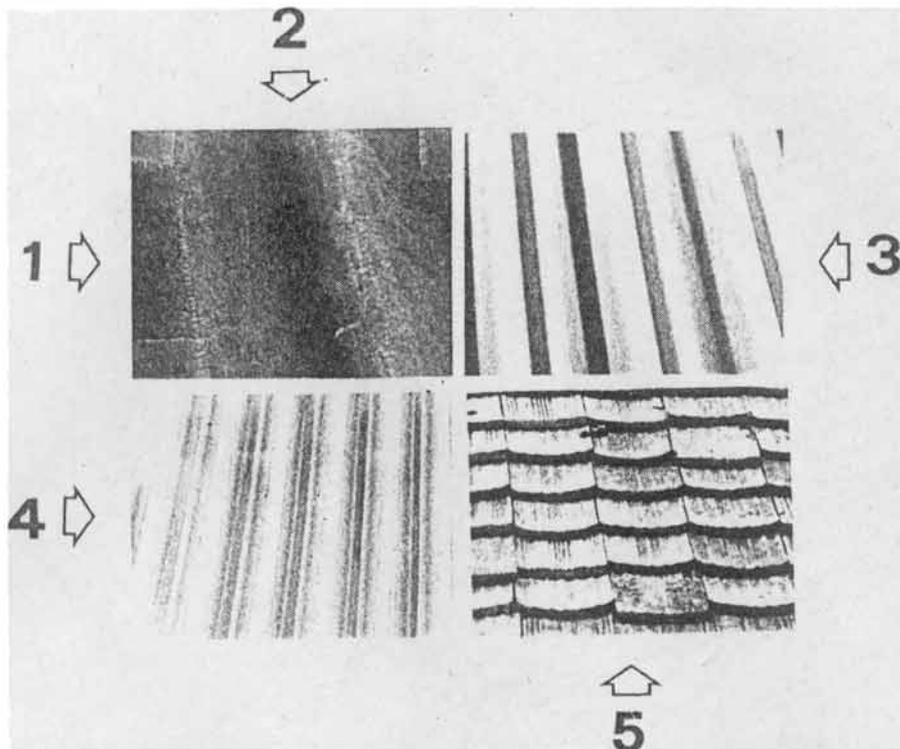


Fig. 40: Les cinq types de capteurs solaires parmi lesquels on peut choisir.

1 = éternit, ondulation transversale (par rapport au flux d'air)

2 = éternit, ondulation longitudinale (toit à chevrons)

3 = aluminium, ondulation transversale

4 = polycarbonate translucide, ondulation transversale

5 = tuiles (toit à chevrons)

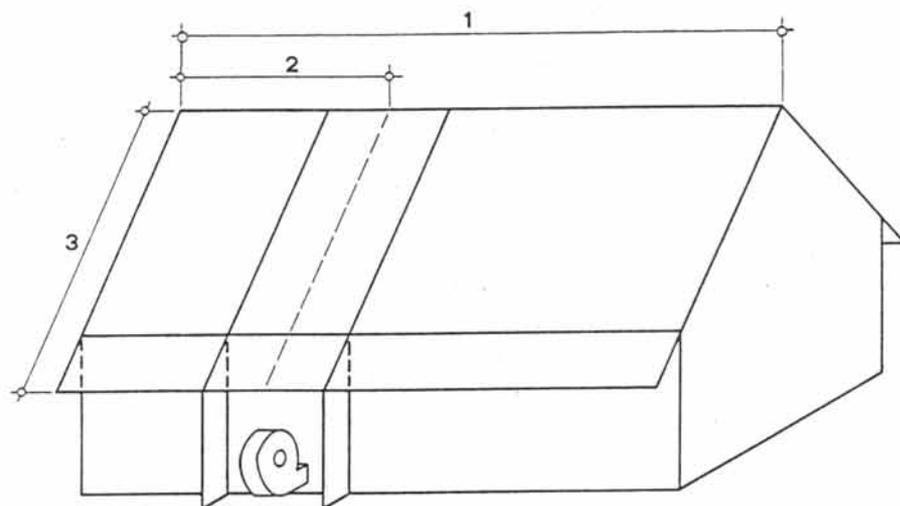


Fig. 41: Dimensions du capteur solaire dans le cas d'un toit à pannes:

1 = longueur totale, canal collecteur compris

2 = longueur partielle, y compris la moitié du canal collecteur

3 = largeur du capteur

Dans le cas d'un toit à chevrons:

1 = largeur du capteur

3 = longueur du capteur

geur du capteur est mesurée transversalement par rapport au flux d'air.

