

Technique

Agroscope Transfer | N° 38 / 2014

Directives pour les installations de séchage en grange

Une planification professionnelle garantit les résultats et réduit les coûts

Novembre 2014

Auteurs

Christian Aschauer, Université des ressources naturelles, Vienne (A)
 Susanne Jakschitz-Wild, Office bavarois de l'agriculture, Freising (D)
 Matthias Kittl, Chambre d'agriculture, Salzburg (A)
 Karl Neuhofer, ARGE Heumilch, Strasswalchen (A)
 Franz Nydegger, Agroscope, Ettenhausen (CH)
 Johannes Ostertag, Office bavarois de l'agriculture, Freising (D)
 Alfred Pöllinger, Centre de recherche et développement de Raumberg-Gumpenstein, Irdning (A)
 Reinhard Resch, Centre de recherche et développement de Raumberg-Gumpenstein, Irdning (A)
 Stefan Thurner, Office bavarois de l'agriculture, Freising (D)
 Gotthard Wirleitner, Seekirchen (A)



Photo: Franz Nydegger, Agroscope

Installation de séchage en grange avec panneaux photovoltaïques: l'utilisation électrique et thermique de l'énergie solaire permet un séchage du foin sans impact sur le climat.

Les installations de séchage en grange diminuent les pertes par brisure et par respiration, limitent considérablement l'activité des moisissures et des bactéries et réduisent de beaucoup le risque météorologique par rapport au séchage au sol. Lorsque les conditions météorologiques sont défavorables, les installations de séchage à air froid ne sont pas en mesure d'atteindre, en temps utile, la teneur en matière sèche de 87–88 % nécessaire pour un stockage en toute sécurité. Pour rendre le séchage plus efficace, on utilise donc de plus en plus de l'air chaud et/ou déshumidifié. Suivant la composition du peuplement végétal et avec une récolte effectuée au stade de l'épiaison / de l'apparition de la panicule des graminées dominantes (p.ex. dactyle), ces systèmes permettent d'atteindre une concentration énergétique de l'ordre de 6 MJ d'énergie nette

lactation (NEL) par kilogramme de matière sèche. Le foin demeure donc un fourrage de base de qualité, notamment parce qu'il ne contient presque plus de bactéries formant des spores. Ce point est particulièrement déterminant pour la fabrication de fromages à pâte dure.

Les dépenses d'énergie pour le séchage du foin peuvent être considérablement réduites en utilisant l'énergie solaire et la technique des pompes à chaleur au lieu des sources d'énergie fossiles. Un chauffage de l'air sans émission de CO₂ avec des copeaux de bois ou des pellets est une alternative pour certaines exploitations, de même que la récupération de chaleur. La combinaison de l'énergie photovoltaïque et de capteurs à air thermiques est également une solution intéressante. Pour de bons résultats, il est indispensable de bien planifier et de bien gérer l'installation de séchage.

Construction

Dimension des cellules

Les installations de séchage en grange se composent d'au moins d'une cellule de stockage rectangulaire avec un fond étanche et des parois latérales (fig. 1). Le fond de cette cellule est équipé d'une claie sur laquelle repose le foin. Les différentes dimensions sont indiquées à la figure 3. Un ventilateur pulse l'air de séchage sous la claie, l'air circule à travers le foin, absorbe l'eau et est évacué à l'extérieur par les ouvertures.

La surface de la cellule doit être adaptée aux besoins en fourrage et à la surface de récolte. Selon une règle empirique, il faut compter environ 6–10 m² de surface de séchage par unité gros bétail ou 14–24 m² par ha pour chaque chargement à sécher. Les dalles et les parois en béton devraient être isolées (p.ex. avec des panneaux d'aggloméré). Pour atteindre une hauteur minimale de remplissage de 1–1,5 m, les cellules de stockage ne devraient pas être prévues trop grandes. Les surfaces des cellules de plus de 250–300 m² devraient être subdivisées. Les grandes installations avec plusieurs gros tas de foin font exception. Les formes rectangulaires d'un rapport longueur/largeur maximum de 1 sur 1,5 se sont avérées les plus appropriées. Différentes positions de ventilateurs sur les côtés ou dans les angles sont possibles (fig. 2).

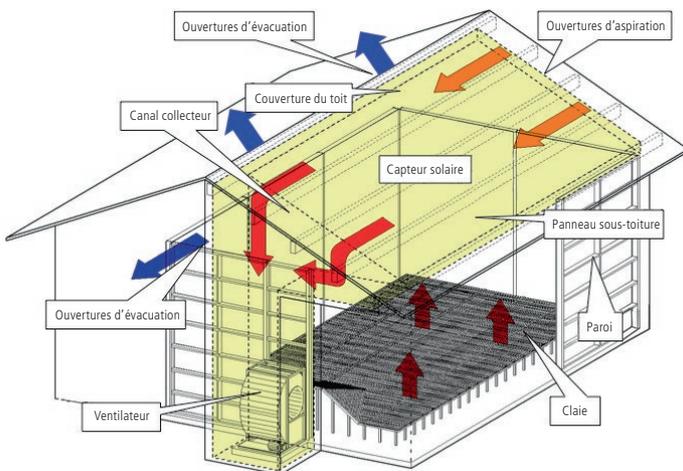


Fig. 1: Guidage de l'air (flèche) dans une installation de séchage en grange avec capteur solaire intégré dans le toit.

