

Utilisation d'une pompe à chaleur pour le séchage du foin et du maïs

Jürg Baumgartner

Les opérations de fauche de l'herbe, de fanage et de transport du foin peuvent aujourd'hui être effectuées au moyen de machines puissantes. Cependant, le séchage en grange constitue souvent un goulot d'étranglement dans la chaîne des travaux de conservation des fourrages. Le climat pose des limites très strictes au séchage en grange qui aspire simplement l'air ambiant. Cet état de fait rend en règle générale pratiquement impossible le séchage du fourrage pendant la nuit et par temps pluvieux. Pour améliorer son pouvoir d'absorption de l'eau, l'air de séchage peut être soit réchauffé, soit déshumidifié. La pompe à chaleur Hetroc met à profit le premier de ces deux principes.

séchage en le chauffant. Cet échauffement entraîne une augmentation du pouvoir de rétention d'eau de l'air considéré; en d'autres termes, le déficit de saturation est accru. Le déficit de saturation consiste en la différence qui existe entre la quantité d'eau que contient l'air et le potentiel théorique de rétention de ce dernier, correspondant à une humidité relative de 100%.

Cependant, l'air n'est jamais saturé à 100% dans le courant du processus de séchage. En outre, la libération de l'eau qu'elle contient par la plante est d'autant plus lente que la teneur en matière sèche (MS) du fourrage est élevée.

Cette méthode consistant à chauffer l'air pour accélérer le séchage est connue de longue date. Bon nombre de souffleries

1 Introduction

Pour améliorer le potentiel de travail d'une installation de séchage en grange, on peut réduire l'humidité relative de l'air de

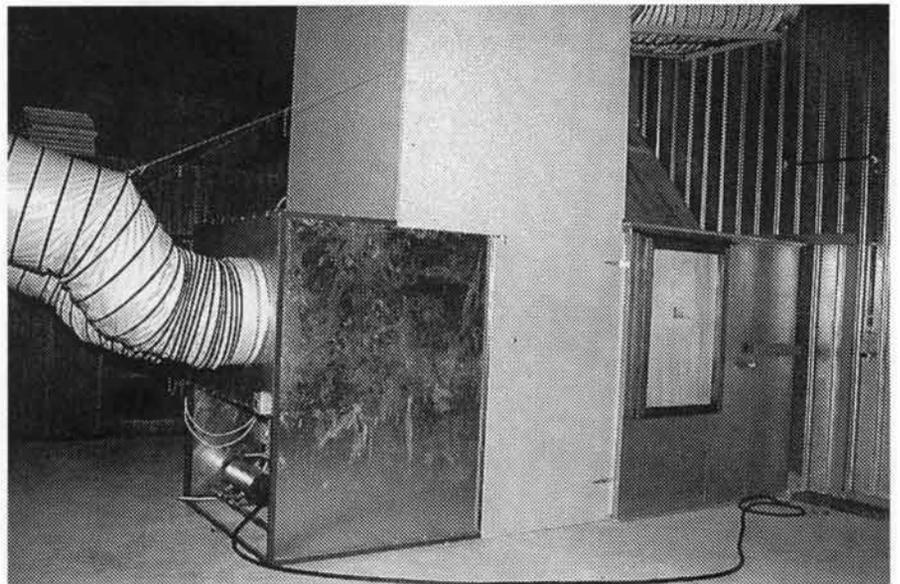


Fig. 1: Vue extérieure de la pompe à chaleur air-air installée dans la halle d'essai de la FAT avec les conduites d'air refoulé et évacué.

à air chaud, équipées d'un brûleur à mazout, furent à nouveau utilisées dans les conditions particulièrement humides du printemps 1987 pour empêcher la formation de tas de mauvais foin et les pertes. Ce système présente toutefois les inconvénients suivants:

- le prix de cette forme d'énergie varie considérablement,
- la consommation d'énergies fossiles est dépassée,
- des souffleries mal entretenues propulsent des gaz dommageables,
- leur installation provisoire accroît le risque d'incendie,
- une installation avec réservoir est nécessaire pour prévenir des souillures de l'eau par des fuites d'hydrocarbures.

Les **capteurs solaires** installés dans la toiture occasionnent également un échauffement de

l'air. Ils permettent, selon les conditions, de multiplier les performances de séchage d'une installation par un facteur pouvant aller jusqu'à deux. Mais ils sont inefficaces tant pendant la nuit que par temps pluvieux.

