

Séchage de l'herbe au moyen d'une pompe à chaleur

Possible pour de petites quantités, mais lié à beaucoup de manutention

Jürg Baumgartner, Station fédérale de recherches en économie et technologie agricole (FAT), 8356 Tänikon

Pour améliorer l'efficacité du séchage en grange, il existe aujourd'hui, outre le système bien connu des poêles à mazout destinés à réchauffer l'air, d'autres systèmes: les capteurs solaires qui ne nécessitent aucun apport supplémentaire d'énergie et les pompes à chaleur. Ils augmentent l'efficacité de l'air de séchage 24 heures sur 24 et par tous

les temps. Une étude a été faite concernant l'efficacité d'une telle installation, les investissements supplémentaires nécessaires et la consommation d'énergie par 100 kg de foin.

Après les tests déjà réalisés par la FAT sur une pompe à chaleur air-air (rapports FAT No 324 et 380) ainsi que sur un déshumidificateur – pompe à

chaleur (rapport FAT No 370), un nouveau système est apparu, permettant la déshumidification et/ou le réchauffement de l'air. La pompe à chaleur «Thermo-dynamic» peut ainsi être utilisée comme déshumidificateur, comme pompe à chaleur air-air ou combiner les deux systèmes (fig. 1). Il doit non seulement être possible de conserver le foin et le regain mais aussi de sécher l'herbe. Parmi tous les systèmes, ce dernier est celui qui a l'efficacité la plus grande dans la plupart des conditions météorologiques. La consommation d'énergie par 100 kg de foin est supérieure à celle d'une pompe à chaleur air-air et inférieure à celle d'un déshumidificateur.

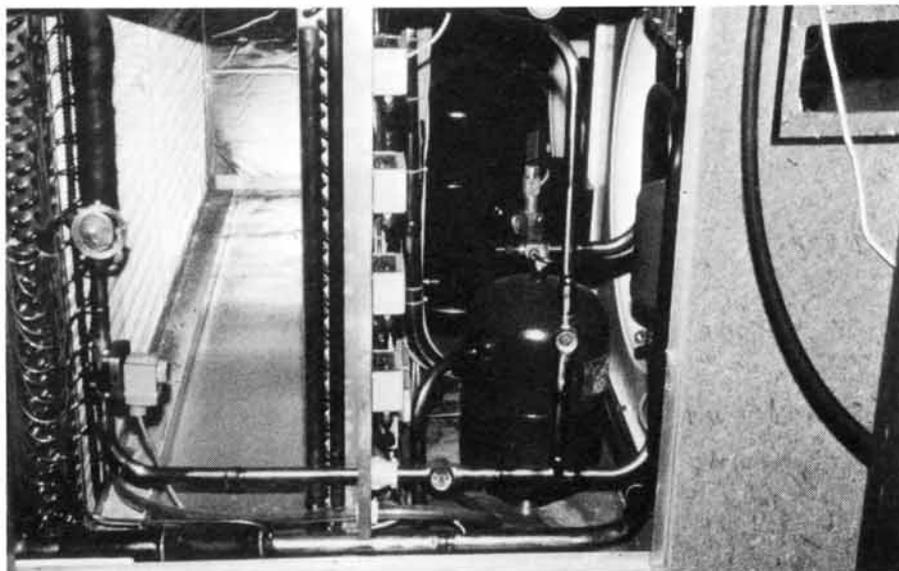


Fig. 1. Vue de l'intérieur de la pompe à chaleur. Les principaux éléments sont, de gauche à droite: l'élément de refroidissement, le radiateur de chauffage et le compresseur avec la cuve sous pression.

Contenu	Page
Problème	2
Mode de fonctionnement	2
Spécifications techniques et prix	3
Dispositif d'essai	3
Résultats	4
Séchage d'herbe	5
Autres résultats	5
Conclusions	5

Problème

La qualité de l'air de séchage (température de l'air et humidité relative) détermine sa capacité à évacuer l'eau du fourrage à sécher. Chacun sait par exemple qu'il est impossible de sécher du foin par temps de pluie en utilisant l'air extérieur normal. Au contraire: dans de telles conditions, le tas de foin se réhumidifierait. Une pompe à chaleur en revanche permet de sécher le foin 24 h sur 24. Cependant, une question se pose: à combien s'élève l'investissement supplémentaire nécessaire et combien d'énergie faut-il pour sécher 100 kg de foin préfané ou même d'herbe?