A température équivalente, la vitesse de séchage dépend considérablement du débit d'air (débit volumétrique d'air). Avec une aération très puissante, les fins capillaires des plantes ne peuvent pas restituer l'eau suffisamment rapidement. C'est le cas notamment avec le foin ventilé à brins grossiers. En outre, la pression augmente plus que la vitesse de l'air et des «cheminées» se forment aisément par lesquelles l'air de séchage s'échappe sans avoir été utilisé. Selon l'état de la technique (Baumgartner 1992), le débit volumétrique d'air doit être d'environ 0,11 m³ par mètre carré de surface et par seconde avec une marge de manœuvre de 0,07–0,14 m³/m² et seconde (env. 240–500 m³/m² et heure). La valeur indicative du débit volumétrique doit au moins être atteinte à mi-hauteur du tas de foin. Au sommet du tas de foin, on admet une baisse du débit d'air de 0,07 m³/s et m². Dans les systèmes avec déshumidificateur et recyclage de l'air, un débit d'air inférieur à 0,11 m³/s et m² est également

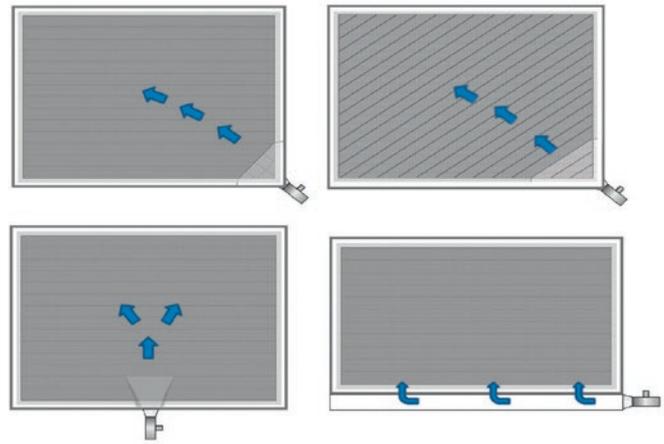


Fig. 2: Position du canal de soufflage, en haut dans le coin, mais avec une disposition différente des supports de la claie, en bas au centre, resp. avec canal de soufflage latéral.

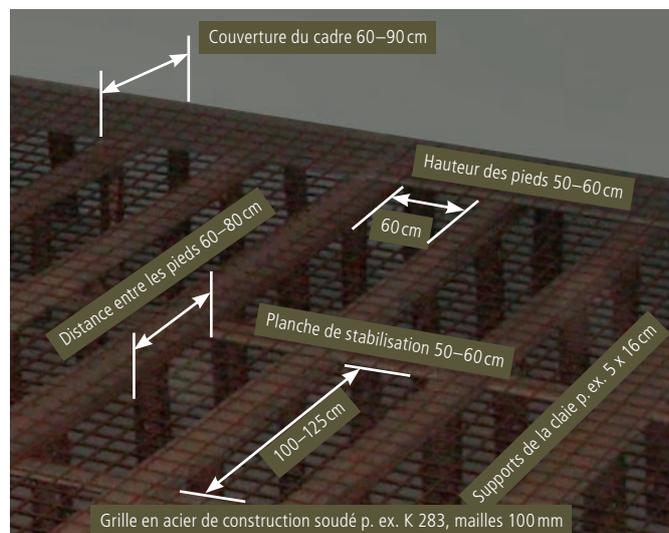
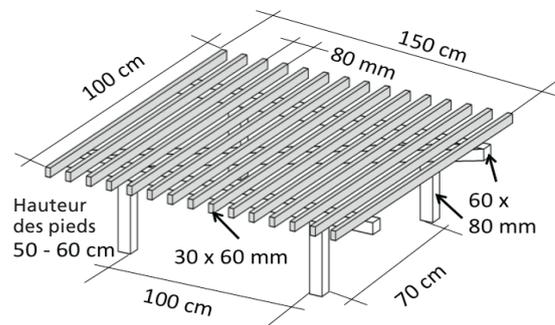


Fig. 3: Données relatives à la construction des cellules et de la claie.

recommandé. Des marques de hauteur continues à la paroi de la cellule indiquent le volume de récolte, les inégalités dans la hauteur de remplissage sont également plus faciles à identifier depuis la cabine du pont roulant.

Plus la surface de la cellule s'écarte d'une forme carrée, plus il est important de prévoir une hauteur de claie suffisante. Il est recommandé de prévoir une hauteur libre de 50 cm. Une disposition ciblée des supports de la claie permet d'éviter les angles morts. Pour compenser la pression, les supports de claies doivent en principe être plutôt placés au travers de la direction du flux d'écoulement de l'air (fig. 3). Dans la partie supérieure du canal d'amenée, la pression statique peut être augmentée en plaçant une couverture en aciers de construc-

tion soudés ou en utilisant des barres de freinage. La paroi de cellule est généralement habillée de panneaux OSB ou MDF d'une épaisseur d'environ 18mm. Pour l'armature, on utilise généralement des carrelets, de 16cmx14cm. L'armature peut être verticale ou horizontale. Il est recommandé d'opter pour une armature verticale avec une poutrelle métallique à ailes larges sur le côté supérieur (fig. 4).



Fig. 4: Conception de la paroi d'une cellule.

Les extrémités supérieures des carrelets verticaux peuvent être encastrées entre les faces de bride. Dans le faîte et/ou le fronton, il faut prévoir des ouvertures d'évacuation (fig. 5).

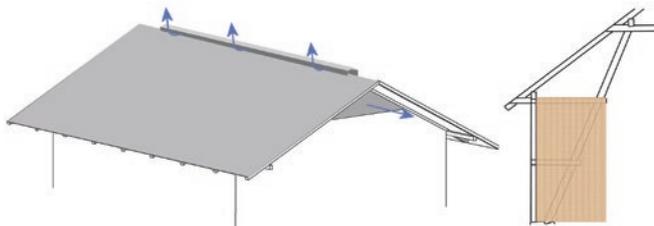


Fig. 5: Aération du bâtiment (à gauche), habillage avec des panneaux de construction flottant vers le bas (à droite).

Le choix du ventilateur

Le ventilateur doit assurer le débit d'air nécessaire pour faire face à la contre-pression du fourrage à sécher et aux autres résistances éventuelles. Lorsque le régime d'entraînement est fixe, la pression et le débit volumétrique de l'air se règlent automatiquement en fonction de la résistance. Si la résistance à l'écoulement faiblit, le débit d'air augmente et inversement. Chaque ventilateur possède un point de fonctionnement optimal spécifique avec lequel il atteint son meilleur rendement. Contre toute attente, la puissance d'entraînement peut être plus faible avec une forte pression qu'avec refoulement libre sans contre-pression.

