

SÉCHAGE DES PPAM ET DU HOUBLON :

DÉFINITIONS, DESCRIPTIONS, ÉTAT DES LIEUX ET PERSPECTIVES D'OPTIMISATION



AU SOMMAIRE

Le Séchage : définitions et principes

Les différents types de séchage

Les sources d'énergie

Les principaux équipements d'un séchoir

Description technico-économique de quelques séchoirs

Quels leviers pour économiser l'énergie ?

Annuaire



INTRODUCTION

Le séchage est une étape incontournable pour de nombreuses filières végétales dont celles des PPAM (plantes à parfum, aromatiques, médicinales) et du houblon. Compte tenu de la hausse des coûts énergétiques, et du contexte de transition énergétique, de développement durable et de protection de l'environnement, l'optimisation de ce processus est devenue un enjeu actuel majeur.

Les professionnels de la filière PPAM ont exprimé le besoin de disposer de « *travaux bibliographiques sur les différentes techniques et modèles de séchage* » pour répondre notamment à ces enjeux d'**optimisation énergétique**.

Une **première étape de bibliographie** semblait donc un préalable indispensable, pour toute éventuelle mise en place d'essais ultérieurs. C'est dans ce contexte que ce guide a été initié.

Les méthodes et outils utilisés pour le séchage sont aujourd'hui très divers et vont du séchoir auto-construit demandant une surveillance accrue au séchoir industriel mécanisé et automatisé. Pour identifier plus précisément les systèmes existants, il semblait également indispensable, en plus de la « bibliographie classique », de réaliser **un état des lieux des pratiques** au sein de la filière. Pour cela, l'iteipmai a réalisé **une enquête auprès des professionnels**.

Le présent guide est donc une synthèse bibliographique, dans laquelle a été intégrée des exemples concrets de système de séchage en place chez des producteurs ayant répondu à l'enquête. Vous y trouverez :

- des notions globales sur le séchage,
- un inventaire des types de séchage, des sources d'énergies envisageables, et des principaux équipements d'un séchoir,
- des éléments de description technico-économique de quelques séchoirs,
- une liste de leviers envisageables pour économiser l'énergie,
- un annuaire répertoriant les structures et experts de la filière travaillant sur cette thématique, les constructeurs et fournisseurs de matériel et de séchoirs,
- la bibliographie,
- une courte synthèse des résultats de l'enquête.

merci !

L'iteipmai et les auteurs de ce guide souhaitent remercier :

- *l'ensemble des adhérents interrogés et des producteurs ayant acceptés de répondre à l'enquête,*
- *les fournisseurs et constructeurs de séchoirs qui se sont rendus disponibles pour répondre aux nombreuses questions,*
- *les référents de la filière PPAM et houblon et les différents instituts techniques pour leur temps et leur expertise qui ont été une aide précieuse dans l'établissement de ce guide,*
- *le financeur de cette étude : FranceAgriMer*

L'iteipmai tient également à remercier tout particulièrement Justine Amary pour son travail conséquent sur ce guide.



LE SÉCHAGE : DÉFINITIONS ET PRINCIPES

OBJECTIFS ET PRINCIPES DU SÉCHAGE

Le séchage est un processus permettant de conserver et stocker des produits végétaux sans que leur qualité ne se dégrade au fil du temps. Il consiste à **extraire**, le plus souvent sous forme de vapeur, **l'eau contenue dans la plante ou la partie de plante récoltée**, évitant ainsi le développement d'une flore microbienne.

L'objectif est de diminuer rapidement la teneur en eau du végétal afin de **préserver ses principes actifs, sa couleur et d'éviter son altération par les microorganismes**. Il doit permettre d'assurer une conservation bactériologique tout en garantissant **une qualité organoleptique** (goût, couleur, composition en arômes et en huile essentielle) et **visuelle**.

Si le séchage permet de **stabiliser la qualité du produit**, il est important après cette étape de veiller aux conditions de stockage des produits afin d'éviter une reprise d'humidité. Les plantes sèches doivent être placées à l'abri de la lumière et des insectes dans un endroit où l'hygrométrie est contrôlée [1-4].

Bien que variable selon les espèces, le **taux d'humidité initial** de la plante se situe généralement entre **75 et 85 %**, pour un **taux d'humidité final** après séchage de **10 à 12 %**. Le fait de réduire le taux d'humidité permet de réduire la disponibilité en eau (appelé Aw) pour les micro-organismes : une teneur en eau de l'ordre de 10 % (correspondant à une Aw de 0,6), empêche le développement de micro-organismes [5].

Il est de manière générale conseillé de ne **pas dépasser une durée de 5 jours** pour faire sécher les produits végétaux (de l'ordre de quelques heures pour le houblon), de les faire sécher **à l'obscurité**, et pour les PPAM à des **températures plutôt basses** (pouvant varier selon l'espèce, l'organe à sécher et le conditionnement). Il est également conseillé de **réduire au maximum la durée entre la récolte et le début du séchage**, afin d'éviter l'entrée en fermentation et le risque de dégradation du produit.

Des **recommandations globales** concernant le séchage doivent être respectées : normes sanitaires, nettoyage des installations entre chaque lot de plantes, contrôles et fichier de suivi, etc. [6].