Mode de fonctionnement de la pompe à chaleur

En principe, la pompe à chaleur air-air et le déshumidificateur fonctionnent chacun avec un élément de réchauffement et un élément de refroidissement, donc avec deux échangeurs thermiques. Ce qui est nouveau sur la pompe à chaleur «Thermo-dynamic», c'est le nombre des échangeurs thermiques. Ce système (fig. 2) possède outre un radiateur (5), deux éléments de refroidissement (3, 4) et deux bobines (2). Le compresseur (1) quant à lui, a deux régimes de fonctionnement ou niveaux de puissance.

Ce système permet d'avoir recours à différents modes d'exploitation. Les interrupteurs à commande manuelle qui se trouvent sur le boîtier électrique (fig. 3) permettent d'enclencher les modes de fonctionnement suivants:

Déshumidificateur

Un courant partiel d'air ambiant traverse l'élément de refroidissement (3 dans fig. 2) du bloc inférieur de la pompe à chaleur WP. L'air est ainsi refroidi et de l'eau est produite par condensation. Dans l'élément de réchauffement sui-

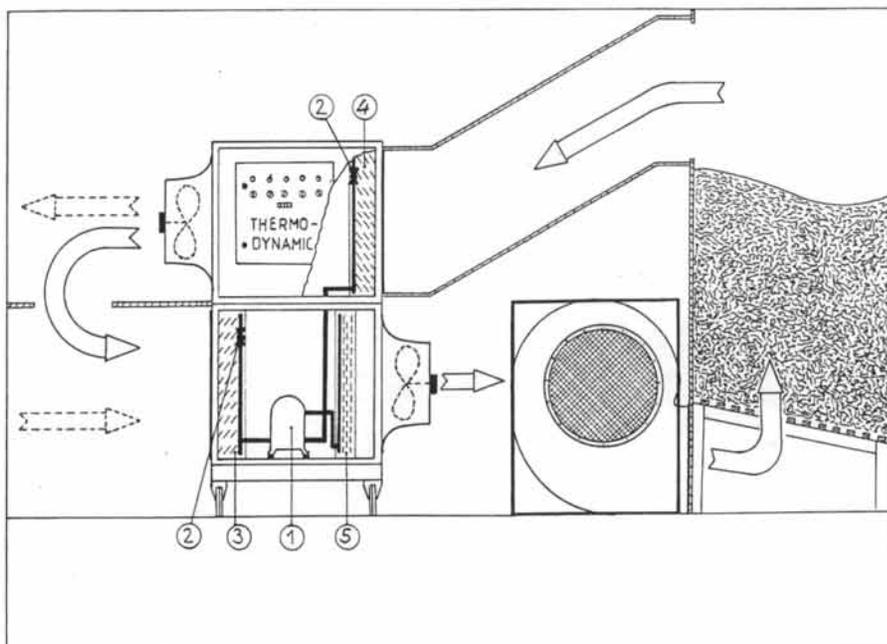


Fig. 2. Schéma de la pompe à chaleur: 1 = compresseur avec cuve sous pression, 2 = bobine, 3 = élément de refroidissement inférieur pour la déshumidification de l'air, 4 = élément de refroidissement supérieur pour la récupération de la chaleur contenue dans l'air qui se dégage du tas, 5 = radiateur de chauffage.