En moyenne, il faut compter une pression statique de 100–240Pa par mètre de hauteur du tas pour un débit volumétrique spécifique de 0,11 m³/s et m². Il faut éventuellement y ajouter la perte de pression due au capteur solaire (env. 75–120Pa), au déshumidificateur (env. 70–100Pa) ou à l'échangeur thermique (env. 50–80Pa). Le foin composé de trèfles en première coupe exerce une contre-pression élevée, notamment lorsqu'il est coupé court et qu'il est très humide. Le foin ventilé en longues tiges comme la luzerne notamment exerce en revanche peu de contre-pression. Le débit d'air rapporté à la surface a un impact important sur la pression (fig. 6).

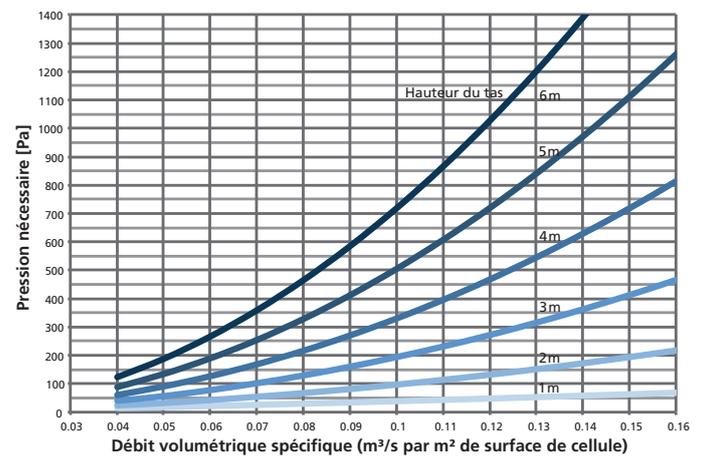


Fig. 6: Pression statique pour le foin issu de prairies et séché en cellules.

La pression maximale du ventilateur devrait avoir une réserve d'au moins 200Pa. Dans l'ensemble, cela se traduit par une pression maximale de 800–1200Pa pour le séchage des cellules. Le débit volumétrique varie proportionnellement au régime, la pression en revanche correspond au changement du régime au carré, tandis que la puissance d'entraînement correspond au changement du régime au cube. Le diagramme pression-volume est le mieux adapté pour représenter les caractéristiques du ventilateur (fig. 7).

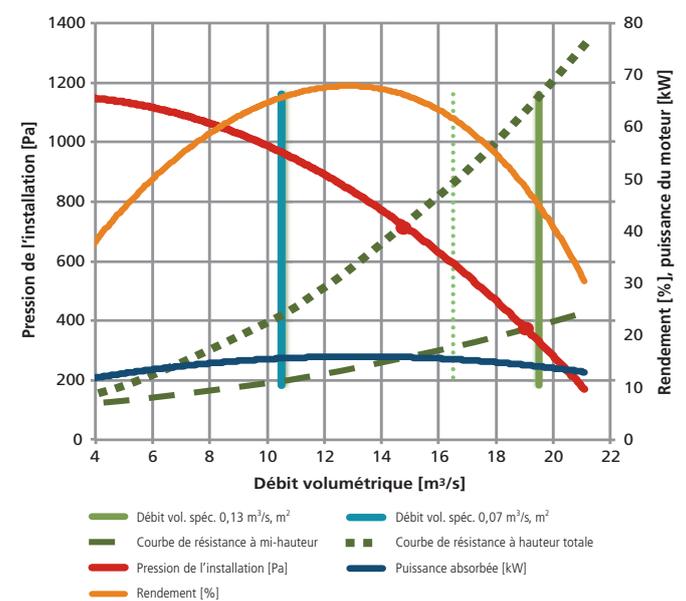


Fig. 7: Diagramme de pression et de volume avec les courbes de pression de l'installation, de puissance absorbée et de rendement.

Il comprend les courbes de la pression de l'installation, de la puissance absorbée et du rendement du ventilateur (moteur compris). Plus la hauteur du tas de foin augmente, plus le point de fonctionnement se décale de droite à gauche sur la courbe de pression.

Le point de fonctionnement se situe là où la contre-pression s'équilibre avec la pression du ventilateur. Dans le diagramme, cela correspond à l'intersection de la courbe de pression de l'installation et de la courbe de résistance (fig. 7). Avec des convertisseurs de fréquence, les courbes

Tabl. 1: Régimes du moteur à différentes fréquences.

Type de moteur	Régime typique en min ⁻¹ avec entraînement direct		
	40 Hertz	50 Hertz	60 Hertz
4-pôles	1180	1480	1770
6-pôles	780	970	1160
8-pôles	580	720	865

Tabl. 2: Puissance électrique connectée.

Fusibles	Puissance électrique possible
25 A	14,4 kW
32 A	18,4 kW
50 A	28,7 kW
63 A	36,2 kW
80 A	43,9 kW

Valeurs valables pour le facteur de puissance $\cos \varphi = 0,83$

de pression sont inscrites pour différents régimes, en fonction du nombre de pôles et du régime (tabl. 1). Dans la pratique, la fréquence du réseau de 50 Hertz est variée plutôt dans la plage de 40–60 Hertz.

Compte tenu des températures possibles de l'air de séchage, les moteurs d'entraînement devraient pouvoir résister à des températures élevées. Ce critère est indiqué sur la plaque signalétique comme valeur PTC (p. ex. 150 °C). A titre indicatif, il faut compter une puissance de moteur de 0,11 kW par m² de surface de cellule de séchage. Souvent, la puissance des ventilateurs et des autres appareils électriques est limitée par le disjoncteur de l'installation électrique (tabl. 2).

Augmentation de la puissance de séchage

Capteurs solaires (aspiration par le toit)

Aucun projet ne devrait négliger l'utilisation de l'énergie solaire (Nydegger 1992). Généralement, les bâtiments permettent une aspiration par le toit en dessous de la toiture existante, dans les toits à chevrons (fig. 8 et 9) comme dans les toits à pannes (fig. 10).