– Hauteur des poutres: on indique la hauteur réelle des pannes ou des chevrons (fig. 42). Dans le cas des capteurs des types 2 et 5 (toit à chevrons), la hauteur du canal comprend également la hauteur des lattes transversales de 6 resp. 2 cm. Un toit à pannes et un toit à chevrons sont illustrés dans les fig. 43 et 44.

Un exemple de calcul est présenté au tableau 20. Dans le cas des types 4 et 3 (polycarbonate resp. tôle), l'élévation de température de 6° C pourrait être atteinte avec une surface absorbante plus petite. La différence de rendement entre le capteur à tuiles et celui d'éternit ne peut guère être compensée par une extension de la surface du toit de tuiles. La surface existante et le rendement pratiquement constant à travers toutes les hauteurs des canaux posent souvent des limites.

Pour se renseigner sur d'autres détails quant aux différentes façons de construire des capteurs solaires, des canaux collecteurs, etc., soit dans des toits à pannes ou dans des toits à chevrons, on consultera le Rapport FAT 407.

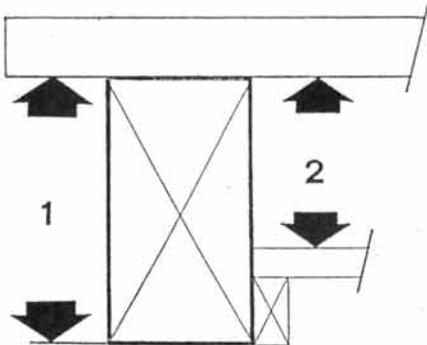


Fig. 42: Hauteur des poutres (1) et hauteur du canal (2).

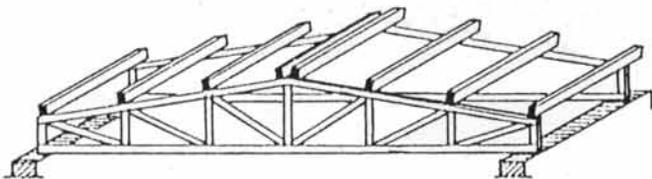


Fig. 43: Construction à pannes pour un capteur à éternit ou de tôle.

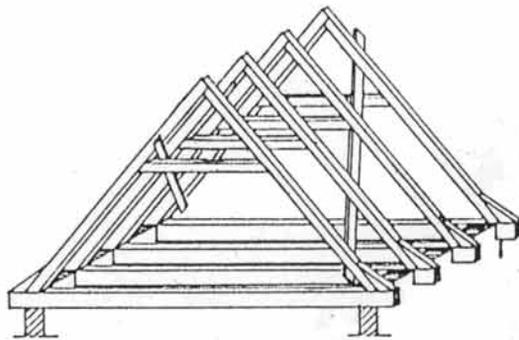


Fig. 44: Construction à chevrons pour un capteur à tuiles ou une toiture d'éternit ondulé parallèlement au flux d'air.

Tableau 20: Comparaison des différents types de capteurs solaires

(surface: 272 m² pour un tas de 110 m² de base [facteur 2,5]; longueur: 16,5 m [canal collecteur compris]; largeur: 16,5 m; aspiration d'air d'un seul côté; rayonnement solaire: 800 W/m²; altitude: 550 m)

Type	Direction de l'air par rapport à l'ondulation	Hauteur des canaux pour une perte de pression max. de 1 mbar cm	Rendement %	Élévation de température de l'air °C
1	en travers	14	45	7,2
2	en long	17/11*	43	7,0
3	en travers	13	51	8,2
4	en travers	11	59	9,5
5	en long (par rapport aux chevrons)	15/13*	38	6,1

* avec/sans lattes transversales

10.3 Pompe à chaleur

On distingue deux systèmes différents de pompes à chaleur; les deux comprennent les mêmes éléments (élément de chauffage, élément de refroidissement, compresseur et soupape d'étranglement), mais l'air n'est pas dirigé de la même façon.