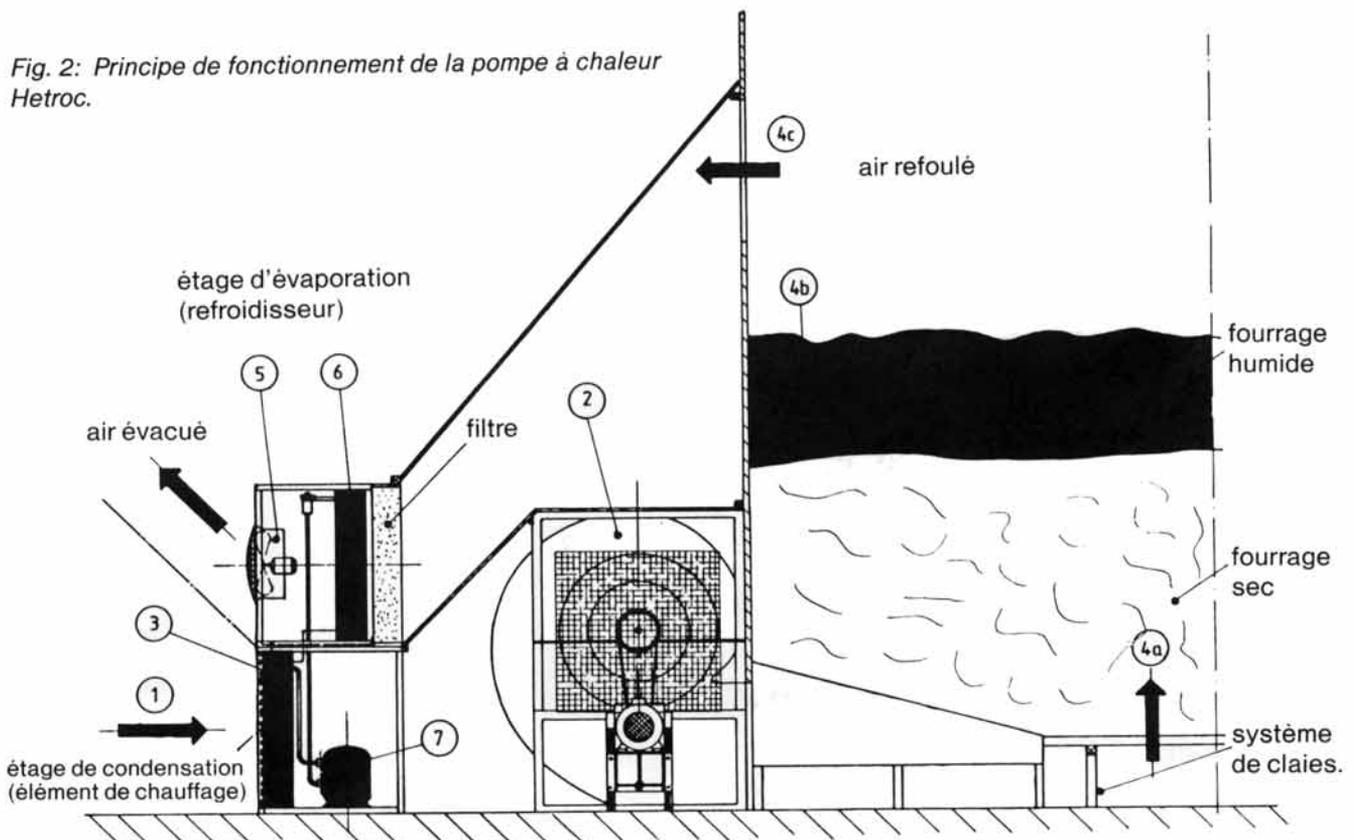
Il existe des appareils, appelés **déshumidificateurs - pompes à chaleur**, qui enlèvent une partie de l'eau contenue dans l'air, tout en réchauffant un peu ce dernier. Un modèle de ce système est actuellement examiné à la FAT.

Les **pompes à chaleur air-air** peuvent être envisagées en tant qu'alternative au chauffage à mazout des souffleries à air chaud. L'appareil de la maison Hetroc a été employé sur l'installation d'essai de la FAT en 1985 pour le séchage de regain, et au printemps 1986 pour la conservation du foin (fig. 1).

2 Fonctionnement de la pompe à chaleur Hetroc

L'illustration 2 montre le mode de fonctionnement de la pompe à chaleur. L'air ambiant (1) est aspiré par le ventilateur (2) de l'installation à travers l'élément de chauffage (3). A cette occasion, le ventilateur (2) doit assumer les pertes de pression inhérentes au passage à travers le registre de chauffage (3). L'air ainsi réchauffé est envoyé, par l'intermédiaire de la gaine de passage de l'air puis de claies, dans le tas de fourrage (4a), pour parvenir finalement dans la masse humide (4b) qui vient d'être disposé en surface. Lors de son passage à travers l'herbe préfanée, l'air de séchage se charge d'humidité. Une partie de l'air expulsé (4c) est dirigé vers l'extérieur au moyen de deux

Fig. 2: Principe de fonctionnement de la pompe à chaleur Hetroc.



ventilateurs auxiliaires (5). A cette occasion, l'air humide traverse un filtre et un registre de refroidissement. Le registre prélève de la chaleur, ce qui occasionne un refroidissement de l'air. La plupart du temps, sa température s'abaisse jusqu'à une valeur inférieure au point de condensation, ce qui permet de capter en outre l'énergie de condensation.