Avec les toits sombres (fibrociment, tôle profilée et panneaux photovoltaïques), il est possible d'atteindre des rendements allant jusqu'à environ 50 %, avec les toits en tuiles jusqu'à 37 %. On peut compter environ 250–300 W de puissance calorifique utilisable par m² de toiture.

Pour que l'aspiration par le toit puisse fonctionner, il est indispensable d'avoir une sous-toiture hermétique. La vitesse de l'air doit être de l'ordre de 3–6,5 m/s.

La surface recommandée pour les capteurs devrait être comprise entre le double et le triple de la surface ventilée. Un débit volumétrique d'air de 100–200 m³/h par m² de toiture a fait ses preuves. Il est conseillé d'éviter les surfaces de capteurs très longues (par rapport à la largeur d'aspiration). L'aspiration par le toit est possible même avec des traverses (toit aveugle). Pour ce faire, il faut enlever une bande de la sous-toiture au-dessus du canal collecteur intérieur. Il faut éventuellement augmenter la hauteur du lattis ou du contre-lattis (suivant le type de guidage de l'air) au-dessus de la sous-toiture. Lorsque les canaux col-

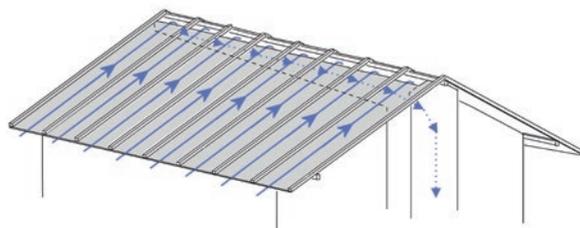


Fig. 8: Capteur solaire (aspiration par la toiture) pour toit à chevrons avec canal collecteur supérieur.

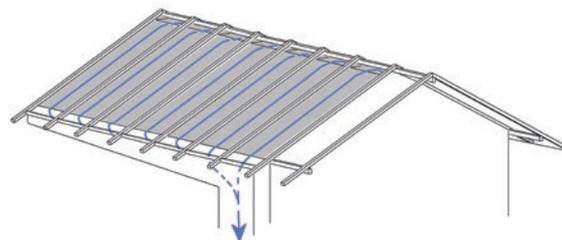


Fig. 9: Capteur solaire (aspiration par la toiture) pour toit à chevrons avec canal collecteur côté gouttière.

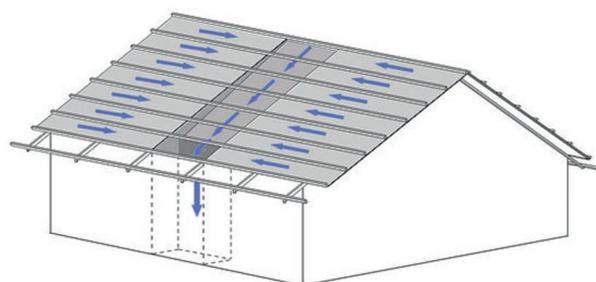


Fig. 10: Aspiration par la toiture pour toit à pannes avec canal collecteur au centre du côté large d'une ferme.

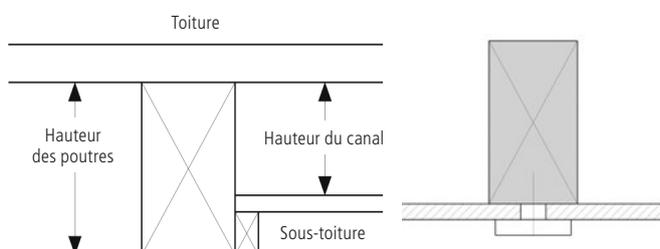


Fig. 11: Installation de la sous-toiture, hauteur optimale du canal inférieure à la hauteur des poutres (à gauche), hauteur du canal = hauteur des poutres (à droite).

lecteurs sont de longueurs différentes, il peut être utile de les construire également de hauteurs différentes (fig. 11). Le logiciel ART-Soko (Nydegger 2010) est utile pour calculer la hauteur de canal optimale. Une inclinaison de la toiture de 20 degrés est idéale du fait de la position élevée du soleil pendant les mois d'été. Les déviations par rapport à l'orientation Sud idéale ne réduisent que légèrement la puissance calorifique en été pour les toits plats. Par conséquent, les toitures plates orientées au Nord peuvent même être utilisées (fig. 12).

Dans les canaux collecteurs, la vitesse de l'air ne devrait pas dépasser 4 m/s. Dans l'ensemble, la pression d'aspiration nécessaire ne doit pas dépasser 100–150 Pa.

La combinaison de l'énergie photovoltaïque avec la récupération de la chaleur du toit (fig. 13–15) constitue une solution particulièrement intéressante. Un refroidissement des modules solaires de 1 °C chacun permet d'atteindre

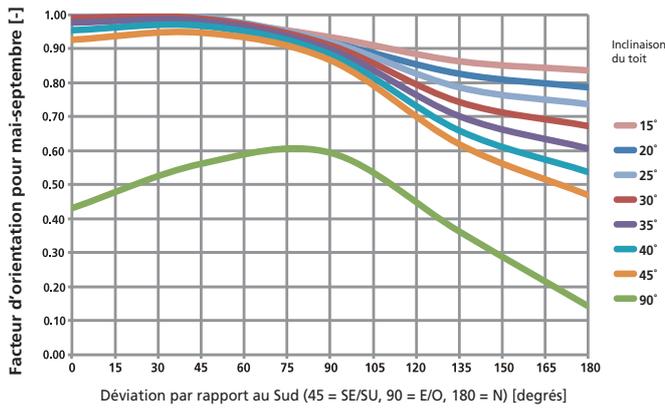


Fig. 12: Facteur d'orientation par rapport au Sud pour les mois d'été.



Fig. 13: Aspiration par le toit combinée avec énergie photovoltaïque.