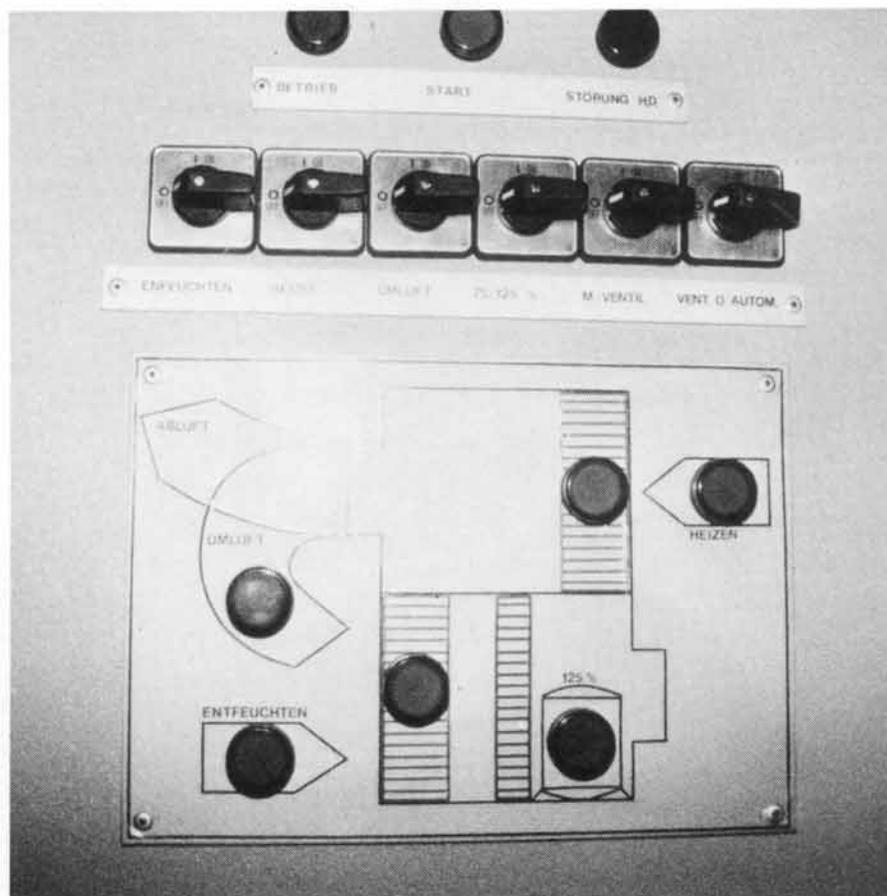


Fig. 3. Il existe différents modes de fonctionnement. Ils sont représentés par des symboles et des ampoules-témoin. Les témoins lumineux de fonctionnement et de dérangement facilitent le travail de l'exploitant.

vant 5, tout l'air aspiré par le ventilateur se réchauffe. Des ventilateurs auxiliaires peuvent être mis en service pour réduire la perte de pression due à l'aspiration à travers deux radiateurs.

Pompe à chaleur air-air

Deux ventilateurs auxiliaires aspirent l'air humide qui se dégage du tas au moyen de deux tuyaux mobiles et le font passer par un élément de refroidissement 4 situé dans le bloc supérieur de la pompe à chaleur. En se refroidissant, l'air produit beaucoup d'eau, et la chaleur qui se dégage par condensation est dirigée par le circuit de la pompe à chaleur vers l'élément de réchauffement 5. Dans cette variante, l'élément de refroidissement inférieur 3 ne fonctionne pas. Deux tuyaux évacuent vers l'extérieur l'air froid et déshumidifié.

Combinaison du déshumidificateur et de la pompe à chaleur air-air

Il est aussi possible de combiner le déshumidificateur avec un réchauffement

supplémentaire au moyen de la pompe à chaleur air-air. Ce mode de fonctionnement utilise soit de l'air frais, soit de l'air ambiant. Cette dernière variante présente des avantages lorsque la température ambiante tourne autour de zéro.

Il existe aussi un système de commande qui permet un fonctionnement automatique sans intervention manuelle. Les variantes décrites ci-dessus sont mises en marche en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant. Il est possible de régler les points de commutation de l'hygrostat.

