Rapports FAT

Publié par la Station fédérale de recherches d'économie d'entreprise et de génie rural (FAT) CH-8356 Tänikon TG Tél. 052 - 62 31 31

Avril 1990 380

# Séchage de maïs au moyen d'une pompe à chaleur air-air

Jürg Baumgartner

**Les agriculteurs de la zone d'interdiction d'ensilage faisant sécher le maïs haché (maïs d'ensilage) par une entreprise agricole de déshydratation payaient, en 1988, un prix moyen de Fr. 20.20 les 100 kg. Le séchage sur la ferme même, soit au moyen d'une pompe à chaleur air-air, soit par un déshumidificateur (voir Rapport FAT 370) ou une soufflerie à air chaud (equipée, par exemple, d'un brûleur à mazout), s'offre comme autre solution.**

**La combinaison d'une pompe à chaleur air-air et d'un séchoir discontinu permettait de sécher une tonne de matière humide par jour. Lors du séchage de cossettes de betteraves pressées, la performance diminuait d'environ la moitié alors que la consommation de courant électrique montait jusqu'au delà du triple.**

Après avoir utilisé une pompe à chaleur air-air pour le séchage de foin et de regain (voir Rapport FAT 324), nous avons muni cette installation d'un appareil spécial et essayé de sécher du maïs haché (maïs d'ensilage). Or, la couche supérieure risque de se mettre à coller dans un séchoir discontinu (fig. 1) à moins d'être brassée une à deux fois par jour pendant le processus de séchage. L'appareil spécial mis à notre disposition et destiné au brassage mécanique de la couche en question ne travaillait pas de manière satisfaisante. Nous nous sommes donc servis, l'année suivante, d'un séchoir à tambour (fig. 2). Malgré sa bonne performance de séchage, nous avons également dû l'abandonner. Cela du fait qu'une quantité trop importante de matière fine, humide aussi bien que sèche, passait par le dernier filtre et sortait du séchoir. Les différents fragments de la plante de maïs se frottaient les uns aux autres, ce qui occasionnait un effet de broyage et, par conséquent, beaucoup de poussière qui se déposait partout. Dans le courant de la saison suivante, nous nous sommes décidés malgré tout pour la combinaison de la pompe à chaleur air-air et d'un séchoir discontinu.

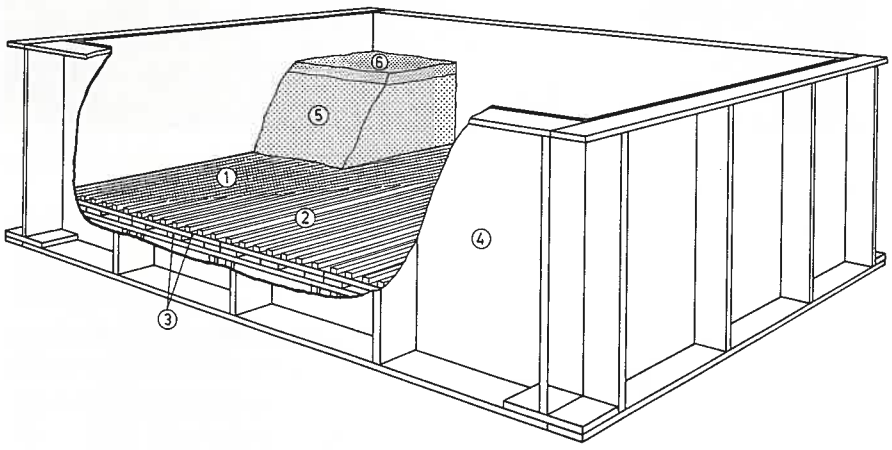


*Fig. 1: Séchoir discontinu pour maïs haché (maïs d'ensilage): 24 m² de surface de base et 2 m de haut*
*1 = grillage ou tôle perforée*
*2 = caillebotis ou grilles de ventilation du foin*
*3 = support*
*4 = cloison*
*5 = maïs haché*
*6 = zone humide*

## 1. Spécifications techniques et prix de l'installation

Pour le séchage de maïs, la surface de base du séchoir discontinu doit avoir, selon les indications du fournisseur, environ la moitié de la surface de base du tas de foin.
Le séchoir discontinu a été intégré à l'installation de ventilation existante qui avait 50 $m^2$ de surface de base. La nouvelle installation se composait de 24 $m^2$ de caillebotis, de 24 $m^2$ de tôle perforée, de deux cloisons ainsi que d'une gaine d'amenée d'air. Le séchoir discontinu représentait un investissement d'environ Fr. 5000.– dont Fr. 1700.– étaient des frais de main-d'œuvre.