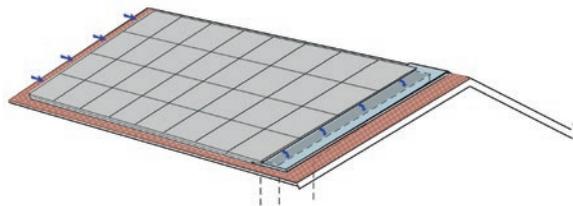


Fig. 14: Énergie photovoltaïque sur toit existant avec guidage horizontal de l'air et canal collecteur latéral.

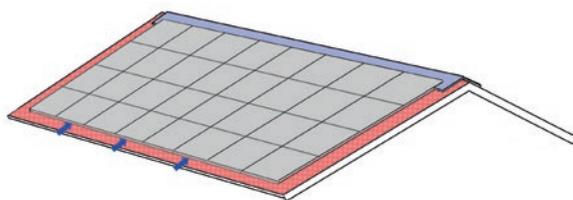


Fig. 15: Énergie photovoltaïque sur toit existant avec guidage de l'air en direction du pignon et couverture du pignon.

près de 0,5% de rendement en plus. La puissance calorifique en dessous des modules est comparable à celle des toitures classiques. Lorsque le séchage n'est pas en service, il est recommandé de prévoir un dispositif mécanique ou naturel de circulation de l'air sous les modules. En outre, il faut également veiller à l'aération des étables (Van Caenegem 2009).

Séchage avec four à air chaud ou échangeur thermique

L'air réchauffé grâce à un four à air chaud (fig. 16) ou à la récupération de chaleur permet de réduire considérablement la durée de séchage. On peut aussi éventuellement utiliser le chauffage du bâtiment lorsqu'il ne fonctionne pas en été à l'aide d'un échangeur thermique. La puissance de chauffage nécessaire est souvent sous-estimée.

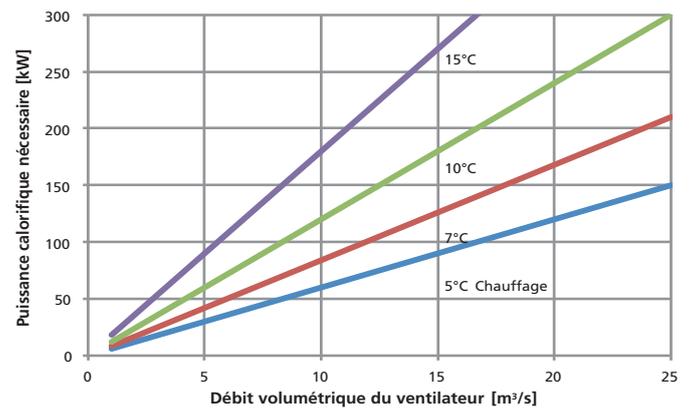


Fig. 16: Puissance calorifique nécessaire en cas de mauvais de temps.

Il faut compter une puissance de chauffage d'environ 33 kW pour réchauffer 10 000 m³ d'air par heure de 10°C. Réchauffer l'air de plus de 15–20°C ne semble pas utile pour des raisons d'efficacité énergétique et aussi par respect des composants protéiques du fourrage à sécher. Des températures de l'air supérieures à 50°C sur plusieurs jours peuvent déjà être problématiques de ce point de vue. La consommation énergétique spécifique pour sécher 1 kg d'eau est généralement de l'ordre de 0,9–1,6 kWh et est donc relativement élevée. Le bois de chauffage ou les rejets thermiques issus de la production conjointe de chaleur et d'électricité (p. ex. installations de biogaz) sont souvent bon marché alors qu'avec un déshumidificateur il faut s'attendre à un prix plus élevé par kWh d'énergie. Souvent, la puissance électrique nécessaire n'est pas disponible. Les fours à air chaud affichent une consommation électrique non négligeable. Lors de la mise en place, il faut tenir compte des directives locales de protection contre les incendies. L'air chaud est généralement véhiculé dans des tuyaux souples en polyamide. Par mauvais temps, des couches de condensation peuvent se former en surface en cas de ventilation à air chaud et d'aération insuffisante du bâtiment.

Séchage avec déshumidificateur

Le déshumidificateur avec pompes à chaleur (fig. 17) permet d'abaisser considérablement la consommation énergétique spécifique du séchage par rapport au réchauffement de l'air. L'efficacité dépend cependant essentiellement des conditions d'utilisation, notamment de la température et de l'humidité de l'air. En dessous de 35–40% d'humidité relative de l'air, mais aussi avec des températures infé-

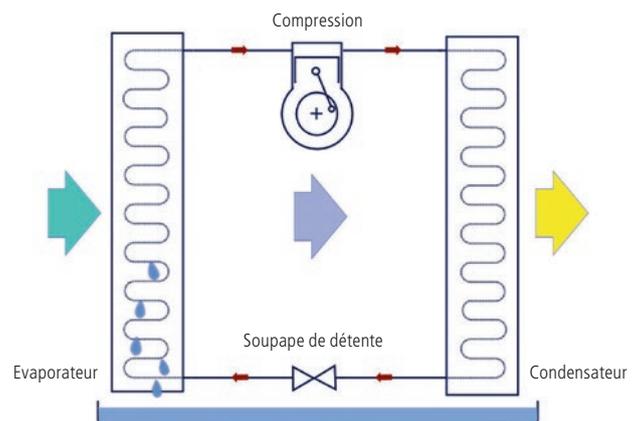


Fig. 17: Schéma d'un déshumidificateur (flux d'air cf. flèche).