La pompe à chaleur air-air (fig. 45) tire son énergie de l'air humide sortant du tas. Un ventilateur auxiliaire aspire ce volume d'air à travers l'élément de refroidissement (évaporateur, 3). Le refroidissement de l'air humide provoque une condensation de la vapeur d'eau. Le frigorigène gazeux absorbe la chaleur de condensation ainsi que l'énergie nécessaire au refroidissement de l'air. Le compresseur (1) comprime le frigorigène et le porte à une température encore plus élevée. L'élément de chauffage (condensateur, 4) chauffe l'air de séchage aspiré par le ventilateur principal de l'installation. Le frigo-

rigène se condense en dégageant de la chaleur supplémentaire; puis, il se détend dans la soupape d'étranglement (2) et s'évapore dans l'élément de refroidissement (3).

Dans le cas de la pompe à chaleur de déshumidification (fig. 46), l'air de séchage est aspiré par le ventilateur principal de l'installation. Une partie de l'air aspiré passe par l'élément de refroidissement (3), le volume total par l'élément de chauffage (4). En été, lorsque l'air extérieur est très sec, la machine est arrêtée par un hygostat dès que l'humidité relative de l'air atteint une certaine valeur (réglable), par ex. 50%. Lorsque l'humidité relative de l'air est inférieure à 50%, il ne se produit pratiquement plus de condensation, c'est-à-dire le refroidissement de l'air ne suffit pas pour éliminer de l'eau de condensation. En automne, à de basses températures de l'air extérieur, on passe au séchage par circulation d'air. Cette méthode permet d'empêcher la

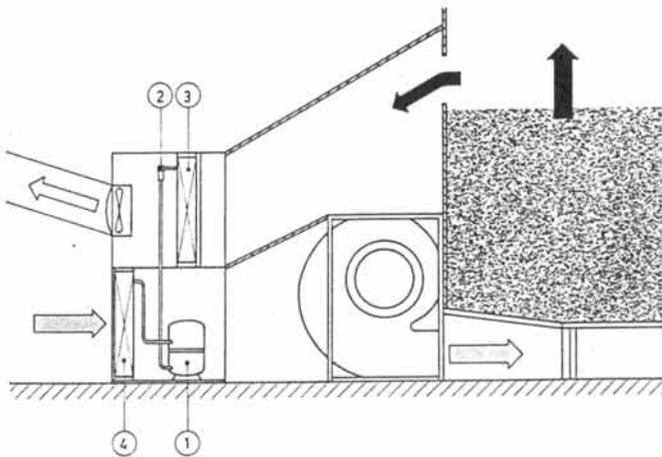


Fig. 45: Pompe à chaleur air-air avec:
 1 = compresseur
 2 = soupape d'étranglement
 3 = élément de refroidissement
 4 = élément de chauffage

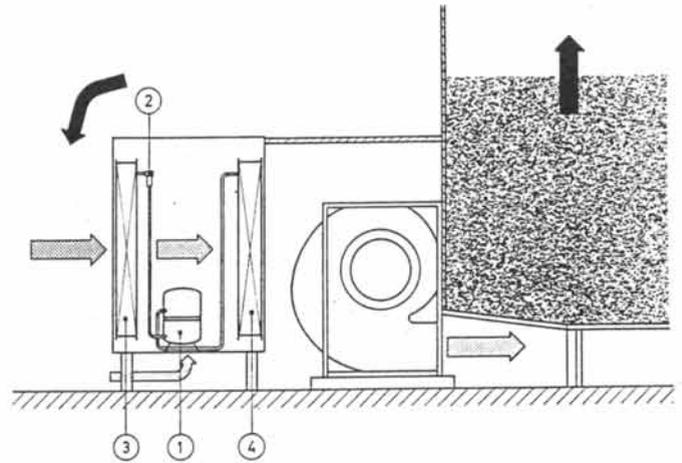


Fig. 46: Pompe à chaleur de déshumidification. Elle est équipée des mêmes éléments que la pompe à chaleur air-air, mais utilise normalement l'humidité de l'air aspiré et non pas l'air sortant du tas.

formation de glace sur l'élément de refroidissement lorsque les températures de l'air tournent autour de zéro.

Les deux systèmes permettent de sécher du fourrage grossier et du maïs d'ensilage (plantes entières hachées) 24 heures sur 24. Le séchage de maïs d'ensilage demande un séchoir discontinu séparé (fig. 47).