La pompe à chaleur air-air était un modèle modifié:

| | |
|---|---|
| Type d'appareil: | Hetroc HE 100 |
| Dimensions extérieures: | |
| largeur: | 1800 mm |
| hauteur: | |
| 2 x 1130 mm | 2260 mm |
| longueur: | 900 mm |
| Registre de chauffage et registre de refroidissement: | |
| largeur: | 1500 mm |
| hauteur: | 1060 mm |
| surface: | 1,59 $m^2$ |
| registre de chauffage: | |
| 3 rangs de tubes | |
| registre de refroidissement: | |
| 6 rangs de tubes | |
| 2 ventilateurs auxiliaires | |
| Puissance nominale (ventilateurs auxiliaires compris): 7 kW | |
| Prix 1989: | |
| pompe à chaleur: | Fr. 17'350.– |
| clapet de réglage du débit d'air: | Fr. 1970.– |
| manomètre de contrôle: | Fr. 96.– |

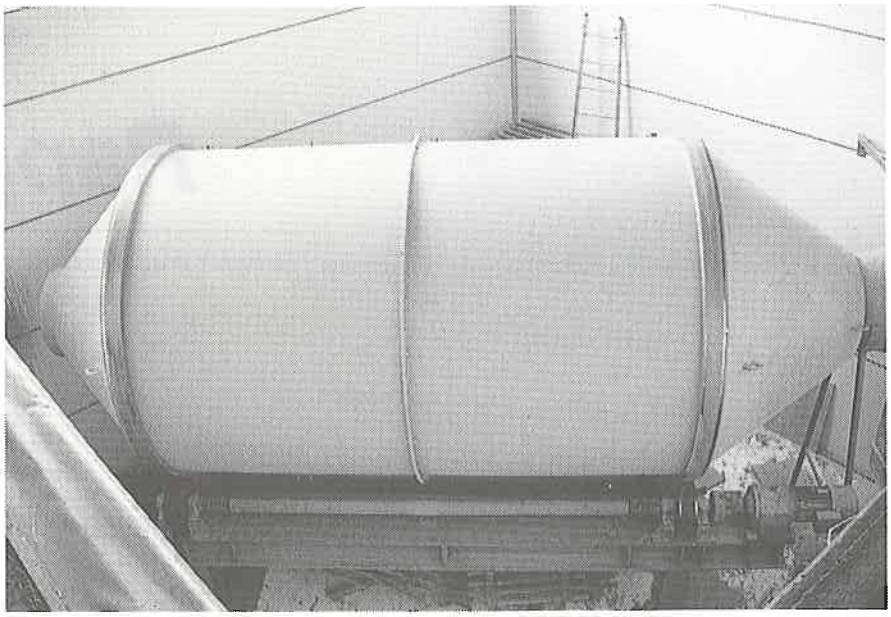

*Fig. 2: Le séchoir à tambour ne travaillait pas de manière satisfaisante: une grande quantité de matière fine a été soufflée à travers le filtre, vers le cloison, et se mettait à fermenter en dehors du tambour.*