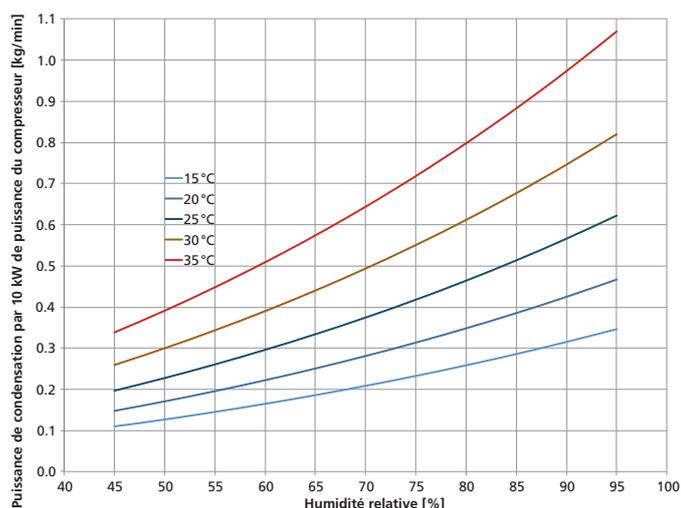


Fig. 18: Puissance de condensation des déshumidificateurs en fonction de la température et de l'humidité de l'air.

rieures à 10°C, l'utilisation d'un déshumidificateur est peu efficace. Contrairement au réchauffement de l'air seul, le déshumidificateur réduit également l'humidité absolue et par conséquent, le risque de condensation en surface.

Le refroidissement de l'air en dessous du point de rosée dans l'évaporateur entraîne l'évacuation d'eau. La chaleur préalablement récupérée avec la chaleur de condensation et la chaleur perdue par l'agrégat conduit à un réchauffement de 2–8°C dans le condensateur. Pour une température extérieure de moins de 8–10°C, il peut même arriver que l'évaporateur givre. Un refoulement de gaz chauds permet d'éviter ce phénomène. Il est également important d'harmoniser le débit d'air à travers le déshumidificateur. Si le débit d'air est trop élevé, le point de rosée ne pourra éventuellement plus être atteint. Un débit d'air très faible, tout comme une température d'aspiration élevée entraînent une différence de température considérable entre évaporateur et condensateur, ainsi qu'une pression élevée du fluide frigorigène, qui se traduit à son tour par une importante puissance absorbée. Les valeurs typiques de la vitesse de l'air dans l'évaporateur sont de 3–4 m/s. Les déshumidificateurs peuvent en principe fonctionner aussi bien avec un flux principal («déshumidification complète», fig. 19) qu'avec un flux auxiliaire («déshumidification partielle»). En cas de déshumidification partielle, le déshumidificateur est alimenté avec de l'air rejeté du fourrage à sécher, un ventilateur d'appoint assure un débit d'air optimal. L'air déshumidifié est ensuite comprimé dans le tas de foin grâce à l'air extérieur envoyé par le ventilateur. En cas de déshumidification complète, le séchage peut se faire soit à l'air frais soit par circulation d'air. Dans ce dernier cas, la température de l'air peut augmenter considérablement, ce qui améliore également la puissance de condensation (fig. 18), et évite à l'évaporateur de givrer. Cependant, dans les bâtiments totalement hermétiques, le séchage est limité par la puissance de condensation du déshumidificateur.

En pratique, on estime qu'environ 30–40 % de l'eau extraite se condense sur les parois du bâtiment ou est évacuée à l'extérieur. Il faut veiller alors que les éléments en bois de la construction ne soient pas exposés pendant trop longtemps à une humidité excessive.

L'expérience a montré qu'un fonctionnement à l'air frais était intéressant à partir d'une température extérieure

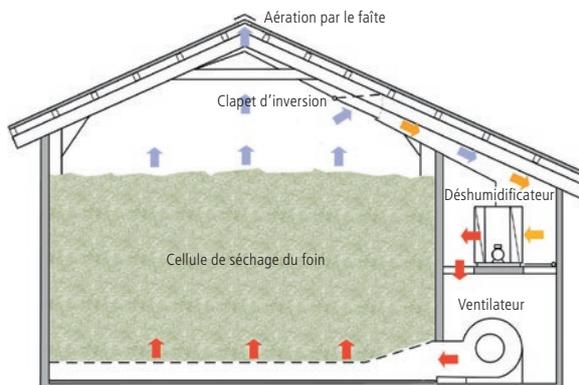


Fig. 19: Schéma d'un système de déshumidification par flux principal avec clapet d'inversion (flux d'air cf. flèche).

d'environ 25°C. En dessous de cette température, il est conseillé d'opter pour la circulation d'air. C'est pourquoi dans l'idée de récupérer la chaleur du toit notamment, il est avantageux de prévoir un clapet d'inversion pour le guidage de l'air. Avec les déshumidificateurs, il est recommandé d'isoler le bâtiment thermiquement ainsi que le sol des cellules de séchage et les canaux de ventilation, de même que toutes les autres surfaces risquant de subir la condensation, car l'air chaud et humide s'y refroidit démesurément. L'important est d'avoir une aération efficace du bâtiment. Même avec un déshumidificateur à circulation d'air, un peu d'humidité devrait pouvoir s'échapper vers l'extérieur. L'air humide est moins dense que l'air sec. Par conséquent, les ouvertures d'aération devraient être placées en haut.

Systèmes de commande

Les systèmes de commande facilitent la manipulation, mais ne peuvent pas entièrement remplacer la surveillance par une personne. Les systèmes de commande simples pour la ventilation à froid enregistrent l'humidité de l'air, parfois aussi la température du foin et peuvent, en cas de mauvais de temps, fonctionner par intervalles avec des interruptions de 2–3 heures généralement.

Les systèmes de commande à mémoire programmable peuvent passer automatiquement du fonctionnement à l'air frais à un fonctionnement par circulation d'air dans le déshumidificateur ou adapter le régime des ventilateurs en liaison avec des convertisseurs de fréquence. Ils sont également en mesure de respecter une puissance électrique connectée limitée. Enfin, le débit d'air peut être réduit pour le séchage par circulation d'air ou au contraire, augmenter par beau temps. La mesure de la température et de l'humidité de l'air de séchage avant qu'il ne pénètre dans le foin et au-dessus du foin ou le calcul du déficit de saturation adiabatique de l'air et le classement de l'humidité du fourrage permettent d'estimer au préalable le temps de séchage, ainsi que de prévoir un fonctionnement par intervalle.