Spécifications techniques et prix de la pompe à chaleur

Type d'appareil:	EH 204
Dimensions extérieures:	
Largeur:	1060 mm
Hauteur (y compris galets de roulement):	2210 mm
Longueur (y. c. boîtier électrique):	2310 mm

Élément de réchauffement (condenseur) et élément

de refroidissement (évaporateur):

Largeur:	1810 mm
Hauteur:	845 mm
Surface:	1,53 m ²

1 élément de réchauffement avec 3 rangs de tubes
2 éléments de refroidissement avec 4 rangs de tubes

Ventilateurs auxiliaires:

Diamètre:	550 mm
Nombre de pales:	4
Puissance:	770 W

2 ventilateurs pour le déshumidificateur

2 ventilateurs pour la pompe à chaleur

Puissance nominale du compresseur à 2 vitesses: 7,6/14,6 kW

Poids: 747 kg

Prix 1994 avec installation et raccordement du boîtier électrique, mais sans tuyaux à air Fr. 19 950.-

Dispositif d'essai

Le premier essai de séchage du foin a débuté au printemps 1991. Peu après, le système informatique de collecte des données est tombé en panne. C'est pourquoi, pour la pompe à chaleur, il manque le calcul des moyennes de déficits de saturation ainsi que la quantité spécifique d'eau extraite. Le deuxième essai fait sur du foin et le troisième sur du regain, en automne, se sont déroulés sans incident.

Après l'épuisement du tas, les quatrième et cinquième essais ont été effectués en 1992 avec du foin et le sixième avec du regain. Pour les septième et huitième essais, on a utilisé de l'herbe légèrement préfanée.

L'herbe préfanée de chaque autochargeuse fut répartie en parts égales sur deux tas d'essai au moyen d'une griffe à foin. La surface de base de chacun des deux tas était de 50 m². Sur la deuxième installation, des essais ont été réalisés avec un capteur solaire et un accumulateur de chaleur (rapports FAT no 430). Lors de chaque nouvel apport sur le tas de fourrage, le poids du foin préfané et sa teneur en matière sèche (MS %) furent déterminés.

La température, l'humidité, le débit d'air, la pression des tas, etc. furent saisis à intervalles de 10 minutes. A l'aide

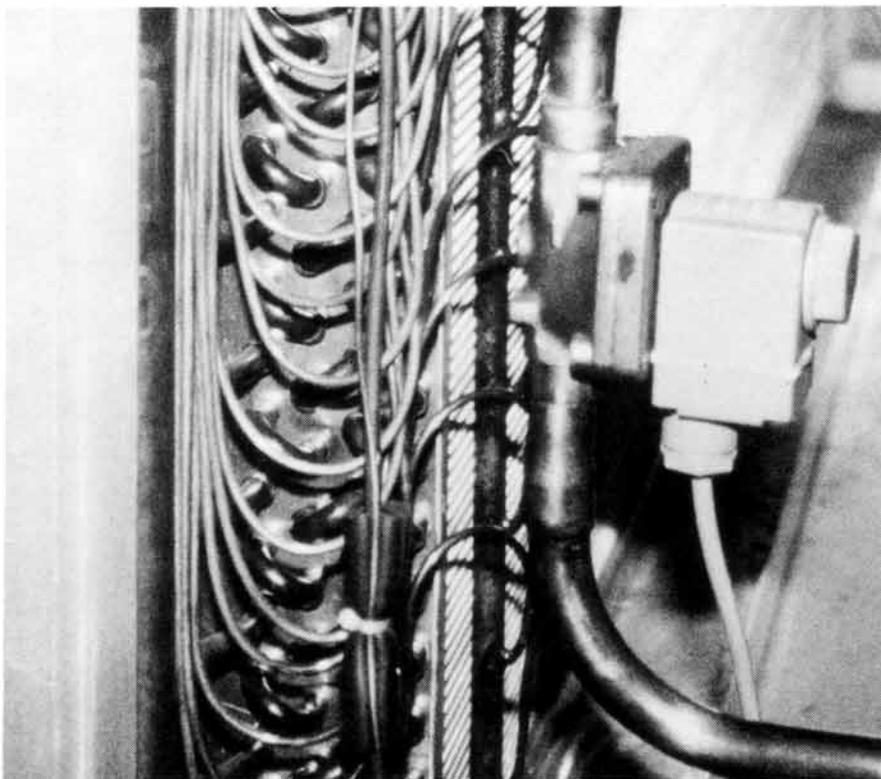


Fig. 4. L'échange de chaleur nécessite une technique coûteuse. L'encrassement des lamelles diminue le transport de chaleur et augmente la résistance que les éléments opposent à la circulation de l'air.