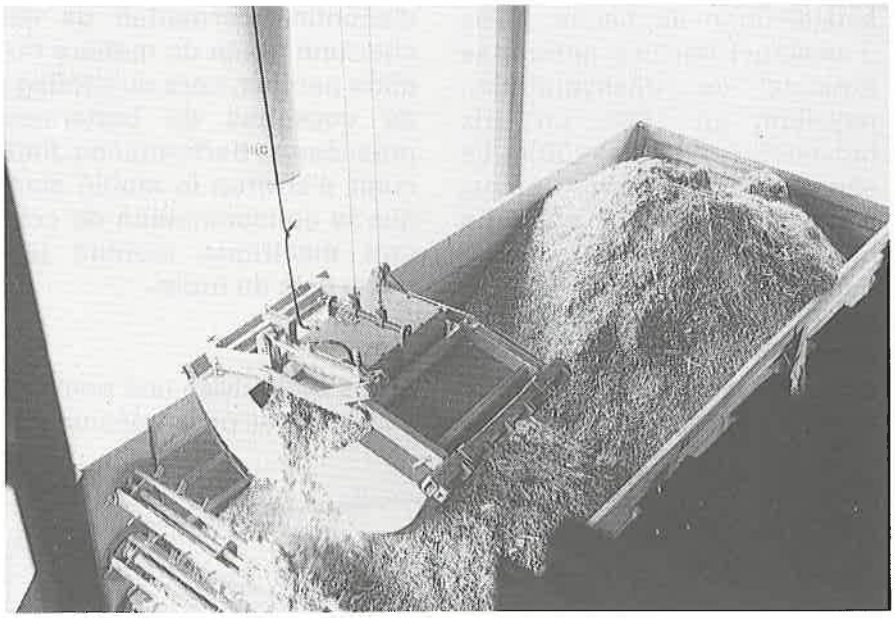

*Fig. 3: Le vidage du séchoir discontinu et le remplissage de la remorque déchargeuse ne posaient aucun problème.*

## 2. Séchage de maïs haché

Les essais, effectués en automne 1988, se déroulaient de la façon suivante (voir tableau 1):
- essais nos. 1 à 3: séchage de maïs haché et relativement sec (32 à 40% de matière sèche [MS]), quantités de 2,9 à 3,5 t;
- vidage du séchoir;
- essais nos. 4 et 5: séchage de deux portions (à 3,2 t) de maïs très humide (teneur en MS: 26 – 27%);
- vidage du séchoir;

**Tableau 1: Séchage de plantes de maïs hachées et de cossettes de betteraves sucrières (BS): résumé des résultats des essais 1988** (valeurs moyennes)

| Essai no. | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | BS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Poids au remplissage | kg | 3538 | 2887 | 2920 | 3206 | 3240 | 2052 |
| MS au remplissage | % | 32,4 | 39,6 | 40,7 | 25,9 | 26,8 | 19,0 |
| MS après séchage | % | 93,2 | 84,6 | 88,1 | 40,4 | 89,6 | 84,4 |
| Air à l'entrée de la pompe à chaleur: | | | | | | | |
| température | °C | 14,3 | 14,4 | 10,9 | 4,4 | 5,2 | 5,2 |
| humidité relative | % | 83,1 | 84,4 | 84,3 | 71,4 | 79,5 | 83,0 |
| déficience de saturation (100%) | g/m³ | 2,5 | 2,2 | 1,7 | 2,0 | 1,5 | 1,3 |
| Air à l'entrée du ventilateur: | | | | | | | |
| température | °C | 24,1 | 25,1 | 22,7 | 12,7 | 15,8 | 15,4 |
| humidité relative | % | 45,2 | 43,4 | 40,0 | 41,2 | 40,2 | 42,4 |
| déficience de saturation | g/m³ | 13,2 | 14,1 | 12,9 | 7,1 | 9,1 | 8,0 |
| Augmentation de la déficience de saturation: | | | | | | | |
| valeur absolue | g/m³ | 10,7 | 11,9 | 11,2 | 5,1 | 7,6 | 6,7 |
| valeur relative | % | 528 | 641 | 759 | 355 | 607 | 615 |
| Heures de marche du ventilateur | h | 67,8 | 37,7 | 56,1 | 48,4 | 150,1 | 96,1 |
| Heures de marche de la pompe à chaleur | h | 67,5 | 37,7 | 56,1 | 48,4 | 140,0 | 96,1 |
| Quantité totale d'eau absorbée | kg | 2308 | 1405 | 1571 | 1146 | 3396 | 1590 |
| Quantité horaire d'eau absorbée | kg/h | 34,0 | 37,3 | 28,0 | 23,6 | 22,6 | 16,5 |
| Débit d'air du ventilateur | m/³s | 3,0 | 2,7 | 2,3 | 2,5 | 2,0 | 2,1 |
| Quantité spécifique d'eau absorbée | g/m³ | 3,2 | 3,8 | 3,3 | 2,7 | 3,1 | 2,2 |
| Pression en dessous du fourrage et de la tôle perf. | mbar | 2,5 | 3,0 | 3,3 | 1,4 | 1,9 | 0,2 |
| Hauteur du tas au remplissage | m | 0,56 | 0,95 | 1,21 | 0.38 | 0,75 | 0,14 |
| Perte de pression au registre de chauffage et par réduction du débit d'air | mbar | 1,2 | 1,0 | 0,9 | 1,5 | 2,3 | 3,7 |
| Puissance absorbée du ventilateur | kW | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 1,7 | 1,9 | 1,9 |
| Puissance absorbée de la pompe à chaleur | kW | 7,0 | 7,2 | 7,3 | 6,4 | 7,6 | 7,6 |
| Consommation spécifique de courant | Wh/kg $H_2O$ | 261 | 244 | 331 | 343 | 393 | 572 |
| Consommation de courant | kWh/dt de fourr. sec | 49,1 | 25,4 | 38,5 | 19,1* | 137,9** | 197,0 |