Fonctionnement

Le préfanage est décisif

Le fourrage vert frais contient environ 80 % d'eau, soit seulement 20 % de matière sèche. Lors du séchage, il faut donc extraire 4 kg d'eau par kg de matière sèche, ce qui corres-

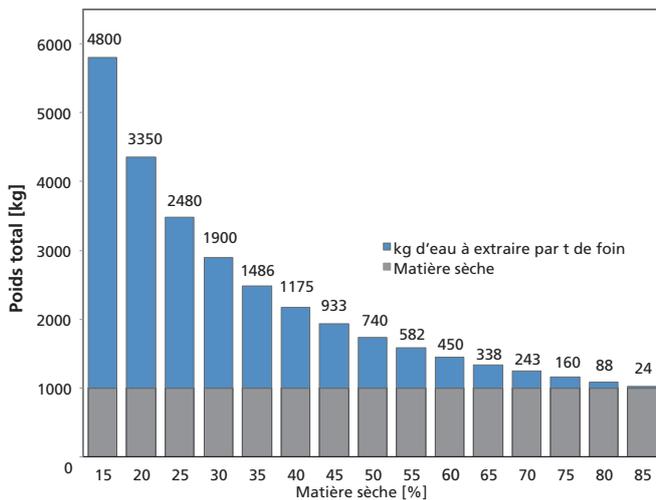


Fig. 20: Quantité d'eau à extraire.

pond à 3,35 kg d'eau par kg de foin (fig. 20). Le foin ventilé, qui a été préséché au sol jusqu'à avoir 60 % de matière sèche, ne contient plus qu'environ 0,67 kg d'eau par kg de matière sèche. L'essentiel du séchage se produit donc sur la parcelle. Le préséchage détermine de manière décisive les coûts du séchage en grange consécutif. Un taux d'humidité plus élevé d'environ 10 % du foin à sécher multiplie par deux la quantité d'eau à extraire. Pour sécher de l'herbe fraîchement récoltée, p.ex. avec un séchage à air chaud, il faut extraire dix fois plus d'eau par rapport au foin ventilé typique qui présente 65 % de matière sèche. Généralement, le foin ventilé est engrangé le jour qui suit la fauche. L'emploi d'une faucheuse-conditionneuse, ainsi que le travail ciblé avec la pirouette à deux ou trois reprises permettent d'augmenter la teneur en matière sèche à 60–70 % lorsque les conditions météorologiques sont favorables.

Il est important d'utiliser des outils avec des toupies de petit diamètre réglées horizontalement. Le premier passage peut être effectué quasiment à plein régime de la prise de force (p.ex. 500 min⁻¹) à environ 6–8 km/h. Lors du deuxième passage, la prise de force devrait tourner à un régime de 380–420 min⁻¹ et en cas de troisième passage, le régime devrait être réduit à 340–400 min⁻¹. Les passages successifs ne devraient pas être effectués dans la même direction, mais plutôt au travers ou à contresens. Avec des fourrages à longues tiges, les faucheuses-conditionneuses permettent de réduire considérablement le temps de séchage de 1–6 heures et d'économiser également l'opération de fanage. Pour des questions de coûts, le foin d'un jour n'entre en ligne de compte pour le séchage en grange que lorsque les conditions météorologiques sont défavorables. Il existe un moyen d'évaluer grossièrement le préséchage. Il suffit de placer les tiges dans la paume de la main et de passer l'ongle du pouce dessus dans le sens de la longueur. Lorsque le taux de matière sèche est supérieur à 65 % (< 35 % d'humidité), plus aucune eau ne perle à l'extrémité de la tige (fig. 21).



Fig. 21: Estimation de la teneur en matière sèche.

Stockage

Un remplissage le plus régulier et le plus aéré possible est décisif pour le résultat du séchage. Suivant l'humidité et la composition du fourrage à sécher et suivant la puissance de l'installation, la hauteur d'une couche de chargement ne devrait pas dépasser 1–2 m. Plusieurs petits chargements améliorent le rendement du séchage. Des zones de densité ou d'humidité différentes dans le foin ventilé se traduisent par une durée de séchage inégale, voire par la formation de moisissures. Les parties du fourrage d'humidité différente devraient toujours être réparties sur toute la surface de la cellule. Les sècheurs de foin expérimentés arrivent à évaluer le degré de séchage et la formation de cheminées éventuelles en circulant pieds nus sur le tas de foin lorsque le ventilateur tourne.

En principe, le ventilateur devrait déjà tourner pendant le remplissage des cellules, pour limiter le tassement du foin. Les systèmes de déshumidification devraient fonctionner à l'air frais pendant le remplissage, pour empêcher que l'évaporateur ne s'encrasse trop. Il est cependant nécessaire de nettoyer les surfaces de l'échangeur thermique de temps à autre.

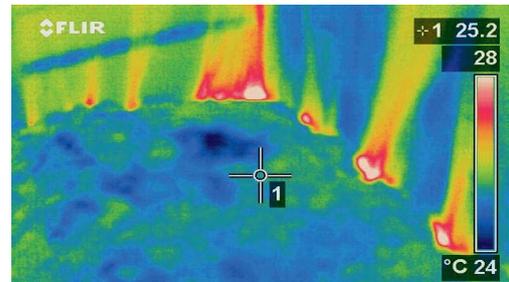


Fig. 22: La photo thermographique montre que l'air chaud s'échappe le long des parois de la cellule (parties rouges et jaunes).

Une bonne aération est décisive pour le résultat du séchage. L'air circule autour des zones compactées qui pourrissent facilement. Au contraire, les zones aérées entraînent d'importantes pertes d'air du fait de la formation de cheminées. Elles peuvent se produire le long de la paroi des cellules, surtout lorsque la hauteur de remplissage est faible (fig. 22). La coupe du foin par trois à huit couteaux dans l'autochargeuse améliore l'homogénéité du remplissage, mais n'est pas indispensable pour du fourrage très jeune. Lorsque le remplissage se fait à l'aide d'une grue, la griffe devrait s'ouvrir en se secouant tout en effectuant un mouvement sur le côté. La surveillance de la pression statique donne des informations sur l'aération et un tassement éventuel du tas de foin (fig. 23). L'humidité relative de l'air sortant permet de déterminer grossièrement la teneur en matière sèche.