Tableau 1. Résumé des résultats des essais 1991/92
(Valeurs moyennes No 1-6 foin et regain, No 7 et 8 séchage d'herbe)

Essai No.		1* Foin	2 Foin	3 Regain	4 Foin	5 Foin	6 Regain	7 Herbe	8 Herbe
Masse au remplissage	kg	5315	4267	9430	7636	8718	6485	3205	2511
MS au remplissage	%	59,3	61,6	59,0	53,9	59,5	57,7	22,2	24,5
MS après séchage	%	85,2	84,1	88,4	83,6	85,6	86,7	65,3	89,5
Déficit de saturation avant la pompe à chaleur	g/m ³	-	10,1	10,0	9,1	6,2	3,8	6,8	5,1
Déficit de saturation après la pompe à chaleur	g/m ³	-	20,2	26,9	23,7	15,8	17,4	21,2	17,5
Augmentation du déficit de saturation	g/m ³	-	10,1	16,9	14,6	9,6	13,5	14,4	12,4
Augmentation du déficit de saturation	%	-	200	269	260	255	454	314	344
Heures de marche du ventilateur	h	108,3	46,4	62,5	61,9	106,2	54,7	19,3	82,4
Heures de marche de la pompe à chaleur	h	23,2	17,8	47,5	29,4	48,1	40,7	19,3	52,7
Quantité totale d'eau extraite	kg	1615	1317	3435	2621	2859	2226	1324	2345
Quantité horaire d'eau extraite	kg/h	14,9	28,4	55,0	42,3	26,9	40,7	68,6	28,5
Débit d'air du séchage en grange	m ³ /s	5,6	5,2	4,5	5,3	4,8	4,3	4,2	4,1
Quantité spécifique totale d'eau extraite	g/m ³	0,7	1,5	3,4	2,2	1,5	2,6	4,5	1,9
Quantité spécifique d'eau extraite avec pompe à chaleur	g/m ³	-	2,8	4,1	3,7	2,9	3,5	4,5	3,6
Pression du tas	mbar	1,6	2,4	4,6	2,3	3,8	5,9	6,2	6,4
Perte de pression dans l'évaporateur et le condensateur	mbar	1,1	1,0	0,8	1,1	0,9	0,7	0,7	0,7
Hauteur du tas au remplissage	m	0,9	1,6	2,8	1,1	2,8	3,2	3,2	3,5
Hauteur du tas après tassement	m	0,8	1,4	2,3	0,9	2,3	2,7	2,9	2,9
Puissance requise pour le ventilateur principal	kW	4,1	4,6	4,5	4,5	4,8	4,7	4,5	4,7
Puissance requise pour la pompe à chaleur	kW	16,4	20,1	15,4	16,4	20,5	15,5	15,6	16,3
Consommation de courant/kg d'eau	Wh	512	435	293	290	524	399	300	527
Consommation de courant/dt de foin	kWh	22,3	19,4	16,8	15,2	25,6	20,9	21,1	744,5

*Calculs d'après les positions du compteur et la balance, car panne de l'installation de collecte des données

de la température de l'air, de son humidité et de la hauteur barométrique, on a pu calculer le déficit de saturation. Les résultats de six mesures par heure ont donné une valeur moyenne. Pour chacune des huit opérations de séchage, on a calculé des valeurs moyennes sur l'ensemble de l'essai (résultats tableau 1).

Appréciation des résultats

Le déficit de saturation constitue le facteur déterminant de l'extraction d'eau. Ce déficit a été multiplié par 2 à 4,5; il a augmenté en moyenne d'environ 300 % soit triplé. La quantité spécifique d'eau extraite oscille entre 2,8 et 4,5 g/m³ (moyenne = 3,1 g/m³) avec un système de pompe à chaleur et entre 0,7 et 3,4 g/m³ pendant tout le temps de séchage avec et sans pompe à chaleur (moyenne = 1,8 g/m³). Cette valeur

est légèrement supérieure à celles des systèmes testés jusqu'à présent. La consommation de courant par kg d'eau extraite était au minimum de 290 Wh et au maximum de 527 (moyenne = 410 Wh). Pour sécher 100 kg de foin,

il faut compter une consommation moyenne d'électricité de 20 kWh. C'est une valeur qui est située entre la consommation moyenne d'une pompe à chaleur air-air (15 kWh) et un déshumidificateur (27 kWh).