Les deux systèmes ont été testés à la FAT. Les Rapports FAT nos. 324, 370 et 380 renseignent sur les résultats particuliers et d'autres détails. Les tests ont été effectués avec des moteurs de compresseur de 6 et de 7 kW. S'y ajoute le moteur du ventilateur.

Une capacité de séchage égale à celle de l'installation d'essai de la FAT (avec un tas de 50 m² de base) exige les puissances nominales spécifiées dans le tableau 21. Celui-ci montre, en outre, la comparaison avec la puissance calorifique d'une soufflerie à air chaud équipée d'un brûleur (rendement: 75%) et la consommation correspondante de mazout.

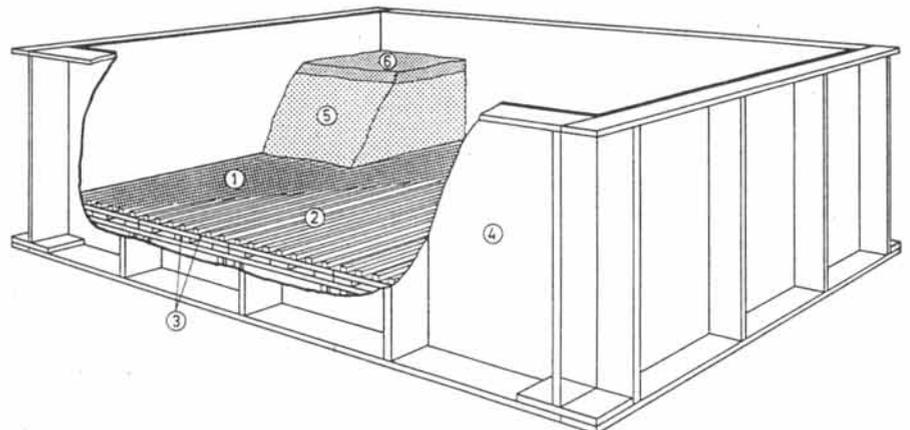


Fig. 47: Le séchoir discontinu servant au séchage de maïs d'ensilage présente une surface de 25 m² (= demi-surface de base du tas) et une hauteur de 2 m.
 1 = treillis de fil de fer ou tôle perforée (Fr. 26.-/m²)
 2 = lattes ou éléments de grille
 3 = poutres
 4 = cloisonnement
 5 = maïs haché
 6 = zone humide (recondensation); cette zone est plus étendue dans le cas de la pompe à chaleur air-air (avec un débit d'air réduit à 2,4 m³/s) que dans celui de la pompe à chaleur de déshumidification (avec 4,4 m³/s en moyenne)

Tableau 21: Besoins en puissance nominale du ventilateur et de la pompe à chaleur, en fonction de la surface de base du tas

Surface de base du tas, m ²	50	75	100	125	150
Puissance nominale du ventilateur, kW	4	5,5	7,5	9,2	11
Puissance nominale du compresseur, kW	7	10,5	14	17,5	21
Puissance calorifique de la soufflerie à air chaud, kcal/h	52 000	78 000	104 000	130 000	156 000
Puissance calorifique de la soufflerie à air chaud, kW	60	90	120	150	180
Consommation de mazout, l/h	6	9	12	15	18

11. Besoins d'investissement et énergie nécessaire

Les besoins d'investissement des installations de ventilation à froid et à chaud sont récapitulés dans le tableau 22 (source: «Système de prix par modules unitaires» de la FAT). Les prix des ventilateurs et d'autres éléments (dispositif de guidage de l'air, manomètre, etc.) y sont indiqués à titre complémentaire. Pour la ventilation à chaud, il faut compter soit le capteur solaire, soit la pompe à chaleur.

Les valeurs quant aux besoins d'énergie s'entendent pour des conditions météorologiques telles qu'elles prédominent à Tännikon. Des différences dues à l'emplacement de l'installation de ventilation sont possibles. Le séchage et la consommation d'énergie (tableau 23) dépendent, en plus, de la manière dont le fourrage est rentré (souffleuse avec distributeur ou griffe).

Le séchage de cossettes de betteraves sucrières au moyen d'une pompe à chaleur demande jusqu'à 200 kWh par dt de matière sèche et n'est donc pas économique.

12. Conclusion

Avant de planifier et de construire une installation de ventilation du foin, on calcule le volume nécessaire du tas. La hauteur du tas plus la hauteur de la grille et la hauteur de tassement donnent la hauteur du cloisonnement.