* seulement séché à 40% de MS
** y compris séchage final de l'essai no. 4

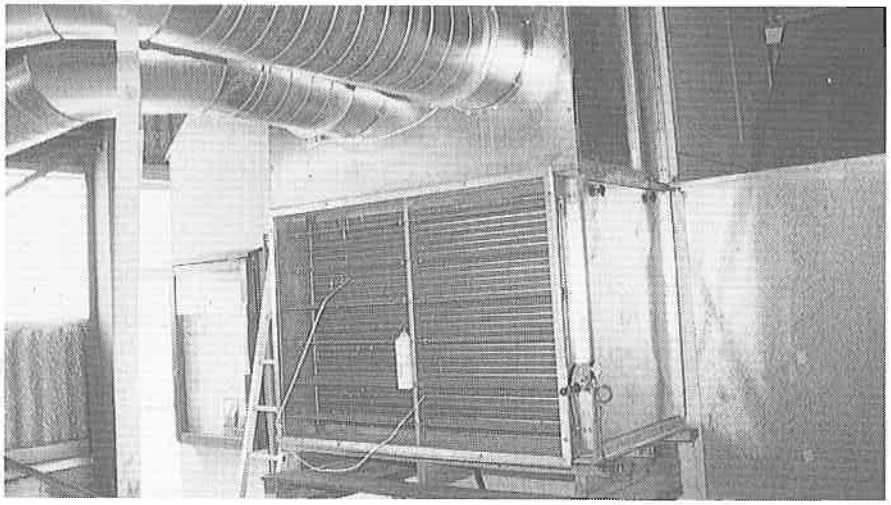

*Fig. 4: La quantité d'air aspiré et entrant dans le registre de chauffage de la pompe à chaleur a été réduite au moyen d'un clapet de réglage. Une réduction supplémentaire du débit d'air a été obtenue par un variateur réglant le régime du moteur du ventilateur.*

- séchage de 2,1 t de cossettes de betteraves sucrières.

Le séchoir discontinu a été rempli et vidé au moyen d'une griffe munie d'une pelle à maïs (voir fig. 3). Le fourrage a été égalisé et brassé quotidiennement pendant 20 à 30 min au moyen d'une fourche. Le tableau 1 montre les résultats de ces essais.

Contrairement au déshumidificateur, la pompe à chaleur air-air travaillait avec un débit d'air réduit. Cela exigeait que le régime du moteur du ventilateur existant (servant normalement au séchage de foin) fût réglable; autrement il y aurait fallu un autre ventilateur, spécifiquement pour le sé-

chage de maïs. Le clapet de réglage, livrable en tant qu'équipement supplémentaire (fig. 4), servait également à réduire le débit d'air.
La réduction du débit d'air occasionnait un réchauffement de l'air de 8 à 12° C. Ainsi la déficience de saturation de l'air se multipliait par 3,6 à 7,6, de sorte que 2,7 à 3,8 g d'eau (quantité moyenne: 3,1 g) ont pu être absorbés par $m^3$ d'air. L'air fortement saturé de vapeur d'eau sortait parfois du maïs sous forme de vapeur visible qui se déposait sur les cloisons et d'autres parties froides du séchoir. Une partie de la vapeur d'eau se condensait à la surface du fourrage; la couche humide, forte d'environ 5 cm et subsistant jusqu'à la fin du processus de séchage, a dû être bien mêlée ensuite au maïs sec. Une couche de paille hachée, forte d'environ 10 cm et appliquée à la fin, se prête également à faire sortir l'eau restante du maïs.