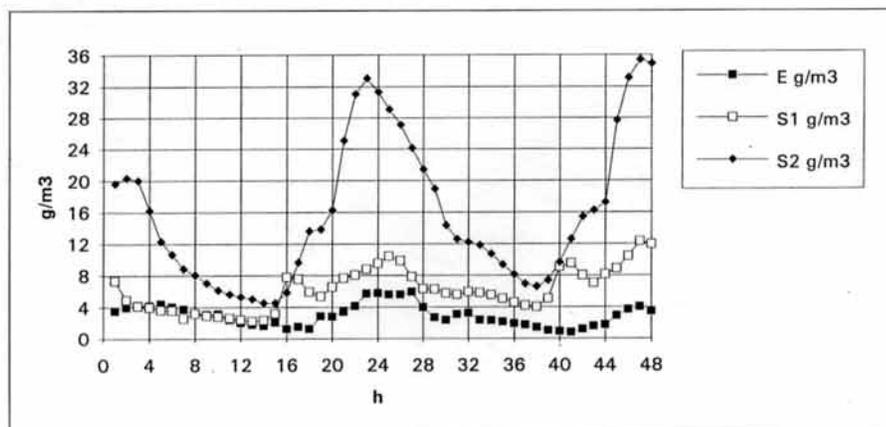


Fig. 5. Déroulement de l'essai No 5. La quantité spécifique d'eau extraite (E) évolue, au cours des 48 heures de la durée de séchage, parallèlement au déficit de saturation (S2) mesuré après la pompe à chaleur. La «capacité de travail» de la pompe à chaleur dépend des conditions météorologiques, c'est-à-dire du déficit de saturation (S1) de l'air ambiant.

Séchage d'herbe

Voici quelles sont les conditions pour sécher de l'herbe avec une pompe à chaleur:

- Pour un tas de 50 m² de surface, ne déposer tout d'abord que 3 à 4 t d'herbe.

- La quantité quotidienne apportée ne doit pas dépasser 2 t d'herbe fraîche

- Le tas doit être mélangé au moins une fois par jour et réparti à nouveau. Il faut compter environ 30 minutes pour effectuer cette opération.

Dans l'essai No 7, le séchage d'herbe légèrement préfanée a nécessité 21,1 kWh/100 kg de matériel sec. En l'espace de 19,3 heures, l'herbe n'a atteint qu'une teneur de 65% MS. Si on avait voulu sécher l'herbe jusqu'au bout dans de telles conditions, il aurait fallu dépenser un minimum de 40 kWh.

L'importante consommation d'énergie de l'essai No 8 comprend le restant d'herbe à sécher de l'essai No 7, le séchage de 2511 kg d'herbe ainsi que le surséchage de l'ensemble du tas de foin.

La pompe à chaleur a fonctionné jusqu'à ce que l'herbe soit séchée à 84% MS. On n'a pu éviter que la teneur en MS de l'ensemble du tas dépasse 88%.

La couche de recondensation qui se forme sur le tas pose un autre problème. L'air humide et chaud qui se dégage du tas laisse échapper de l'eau dans les 5 à 10 derniers cm. Cette zone mouillée doit être recouverte par une couche de paille et séchée une nouvelle fois. S'il reste des poches humides, des fermentations ultérieures sont à craindre.

Autres résultats

Pour que les résultats puissent être comparés avec d'autres appareils, les valeurs horaires sont classées selon le déficit de saturation de l'air ambiant (air aspiré par l'élément de refroidissement) et selon la teneur en MS du foin préfané. Le tableau 2 indique les résultats.