Le fonctionnement est semblable à celui d'une armoire frigorifique. Dans ce dernier cas, l'objectif consiste en un refroidissement du contenu (extraction de la chaleur contenue dans les ali-

ments et le volume intérieur). La chaleur produite par l'énergie ainsi libérée n'est que secondaire. Dans le cas de la pompe à chaleur, par contre, c'est la chaleur ainsi obtenue qui est importante. L'air refroidi et déshumidifié n'a qu'une importance secondaire, aussi est-il chassé vers l'extérieur.

Les performances des pompes à chaleur peuvent être caractérisées par leur rapport de puissance. Cette valeur illustre le rapport existant entre la puissance de chauffage obtenue (différence de température et quantité d'air traversant le re-

gistre de chauffage), et la puissance absorbée par le compresseur (7) et les ventilateurs auxiliaires (5).

3 Caractéristiques techniques et prix de la pompe à chaleur Hetroc

Type de l'appareil examiné HE 100
 Dimensions largeur: 1645 mm
 hauteur: 2300 mm
 longueur: 900 mm
 Poids (sans conduites à air) 496 kg
 Puissance nominale du compresseur + ventilateurs auxiliaires 6 kW
 Prix 1987
 (sans conduites à air) Fr. 16850.-

Tableau 1: Résumé des résultats des essais 1985/86 (valeurs moyennes)

Essai No		1	2a	2	3	4a	4b	5
Poids au remplissage	kg	8272	5433	5433	7200	13669	13669	4847
MS au remplissage	%	58,6	66,4	65,8	74,1	45,6	45,6	61,8
MS après séchage	%	88,0	86,3	88,0	88,0	87,1	88,0	87,5
Air à l'entrée de l'élément de chauffage:								
température	°C	20,4	22,0	22,5	16,8	15,0	13,2	15,4
humidité relative	%	71,2	73,4	76,0	80,0	77,2	79,4	84,1
déficit de saturation (100%)	g/m ³	6,4	6,0	5,9	4,0	3,7	3,1	2,9
Air à l'entrée du ventilateur:								
température	°C	27,3	29,5	29,5	24,2	21,5	18,4	20,5
humidité relative	%	47,1	46,9	49,9	50,9	52,2	58,8	60,7
déficit de saturation	g/m ³	16,3	17,4	16,8	13,0	11,1	8,7	8,1
Augmentation du déficit de saturation:								
valeur absolue	g/m ³	9,9	11,4	10,9	9,0	7,4	5,6	5,2
valeur relative	%	255	290	285	325	300	381	379
Temps de fonctionnement du ventilateur	h	72,5	22,3	28,1	26,6	188,0	209,4	57,2
Quantité totale d'eau extraite	kg	2764	922 ¹⁾	1144 ¹⁾	533 ¹⁾	6384	6454	1204 ¹⁾
Quantité horaire d'eau extraite	kg/h	38,1	41,3	40,7	20,0	34,0	30,8	21,0
Débit du ventilateur	m ³ /s	5,1	4,8	4,8	4,4	5,0	5,1	5,7
Quantité spécifique d'eau extraite	g/m ³	2,1	2,4	2,4	1,3	1,9	1,7	1,0
Pression du tas	mbar	2,2	2,9	2,9	4,0	3,9	4,0	4,9
Hauteur du tas au remplissage	m	1,1	2,4	2,4	3,8	1,7	1,7	2,5
Hauteur du tas après séchage	m	0,9	2,0	2,0	3,4	1,4	1,4	2,0
Perte de pression de l'air dans le registre	mbar	1,5	1,4	1,4	1,2	1,2	1,3	1,6
Puissance requise par le ventilateur	kW	3,5	3,6	3,6	3,7	4,6	4,7	6,5
Puissance requise par l'appareil Hetroc	kW	7,0	6,3	6,3	6,4	5,7	5,7	6,0
Consommation spécifique								
de courant	Wh/kg H ₂ O	276	239	245	503	304	336	590
Consommation de courant	kWh/dt foin	13,8	-	6,9	4,4	-	30,7	20,9
Rapport de puissance de l'appareil Hetroc		5,8	6,4	6,3	5,9	6,5	5,3	5,6

¹⁾ L'écoulement de l'air à travers le fourrage peut entraîner un «surséchage», c'est-à-dire une augmentation de la teneur en MS au-delà de la valeur optimale de 88%. Lors du séchage de la couche suivante de fourrage, une portion de volume d'eau est simplement déplacée. L'air humidifie alors les couches inférieures précédemment «surséchées». Le déficit de saturation de l'air en question est cependant encore suffisant pour permettre le séchage de la couche supérieure (matériau humide).