La consommation spécifique de courant variait entre 244 et 393 Wh par kg d'eau évaporée. Les valeurs plus élevées étaient dues soit à des températures plus basses de l'air à l'entrée du registre de chauffage, soit au séchage final de deux à trois portions. La consommation de courant mesurée en kWh par dt (100 kg) de fourrage sec variait dans une bien plus forte proportion. Cela du fait que le degré d'humidité final des différentes portions n'était pas toujours le même et que les conditions météorologiques variaient, elle aussi. La consommation moyenne de courant était de 57,8 kWh par 100 kg de fourrage sec.
Contrairement au foin, le maïs haché ne se tasse pour ainsi dire pas; ainsi la hauteur du tas ne change pas après le remplissage. La pression mesurée en dessous du fourrage diminuait au fur et à mesure du processus de séchage. Les chiffres indiqués dans le tableau 1 sont des valeurs moyennes; lors du premier essai, p.ex., les valeurs limites allaient de 2,1 à 3,4 mbar. Le passage de l'air (aspiré par le ventilateur) à travers le registre de chauffage occasionnait des pertes de pression supplémentaires de 1,0 à 3,7 mbar. La fermeture (manuelle) du clapet de réglage faisait monter la pression. Nous avons intentionnellement réduit le débit d'air afin d'augmenter la température de l'air sortant du maïs, resp. entrant dans le registre de refroidissement et pour empêcher ainsi les tubes de refroidissement de se givrer. Le clapet a été réglé suivant les indications du manomètre de contrôle montrant la température. Avec des températures extérieures tournant autour de zéro, le givrage au registre de refroidissement n'a pourtant presque jamais pu être évité.
Afin de pouvoir comparer les résultats des essais de séchage de maïs aux résultats obtenus par d'autres appareils, nous avons noté l'augmentation de la quantité d'eau absorbée et de la déficience de saturation de l'air amené; cela en fonction de la teneur en MS du maïs et de la déficience de saturation initiale de l'air (voir tableau 2).

**Tableau 2: Séchage de maïs haché: augmentation de la déficience de saturation de l'air amené et quantité d'eau absorbée (en g/$m^3$ d'air) en fonction de la teneur en MS du maïs et de la déficience de saturation initiale de l'air**

| | Déficience de saturation de l'air amené (DS) et quantité d'eau absorbée (EA) en g/$m^3$ d'air | |
|---|---|---|
| | DS initiale < 2,5 | DS initiale > 2,5 |
| | DS / EA | DS / EA |
| teneur en MS (%) | | |
| < 30 | 6,1 / 2,1 | 13,6 / 3,0 |
| 30 - 40 | 7,2 / 2,7 | 12,1 / 3,2 |
| 40 - 50 | 11,0 / 3,8 | 18,8 / 4,7 |
| 50 - 60 | 10,9 / 3,7 | 18,8 / 4,3 |
| 60 - 70 | 11,1 / 3,6 | 16,3 / 4,4 |
| 70 - 80 | 9,8 / 3,0 | 14,7 / 3,4 |
| > 80 | 9,6 / 2,6 | 17,4 / 3,3 |

Puissance absorbée moyenne de la pompe à chaleur: 7,2 kW

## 3. Séchage de cossettes de betteraves sucrières

Le tableau 1 montre également les résultats d'un essai de séchage de cossettes pressées. L'essai a débuté à la mi-novembre, à l'époque où nous disposions de cossettes. Nous sommes arrivés à terminer tout juste un essai avant que la température ne tombât en dessous de zéro (danger de givrage au registre de refroidissement).
Cet essai unique exigeait une quantité importante de courant (197 kWh par 100 kg de cossettes sèches). Avec un prix de Fr. -.15/ kWh (tarif de jour: Fr. -.18, tarif de nuit : Fr. -. 09), on arrivait à des frais de courant de Fr. 29.55. A titre comparatif: les entreprises agricoles de déshydratation demandaient, en 1988, Fr. 29.60 pour le séchage de 100 kg de cossettes (prix moyen).