Entre 60 et 80% de MS, secteur particulièrement intéressant pour le sécha-

Tableau 2. Hausse du déficit de saturation de l'air ambiant due à la pompe à chaleur et de la quantité d'eau extraite en g/m³ d'air, en fonction de la teneur en MS du foin préfané

MS in %	Déficit de saturation de l'air ambiant en g/m ³				
	inférieur à 2,5	2,5 à 5	5 à 7,5	7,5 à 10	supérieur à 10
inférieure à 50	-	12,1/3,3	18,2/4,5	-	44,3/6,7
50 - 60	-	13,4/2,5	19,8/5,1	-	(45,1/6,2)
60 - 70	10,3/3,4	10,8/3,0	16,6/4,1	21,3/2,4	35,9/5,2
70 - 80	11,6/2,5	20,6/3,6	13,2/2,2	25,8/4,9	36,9/4,5
supérieure à 80	-	15,3/2,5	21,2/4,1	19,1/2,6	29,6/3,3

Consommation moyenne de courant de la pompe à chaleur: 15,8 kW. Les valeurs entre parenthèses sont des valeurs isolées, qui sont cependant le résultat de six mesures.

ge du foin, on peut s'attendre dans toutes les situations météorologiques, à des quantités d'eau extraite supérieures à celles obtenues avec les pompes à chaleur air-air et les déshumidificateurs. Ce résultat est obtenu grâce à un compresseur environ trois fois plus puissant.

Conclusions

La pompe à chaleur «Thermo-dynamic» a permis de multiplier le déficit de saturation de l'air utilisé pour le séchage en grange par 2 à 4,5. La capacité de séchage a été multipliée par 3,5 par rapport à la ventilation à air froid (moyenne d'eau extraite 1g/m³ d'air en 12 heures), étant donné que la pompe à chaleur peut fonctionner 24 heures sur 24. Avec la pompe à chaleur, on visait un séchage à 82 à 85% MS. Le séchage final se faisait avec ventilation à air froid et un appareil de commande.

Pour une consommation moyenne de courant de 20 kWh par 100 kg de fourrage sec, il faut compter une consommation d'énergie 1,5 fois plus élevée que pour la ventilation à air froid. En revanche, grâce au tarif de nuit, le coût de l'électricité restera sensiblement le même, puisque 40 à 50% des heures de ventilation ont lieu pendant la nuit ou le week-end au tarif réduit. Toutefois, la pompe à chaleur et le ventilateur d'aération ont besoin d'une puissance de raccordement au réseau électrique très élevée, d'au moins 20 kW (pompe à chaleur en moyenne = 15,8 kW, ventilateur = environ 4,5 kW). Un raccordement calculé trop juste ou la facturation des pointes de consom-

mation par la compagnie d'électricité locale peuvent limiter l'utilisation d'une telle installation ou même la rendre impossible.

Le séchage de l'herbe est possible mais nécessite une consommation de courant d'au moins 40 kWh par 100 kg d'herbe séchée. De plus, il faut compter une demi-heure par jour pour remanier le tas, le contrôler soigneusement et enfin y déposer une couche de paille.

Dans la planification du séchage du foin avec pompe à chaleur, il faut aussi inclure la perte de pression supplémentaire de 0,7 à 1,1 mbar. L'investissement nécessaire pour l'acquisition d'une pompe à chaleur destinée à une installation de séchage dont la surface de base est de 50 m² s'élève à Fr. 19 950.-. C'est un investissement élevé qui entraîne des frais fixes annuels de Fr. 2 834.- (amortissement 6,7% = Fr. 1 367.-, intérêt 4,2% = Fr. 838.-, réparations 3% = Fr. 599.-, assurances 0,15% = Fr. 30.-). Pour un prix mixte de Fr. 0.16 kWh (tarif de nuit et tarif de jour), le courant nécessaire pour sécher 100 kg de foin préfané (avec pompe à chaleur et ventilateur d'aération) coûte Fr. 3.20, et Fr. 6.40 pour sécher 100 kg d'herbe.

Une telle installation ne peut s'avérer rentable que pour des exploitations qui sont dans des conditions extrêmement défavorables en matière de séchage et de conditionnement de foin, ou alors s'il s'agit de remplacer une soufflerie à air chaud utilisant un poêle à mazout. Il est impératif d'envisager une utilisation polyvalente avec séchage d'autres produits agricoles, tels que céréales, maïs-grains, maïs-ensilage haché, drêches etc., pour répartir les frais fixes annuels sur plusieurs produits.