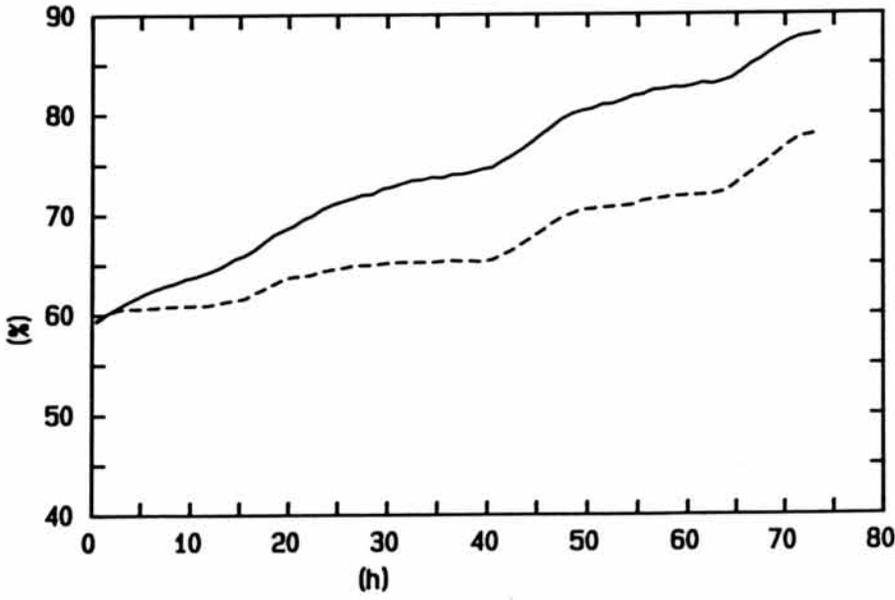


Fig. 3: Essai No 1; évolution des teneurs en MS après remplissage.

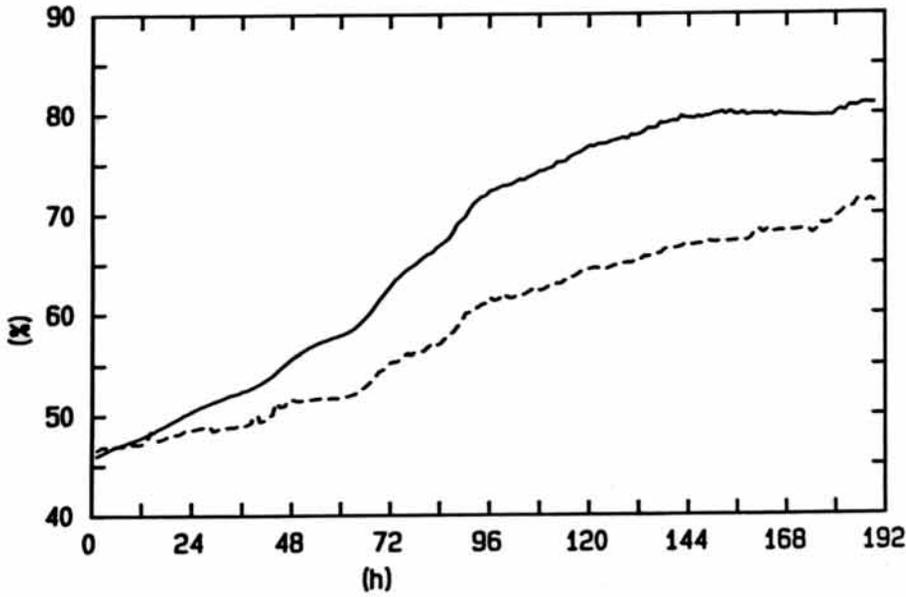


Fig. 4: Essai No 4; évolution des teneurs en MS après remplissage.