A ne pas oublier l'espace nécessaire à l'intervention de la machine d'entreposage (répartiteur télescopique ou griffe).

Pour choisir le ventilateur, on compare non seulement les valeurs mesurables, telles que débit et pression d'air, rendement, bruit, etc., mais également les prix, le service après-vente et l'assistance prêtée par le fournisseur. L'emplacement du ventilateur a une influence directe sur le séchage. Des conduits d'air correctement dimensionnés et la grille sont d'autres éléments importants pour le bon fonctionnement d'une installation de ventilation du foin.

De nombreuses installations de ventilation à froid pourraient encore être améliorées, par ex. par la mise en place d'un dispositif de commande. Celui-ci fait arrêter le ventilateur dès que les conditions météorologiques sont telles que l'eau ne peut plus être absorbée par l'air de séchage.

La capacité de séchage d'une installation de ventilation à froid peut être augmentée par l'emploi d'un capteur solaire; celui-ci occasionne les frais d'énergie les moins élevés (tableau 23), mais il dépend malheureusement des conditions météorologiques.

Pendant de longues périodes de mauvais temps, on se sert toujours du poêle à mazout. Le prix du mazout et le gaspillage d'énergie mis à part, celui-ci est également à déconseiller pour des raisons de protection de l'environnement. La pompe à chaleur peut être envisagée en tant qu'alternative. Vu les frais d'investissement et les frais annuels élevés, son utilisation n'est toutefois justifiée qu'à condition que l'on fasse sécher non seulement du foin, mais aussi d'autres produits agricoles (maïs haché ou céréales). Dans le cas de la prise en compte de courant de crête et dans les régions à faibles réseaux de distribution, la puissance absorbée élevée constitue un autre inconvénient de la pompe à chaleur.

Les dimensions des capteurs solaires peuvent être calculées aujourd'hui à l'aide d'un programme pour PC. Celui-ci permet une planification optimale quant à l'échauffement de l'air et aux pertes de pression. Une extension du programme (choix du ventilateur, calcul de la capacité, etc.) est prévue.

Tableau 23: Elimination d'eau et consommation d'énergie relevées pour les différents procédés de séchage
(résultats des essais effectués à Tännikon)

Procédé de séchage	Fourrage grossier		Consommation d'énergie	
	Elimination d'eau en g par m ³ d'air		en kWh par dt de foin	
	Plage	Moyenne	Plage	Moyenne
Ventilation à froid	0,7-1,3	1,0	6-18	12
Capteur solaire	1,3-2,1	1,7	4-16	7
Pompe à chaleur air - air	1,0-2,4	1,7	7-31	15
Pompe à chaleur de déshumidification	0,5-1,7	1,2	11-56	27
	Maïs d'ensilage			
Ventilation à froid	pas possible			
Capteur solaire	pas possible			
Pompe à chaleur air - air	2,7-3,8	3,2	38-138	58
Pompe à chaleur de déshumidification	1,6-2,3	1,9	47- 82	63

Tableau 22: Besoins d'investissement de la ventilation à froid et de la ventilation à chaud (avec capteur solaire ou pompe à chaleur) selon le «Système de prix par modules unitaires», en valeurs arrondies