## 4. Conclusions

Les essais nos. 1 à 5 montraient que la combinaison d'une pompe à chaleur air-air et d'un séchoir discontinu permettait de sécher par jour environ une tonne de maïs haché contenant 30% de MS. Le séchage de cossettes de betteraves sucrières n'est pas à recommander, étant donné que rien que l'énergie nécessaire (près de 200 kWh par 100 kg de cossettes sèches) coûte pratiquement aussi cher que le séchage par une entreprise de déshydratation.

Le séchage de maïs contenant 33 % de MS exigeait, en moyenne, 57,8 kWh par 100 kg de fourrage sec. Il en résultait des frais d'énergie de Fr. 8.65 par dt.

La quantité moyenne d'eau absorbée s'élevait à 27,3 kg/h, la puissance absorbée de la pompe à chaleur étant de 7,2 kW. Cette performance permet de remplir le séchoir deux fois par saison et de faire sécher 33 t de fourrage humide, resp. 11,25 t de fourrage sec (avec une durée de séchage de 33 jours).

Le séchoir discontinu et le clapet de réglage du débit d'air représentent un investissement supplémentaire de l'ordre de Fr. 7000.– et occasionnent des frais annuels de Fr. 835.– (amortissement 6,7 % = Fr. 467.–, intérêts 3,6% = Fr. 252.–, réparations 1,5% = Fr. 105.–, assurance 0,15% = Fr. 11.–). Il en résulte des frais de Fr. 16.05 par dt de fourrage sec, y compris les frais de courant électrique. L'économie par rapport au prix à payer à une entreprise agricole de déshydratation s'élevait, en 1988, à Fr. 4.15 par 100 kg de maïs sec, resp. à Fr. 467.– par année. Cette différence couvre une partie des frais fixes de la pompe à chaleur qui sont importants (Fr. 2260.–, voir Rapport FAT 324).

Pour ce qui est de l'économie du travail, il s'agit d'opposer les travaux supplémentaires (alimenter et vider le séchoir, brasser le maïs, surveiller le fonctionnement de l'installation) au temps de travail que l'on gagne en n'étant pas obligé de transporter le fourrage à l'entreprise de déshydratation.

**Des demandes éventuelles concernant les sujets traités ainsi que d'autres questions de technique agricole doivent être adressées aux conseillers cantonaux en machinisme agricole indiqués ci-dessous. Les publications et les rapports de textes peuvent être obtenus directement à la FAT (8356 Tänikon).**

| | | |
|---|---|---|
| **BE** | Furer Willy, 2732 Loveresse | Tél. 032 - 91 42 71 |
| **FR** | Lippuner André, 1725 Grangeneuve | Tél. 037 - 82 11 61 |
| **TI** | Müller A., 6501 Bellinzona | Tél. 092 - 24 35 53 |
| **VD** | Gobalet René, 1110 Marcelin-sur-Morges | Tél. 021 - 801 14 51 |
| **VS** | Pitteloud Camille, Châteauneuf, 1950 Sion | Tél. 027 - 36 20 02 |
| **GE** | A.G.C.E.T.A., 15, rue des Sablières, 1214 Vernier | Tél. 022 - 41 35 40 |
| **NE** | Fahrni Jean, Le Château, 2001 Neuchâtel | Tél. 038 - 22 36 37 |
| **JU** | Donis Pol, 2852 Courtemelon/Courtételle | Tél. 066 - 22 15 92 |

Les numéros des «Rapports FAT» peuvent être également obtenus par abonnement en langue allemande. Ils sont publiés sous le titre général de «FAT-Berichte». Prix de l'abonnement: Frs. 40.– par an. Les versements doivent être effectués au compte de chèques postaux 30 - 520 de la Station fédérale de recherches d'économie d'entreprise et de génie rural, 8356 Tänikon. Un nombre limité de numéros polycopiés en langue italienne sont également disponibles.