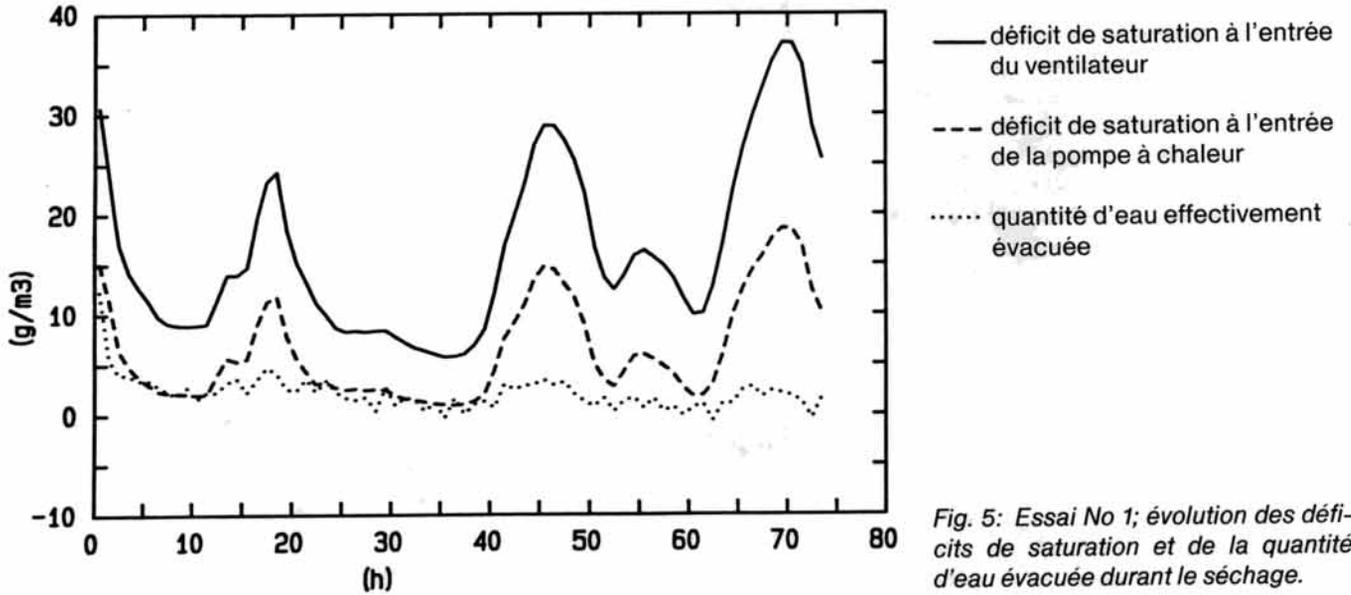


Fig. 5: Essai No 1; évolution des déficits de saturation et de la quantité d'eau évacuée durant le séchage.

4 Déroulement et résultats de l'essai

Les essais No 1, 2 et 3 se rapportent au séchage de regain dans le courant de l'été 1985, tandis que les essais No 4 et 5 concernent le séchage de foin au printemps 1986. Chaque autochargeuse d'herbe préfanée fut répartie en parts égales sur les deux tas de fourrage de l'essai, au moyen d'une griffe à foin. Dans l'installation 1, l'air de séchage était réchauffé par l'intermédiaire de capteurs solaires, tandis que la pompe à chaleur air-air assumait cette fonction de chauffage dans la seconde installation.

Lors de chaque apport sur le tas de fourrage, l'herbe préfanée fut pesée, et sa teneur en matière sèche déterminée. A intervalles de dix minutes, nous procédâmes à la mesure, en différents points, de la température, de l'humidité et du débit de l'air, de la pression du tas, etc. La connaissance de la température et de l'humidité de l'air, ainsi que de la pression barométrique, permet le calcul du déficit de saturation. Les résultats des six mesures effectuées chaque heure furent regroupés en une valeur moyenne.

La valeur moyenne obtenue pour chaque essai fut calculée. Le tableau 1 recense tous les principaux résultats des essais entrepris en 1985/86.

5 Commentaires

L'essai No 1 s'est déroulé pendant une période de beau temps, à l'opposé de l'essai No 4, lequel connut, à partir du qua-