Fig. 23: Mesure de la pression statique. Une extrémité du tuyau est placée sous la grille de la cellule; 1 mm de colonne d'eau correspond env. à 10 Pa.

D'importants compactages isolés dans le foin et une mauvaise utilisation du déficit de saturation de l'air peuvent cependant fausser les valeurs de séchage (tabl. 3).

Tabl. 3: Estimation du progrès du séchage.

Humidité de l'air sortant [%]	90	80	70	60	50
Matière sèche [%]	68	74	78	82,5	85
Humidité [%]	32	26	22	17,5	15

Modes de fonctionnement

Avec des installations de ventilation à air froid et des capteurs solaires, le ventilateur peut fonctionner par intermittence lorsqu'il pleut. Il faut faire particulièrement attention à l'augmentation de la température du tas de fourrage au-dessus de 35°C. Un net refroidissement de l'air de séchage est toujours le signe que le séchage n'est pas terminé. Si l'humidité relative au-dessus du foin atteint plus de 50 %, notamment après une remise en marche à la suite d'une pause de séchage de 2–3 heures, on peut partir du principe que le fourrage est apte à la conservation. Une semaine plus tard, l'humidité de l'air sortant devrait de nouveau être vérifiée après réenclenchement du ventilateur. Comme différents calculs de coûts (Nydegger et Wirleitner 2014) ont montré que le séchage avec des capteurs solaires était le plus avantageux, les installations devraient être conçues de manière à ce que les capteurs puissent être utilisés sur toute la surface du tas, notamment pour la première coupe. Pour la ventilation et pour les installations à capteurs solaires, il est préférable que toute la surface du tas puisse être approvisionnée et séchée simultanément. En cas de combinaison de capteurs solaires avec des déshumidificateurs, des chauffages à air chaud etc., les tas peuvent aussi être ventilés en alternance. Des clapets permettent de passer des capteurs solaires au déshumidificateur etc. et d'alterner entre les tas.

Règles de base pour le séchage en cellules:

- Surface de ventilation nécessaire, 6–10 m² par unité gros bétail ou 14–24 m² par ha par chargement à sécher
- Résistance à l'écoulement pour l'herbe de prairie: 100–240 Pa/m de hauteur de tas de foin, en fonction de la récolte, du débit volumétrique spécifique et de la longueur de coupe
- Débit volumétrique spécifique (p. ex. 0,11 m³/s*m² de surface ventilée): des valeurs trop élevées entraînent la formation de cheminées et la perte d'air, notamment lorsque la hauteur de remplissage est faible. Des valeurs trop basses se traduisent par une faible puissance. Utiliser éventuellement des convertisseurs de fréquence pour sélectionner le régime du ventilateur en continu.
- Débit volumétrique du ventilateur: typique 11 m³/s (= 39 600 m³/h) par 100 m² de surface ventilée (à mi-hauteur du tas de foin), valeur minimale pour hauteur totale du tas de foin: 0,07 m³/s par m²
- Puissance d'entraînement du ventilateur: 11 kW par 100 m² de surface ventilée ou 0,75 kW par ha de surface de coupe. Puissance calorifique pour le séchage à air chaud: 12,5 kW par m³/s de débit volumétrique du ventilateur et 10 °C de chauffage

Règles de base pour la récupération de la chaleur du toit:

- Surface des capteurs = au moins le double de la surface ventilée
- Puissance utilisable par m² de surface des capteurs pour un rayonnement de 800 W/m², avec capteur découvert environ 200–350 W/m², avec capteur à couverture transparente environ 350–460 W/m²
- Vitesse optimale de l'air dans le capteur 4–6 m/s
- Vitesse de l'air dans les canaux collecteurs, si possible pas plus de 4–5 m/s
- La perte de pression côté aspiration ne devrait si possible pas être inférieure à 100 Pa.

Règles de base pour le séchage avec déshumidificateur:

- Rapport puissance nominale des pompes à chaleur/puissance du ventilateur en cas de fonctionnement à flux principal à partir de 1:1, sinon avec flux secondaire ou air de dérivation à partir de 0,5:1. En cas de fonctionnement durable avec circulation d'air, le rapport recommandé est de 2:1.

Bibliographie

- Baumgartner J., 1992. La ventilation du foin de A à Z. Rapport FAT 406. Agroscope, Ettenhausen.
- Nydegger F., 1992. Capteurs solaires pour le séchage en grange – planification et réalisation. Rapport FAT 407. Agroscope, Ettenhausen.
- Nydegger F., 2010. ART-SOKO – Dimension optimale des capteurs solaires pour le séchage en grange, version 2010 (2.0.1). Agroscope, Ettenhausen.
- Nydegger F. & Wirleitner G., 2014. Vergleich von Kapazität und Kosten verschiedener Unterdachtrocknungsverfahren. 19. Alpenländisches Expertenforum 2014, p. 1–6.
- Van Caenegem L., 2009. Exploitation thermique des installations photovoltaïques intégrées dans la toiture. Rapport ART 709. Agroscope, Ettenhausen.
- Wirleitner G., 2010. Qualitätsheu durch energieeffiziente Technik. 37. Viehwirtschaftliche Fachtagung 2010, Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft, Raumberg-Gumpenstein, p. 71–80.

Impressum

Editeur	Agroscope, Tänikon 1, 8356 Ettenhausen, www.agroscope.ch
Figures	Franz Nydegger (fig. 1, 3, 11), Josef Braun (fig. 13), Gotthard Wirleitner (fig. restantes)
Mise en page et impression	Sonderegger Druck AG, Weinfeldten
Changements d'adresses	Office fédéral des constructions et de la logistique OFCL, e-mail: verkauf.zivil@bbl.admin.ch
Download	www.agroscope.ch/transfer/fr
Copyright	© Agroscope 2015
ISSN	2296-7222 (print), 2296-7230 (online)