Eléments	Unité	Fr.	Eléments	Unité	Fr.
Ventilation à froid 75 m ² , hauteur 4 m, 300 m ³ ; ventilateur, grille, cloisonnement compris	Montant global m ³	21 600.- 72.-	Pompe à chaleur ou déshumidificateur pour tas de 100 m ² de base; puissance 15 kW	Pièce	40 900.-
Ventilation à froid 75 m ² , hauteur 5 m, 375 m ³ ; ventilateur, grille, cloisonnement compris	Montant global m ³	25 300.- 68.-	Pompe à chaleur ou déshumidificateur pour tas de 125 m ² de base; puissance 19 kW	Pièce	44 700.-
Ventilation à froid 100 m ² , hauteur 4 m, 400 m ³ ; ventilateur, grille, cloisonnement compris	Montant global m ³	25 800.- 64.-	Pompe à chaleur ou déshumidificateur pour tas de 150 m ² de base; puissance 21 kW	Pièce	45 900.-
Ventilation à froid 100 m ² , hauteur 5 m, 500 m ³ ; ventilateur, grille, cloisonnement compris	Montant global m ³	30 200.- 60.-	Ventilateur, 3 kW; installation et raccordement non compris	Pièce	3 400.-
Ventilation à froid 125 m ² , hauteur 4 m, 500 m ³ ; ventilateur, grille, cloisonnement compris	Montant global m ³	29 800.- 60.-	Ventilateur, 4 kW; installation et raccordement non compris	Pièce	4 000.-
Ventilation à froid 125 m ² , hauteur 5 m, 625 m ³ ; ventilateur, grille, cloisonnement compris	Montant global m ³	34 400.- 55.-	Ventilateur, 5,5 kW; installation et raccordement non compris	Pièce	4 700.-
Ventilation à froid 150 m ² , hauteur 4 m, 600 m ³ ; ventilateur, grille, cloisonnement compris	Montant global m ³	32 900.- 55.-	Ventilateur, 7,5 kW; installation et raccordement non compris	Pièce	5 600.-
Ventilation à froid 150 m ² , hauteur 5 m, 750 m ³ ; ventilateur, grille, cloisonnement compris	Montant global m ³	37 500.- 50.-	Ventilateur, 9,2 kW; installation et raccordement non compris	Pièce	6 300.-
Cloisonnement sur membrure existante; panneaux de bois aggloméré 19 mm	m ²	44.-	Ventilateur, 11 kW; installation et raccordement non compris	Pièce	6 600.-
Cloisonnement indépendant; membrure en bois avec panneaux de bois aggloméré 19 mm	m ²	127.-	Ventilateur, 15 kW; installation et raccordement non compris	Pièce	7 400.-
Eléments de cloison amovibles (supplément au cloisonnement indépendant)	Pièce	308.-	Grille	m ²	24.-
Capteur solaire pour tas de 75 m ² de base; toiture d'éternit ondulé; conduits d'air compris	Pièce	10 000.-	Canal d'amenée d'air	m	148.-
Capteur solaire pour tas de 100 m ² de base; toiture d'éternit ondulé; conduits d'air compris	Pièce	12 400.-	Dispositif de guidage de l'air	Pièce	600.-
Capteur solaire pour tas de 125 m ² de base; toiture d'éternit ondulé; conduits d'air compris	Pièce	14 900.-	Manomètre	Pièce	75.-
Capteur solaire pour tas de 150 m ² de base; toiture d'éternit ondulé; conduits d'air compris	Pièce	17 400.-	Appareil de commande; commande automatique avec commutateur étoile-triangle	Pièce	1 750.-
Pompe à chaleur ou déshumidificateur pour tas de 75 m ² de base; puissance 11 kW	Pièce	34 200.-	Appareil de commande; commande automatique sans commutateur étoile-triangle	Pièce	1 300.-

13. Bibliographie

BAUMGARTNER, J. (1982): L'abc de la ventilation du foin. Rapport FAT no. 216.

BAUMGARTNER, J. (1982): Appareils de commande pour la ventilation du foin. Rapport FAT no. 205.

BAUMGARTNER, J. (1986): Le déchargeur à griffe a-t-il un effet négatif sur la ventilation du foin? Rapport FAT no. 281.

BAUMGARTNER, J. (1988): Utilisation d'une pompe à chaleur pour le séchage du foin et du maïs. Rapport FAT no. 324.

BAUMGARTNER, J. (1989): Déshumidificateurs-pompes à chaleur pour le séchage de foin et de maïs. Rapport FAT no. 370.

BAUMGARTNER, J. (1990): Séchage de maïs au moyen d'une pompe à chaleur air-air. Rapport FAT no. 380.

BAUMGARTNER, J.: Liste de ventilateurs.

FANKHAUSER, J. (1988): Ventilation du foin et lutte contre le bruit. Rapport FAT no. 332.

HILTY, R.; LEIMBACHER, K. (1991): Compilation de frais de construction pour ruraux. Système de prix par modules unitaires FAT.

KELLER, J.; KYBURZ, V. (1988): Bases pour la planification de capteurs d'air pour le séchage du foin. Rapport FAT no. 325.

LAVILLE-STUDER, K. (1990): Les procédés de séchage en grange sont-ils économiques? Rapport FAT no. 384.

NYDEGGER, F. (1987): La construction de capteurs solaires pour la ventilation du foin. Rapport FAT no. 326.

NYDEGGER, F. (1992): Capteurs solaires pour le séchage en grange – planification et réalisation. Rapport FAT no. 407.