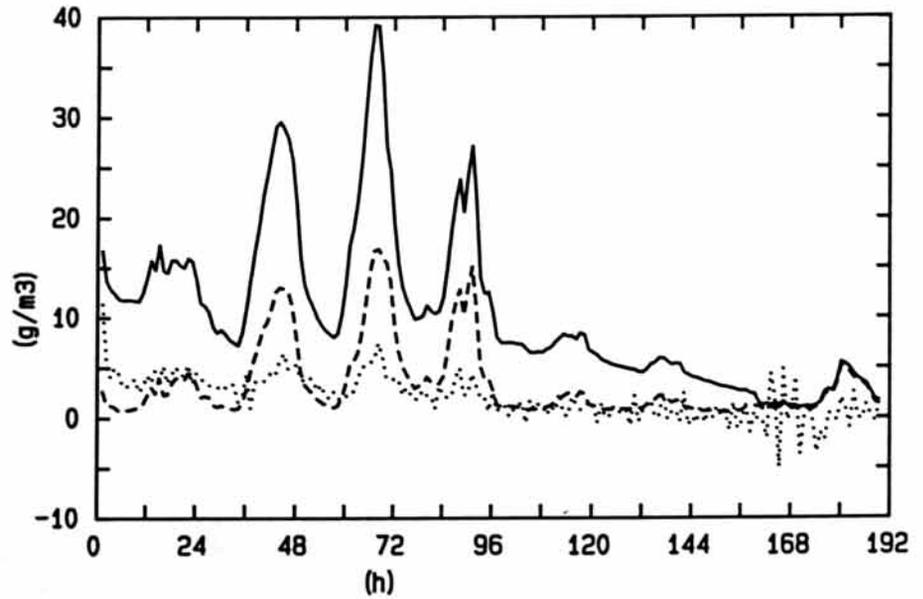


Fig. 6: Essai No 4; évolution des déficits de saturation et de la quantité d'eau évacuée durant le séchage.

- déficit de saturation à l'entrée du ventilateur
- déficit de saturation à l'entrée de la pompe à chaleur
- - - quantité d'eau effectivement évacuée

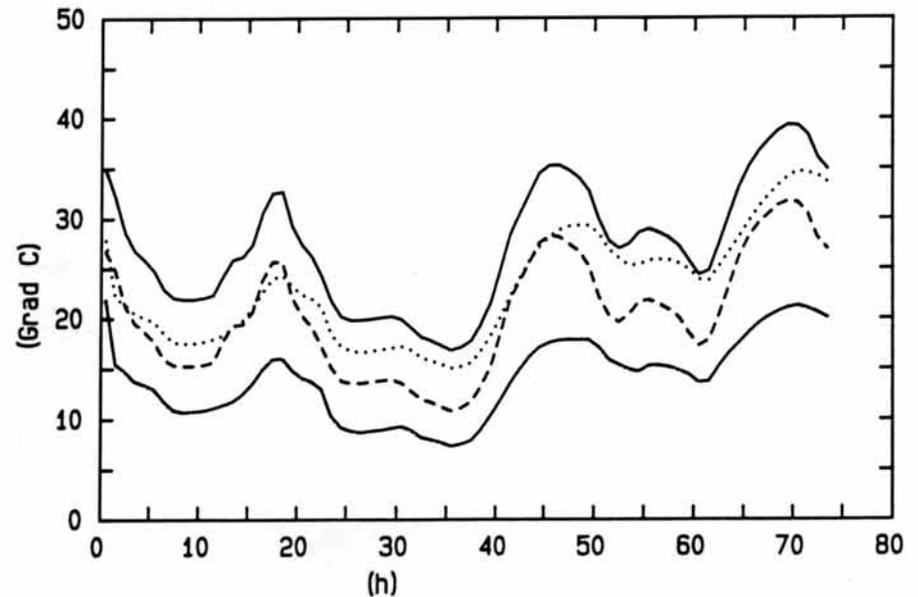


Fig. 7: Essai No 1; évolution des températures de l'air pendant la durée de l'essai.

- air à l'entrée du ventilateur
- - - air à l'entrée du registre de chauffage (air ambiant)
- air à l'entrée du registre de refroidissement
- air à la sortie du registre de refroidissement

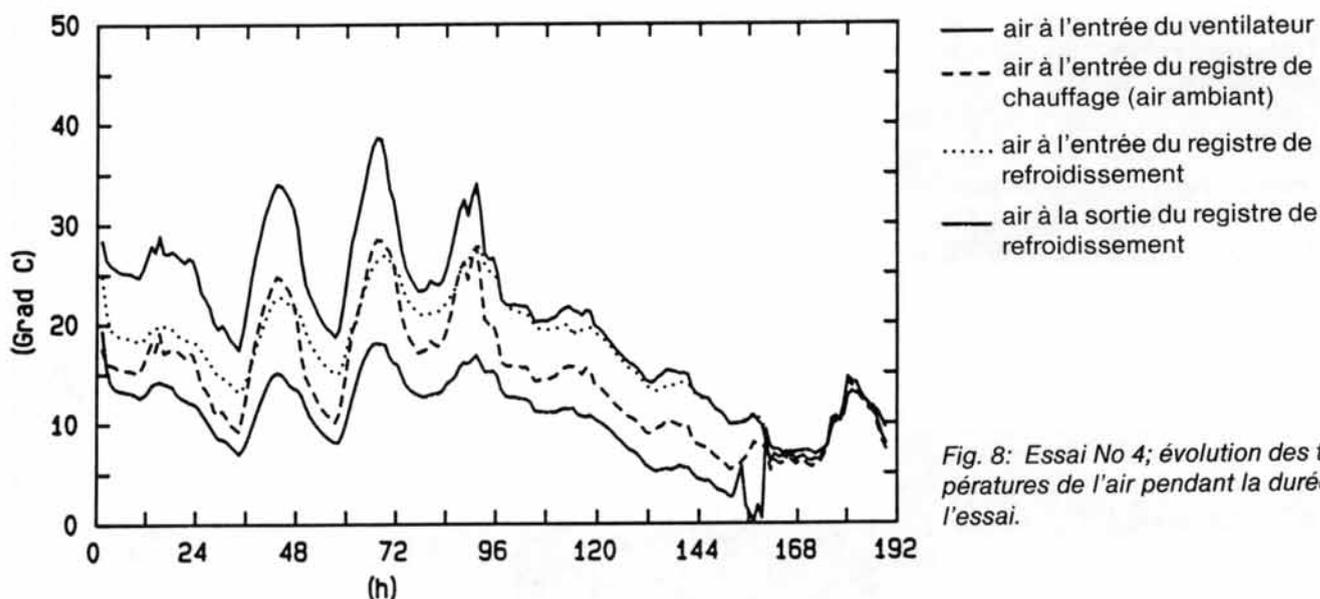


Fig. 8: Essai No 4; évolution des températures de l'air pendant la durée de l'essai.

trième jour de son déroulement des conditions météorologiques extrêmement défavorables. Les illustrations 3 et 4 montrent l'accroissement de la teneur en MS dans les essais 1 et 4. Les performances de séchage de l'installation pourvue de la pompe à chaleur sont nettement supérieures à celles de son homologue équipée de capteurs solaires, puisque la première peut fonctionner 24 heures sur 24 jusqu'à l'obtention d'une teneur en matière sèche de 88%. Les deux installations de séchage furent équipées d'un interrupteur automatique pour fonctionnement discontinu. L'essai No 4 a montré que, faute d'un tel interrupteur, une réhumidification du foin est possible dans des conditions météorologiques froides et humides.

Les illustrations 5 et 6 présentent l'évolution du déficit de saturation de l'air à son entrée dans le registre de chauffage et dans le ventilateur, ainsi que la quantité correspondante d'eau extraite. Elles montrent que de brèves pointes du déficit de saturation n'entraînent pas une augmentation notable de la quantité d'eau extraite. Une réhumidification du tas est inévi-

table si les mauvaises conditions météorologiques se prolongent, et pour autant que l'on empêche tout échauffement spontané du tas.

Les illustrations 7 et 8 présentent l'évolution des températures à l'entrée et à la sortie du registre de chauffage, resp. de refroidissement. La figure 8 montre que, dans des conditions météorologiques défavorables, la température de l'air à la sortie du registre de refroidissement peut baisser jusqu'au point de congélation. Selon les indications du fournisseur, la puissance du registre de refroidissement sera accrue à l'avenir, et un dispositif de réglage sera incorporé. Ces mesures devraient permettre d'éviter toute formation de glace.

Les essais 2 et 4 ont été mis en valeur de deux façons: les No 2a et 4a ne comprennent que la période de fonctionnement ininterrompu, tandis que les périodes intermédiaires sont aussi comprises sous chiffres 2 et 4. Les différences constatées en matière de quantités d'eau extraite et de consommation de courant atteignent jusqu'à 10%. L'évacuation d'eau est notablement moins bonne lorsque le

débit du ventilateur est trop élevé (essai No 5). La pression dans le tas augmente, tout comme la puissance de ventilation et la consommation de courant. Dans les conditions de la pratique, ce cas se produirait si un appareil de puissance insuffisante était monté sur une installation de séchage en grange, que ce soit pour des raisons de prix d'achat, ou parce que ce sont les conditions de raccordement au réseau électrique qui constituent le facteur limitant.

6 Autres résultats

Pour permettre la comparaison avec les résultats obtenus par d'autres appareils, les moyennes horaires ont été répertoriées en fonction du déficit de saturation de l'air ambiant (air aspiré dans le registre de chauffage), et selon la teneur en MS du fourrage. Cette présentation des résultats est produite au tableau 2.

Tableau 2: Augmentation du déficit de saturation de l'air ambiant occasionnée par la pompe à chaleur et quantité d'eau évacuée, en fonction de la teneur en MS du fourrage

	Déficit de saturation de l'air ambiant en g/m ³				
	Plus petit que 2,5	2,5-5	5-7,5	7,5-10	Plus grand que 10
% MS					
< 50	12,9/4,0	15,9/5,2	-	-	-
50-60	9,1/2,8	13,9/3,6	18,8/3,3	23,5/4,5	29,3/5,3
60-70	9,1/2,3	11,6/2,5	14,7/3,1	19,3/3,2	26,6/4,5
70-80	6,3/0,8	10,8/1,9	16,3/2,1	18,4/2,8	26,3/3,3
> 80	5,7/0,7	8,8/1,0	13,5/1,4	18,9/2,8	29,4/2,8
Consommation moyenne de la pompe à chaleur: 6,1 kW					

7 Séchage du maïs

Aucun des deux essais de séchage de maïs plante entière haché que nous avons entrepris n'a apporté des résultats satisfaisants.

Le prototype que nous avons employé pour ce séchage (installation de séchage équipée d'un brasseur) ne verra pas son développement poursuivi à l'avenir. Il n'y a par conséquent aucune raison de procéder à la publication des résultats de ces essais.

Un nouveau type d'installation de séchage sera employé en automne 1987 pour traiter du maïs. Le problème réside dans le séchage homogène de toute la masse de produit humide si les strates du matériau en question ne sont pas brassées plusieurs fois par jour.

8 Conclusions

La pompe à chaleur air-air Hetroc s'avéra capable de multiplier par 2,5 à 2,8 le déficit de

saturation de l'air destiné au séchage en grange d'un tas de foin. L'augmentation de température de l'air oscilla entre 5,1 et 7,5° C, selon la température de l'air ambiant et les conditions météorologiques.

Le fait que la pompe à chaleur permette de faire fonctionner l'installation de séchage en grange 24 heures sur 24 conduit à multiplier au minimum par deux la capacité de séchage, en comparaison des performances d'un séchage fonctionnant à l'air froid (élimination d'eau moyenne de 1 g/m³). L'emploi d'un interrupteur automatique est indiqué, car sans lui, dans de mauvaises conditions météorologiques (p.ex. 10° C et 90% d'humidité relative de l'air), un tas de foin presque sec se verrait réhumidifié.

Lors de la planification d'une installation de séchage en grange équipée d'une pompe à chaleur, il faut compter avec une perte de pression comprise entre 1,2 et 1,6 mbar. Cette perte occasionnée par les éléments du registre de chauffage dépend, outre du débit de l'air aspiré, de l'état d'encrassement du registre.

La consommation d'électricité, qui peut aller de 4,4 à 30,7 kWh par dt de foin, tout comme la consommation spécifique par

kg d'eau extraite, comprise entre 239 et 590 Wh, sont du même ordre que dans le cas d'une ventilation à air froid. Par contre, la possibilité de profiter du tarif de nuit permet d'abaisser les coûts de cette consommation de courant, puisque 40 à 50% du temps de fonctionnement se déroulent pendant les périodes de tarif réduit que constituent les nuits et les week-end. D'un autre côté, la pompe à chaleur rend nécessaire une capacité supplémentaire relativement importante d'alimentation en courant électrique par le raccordement au réseau (3,5 kW pour le ventilateur + 6 kW pour la pompe à chaleur). Le dimensionnement trop «juste» du raccordement électrique, ou la prise en compte par les SI locaux des pointes de consommation peuvent limiter considérablement, voire même rendre impossible l'exploitation d'une pompe à chaleur. Dans ces cas, le fabricant a l'intention de proposer d'autres types d'entraînement.

Les rapports de puissance de la pompe à chaleur Hetroc, compris entre 5,3 et 6,5, sont supérieurs à la moyenne des résultats obtenus par des appareils semblables.

L'investissement que requiert une pompe à chaleur pour une installation de cet ordre de grandeur est relativement important: Fr. 16850.-, ce qui représente des frais fixes d'un montant annuel de Fr. 2260.- (6,7% d'amortissement = Fr. 1125.-, 3,6% d'intérêts = Fr. 605.-, 3% de frais de réparations = Fr. 505.-, et 0,15% d'assurance = Fr. 25.-). Les frais d'utilisation, en moyenne sur cet essai, se montent, pour une consommation de 15,3 kWh à Fr. -15, à Fr. 2.30 par dt. En partant de l'hypothèse que la pompe à chaleur qui a fait l'objet de notre

essai est à même de sécher, par saison, deux tas de 250 m³ environ (soit 20 à 25 UGB), le frais fixes par dt de foin se montent à Fr. 4.50, à ajouter aux Fr. 5.10 que coûte le séchage en grange, ce qui représente un montant total de Fr. 9.60 par dt.

La rentabilisation d'une telle installation n'est donc envisageable que dans des exploitations qui ne disposent que de conditions de séchage extrêmement défavorables et à la ri-

gueur pour remplacer une installation de réchauffement de l'air fonctionnant au moyen d'une soufflerie et d'un brûleur à mazout, en corrélation avec une amélioration de la qualité du fourrage de base et de la production laitière à partir du fourrage de base qui lui est liée; cette rentabilisation pourrait être envisageable dans le cadre d'un emploi plus diversifié de l'installation (séchage de céréales et de maïs).