Il est compliqué de donner un « itinéraire de séchage » précis et optimisé pour une plante donnée car la qualité et l'efficacité du séchage sont soumis à de nombreuses variables :

- **variabilité biologique** du matériel à sécher (organes de la plante à sécher, teneur en eau initiale, sensibilité de certaines molécules à la chaleur, teneur en huile essentielle...),
- **variabilité des conditions climatiques** (humidité relative, température extérieure...) lors de la récolte ou lors de la période de séchage,
- **variabilité des systèmes de production** en termes d'itinéraires techniques et en termes de volumes de production à sécher,
- **variabilité physique des outils de séchage** (débit d'air, transfert d'énergie...).



COMPRÉHENSION DU PROCESSUS DE SÉCHAGE

Afin de comprendre le fonctionnement du séchage deux paramètres physiques sont importants à retenir [7, 8]:

- **L'humidité relative** : c'est la pression de vapeur d'eau contenue dans l'air par rapport à la pression de vapeur saturante mesurée à la même température : cela correspond au pourcentage d'eau contenu dans 1m³ d'air par rapport au maximum qu'il pourrait contenir à la même température. Autrement dit, l'humidité relative caractérise le degré de saturation de l'air en eau ou encore **la capacité de l'air à contenir de la vapeur d'eau**. Cette capacité augmente avec la température : en chauffant l'air, on augmente donc sa capacité à absorber l'eau des végétaux.
- **Le pouvoir évaporatoire** de l'air : il caractérise la capacité de l'air à sécher les plantes.

On comprend donc à l'aide de ces deux paramètres, que pour optimiser le processus de séchage, **l'air doit être initialement sec** pour pouvoir se charger de l'eau des végétaux à sécher. L'air peut être [1, 8] :

- Utilisé « **tel quel** » pour sécher naturellement les plantes (envisageable uniquement lorsqu'il s'agit de petites quantités à sécher et que les conditions extérieures sont favorables),
- **Chauffé** : l'humidité relative de l'air diminue et son **pouvoir évaporatoire augmente**. L'air chauffé fournit également **de l'énergie** nécessaire à l'évaporation de l'eau, par un transfert d'énergie
- **Déshumidifié** : une partie de la vapeur d'eau contenue dans l'air est évacuée.

Lors du séchage d'un produit végétal, l'eau migre des cellules vers la surface de la plante jusqu'à être évaporée. On peut distinguer trois phases [1, 7]:

- la **mise en température** : la plante atteint la température du séchoir,
- une **phase d'évaporation rapide** : l'évacuation de l'eau est plus facile au début du séchage lorsqu'il y a beaucoup d'eau disponible (eau libre, facile à évaporer)
- et enfin une **phase d'évaporation lente** : l'eau est liée et des forces superficielles la retiennent davantage (elle est donc plus difficile à évaporer) ; il faut alors d'avantage d'énergie pour sécher la plante – souvent sous forme de chaleur ou grâce au renouvellement de l'air.

PARTICULARITÉS POUR LE SÉCHAGE DES PPAM

La complexité du séchage dans la filière PPAM réside dans **la diversité des produits : multiples espèces, différents organes** parfois même au sein d'une même espèce, et **sensibilités différentes vis-à-vis de la chaleur** au cours du cycle de séchage. Il est donc difficile de s'accorder autour de valeurs de référence ou de conditions de séchage, les plantes ne contenant pas la même quantité d'eau initiale et n'ayant pas le même ratio d'évaporation.

Il existe tout de même des **exigences concernant la teneur des plantes en huile essentielle et en eau**, selon les débouchés, répertoriés par la **pharmacopée européenne**, dans les normes AFNOR ou par le **cahier des charges de l'acheteur** (Sylvain PERROT : comm. pers.). Des recommandations concernant les paramètres de séchage peuvent également être consultées dans les documents référencés en bibliographie

Globalement, il est **conseillé de sécher les PPAM à basse température entre 30 et 45°C**, un chauffage excessif pouvant altérer les molécules d'intérêt de la plante. Pour les plantes à huile essentielle, il faudrait que la température ne dépasse pas 35°C. Ces valeurs restent toutefois indicatives : il est possible d'adapter le séchage au cas par cas en fonction des conditions climatiques, de la plante, de l'organe à sécher, etc. [4, 6]



PARTICULARITÉS POUR LE SÉCHAGE DU HOUBLON



Le houblon est une plante pérenne dont on récolte les fleurs femelles (nommées cônes en raison de leur forme) et dont le principal débouché est la fabrication de la bière. Les cônes doivent être séchés après récolte afin de préserver **leurs composés aromatiques et amérisants** et afin de garantir la qualité du produit fini.

Le taux d'humidité des cônes après séchage peut avoir un impact fort sur la qualité du houblon brassicole. S'il est **trop humide, il y a un risque d'oxydation et d'apparition de moisissures**. S'il est **trop sec, sa qualité et sa valeur brassicole diminuent** par la perte des composés d'intérêt apportant l'arôme à la bière (comme le myrcène par exemple).

Généralement, les cônes de houblon sont séchés entre 40 et 60°C pendant 6 à 8 heures, pour un objectif **de 8 à 12% d'humidité** après séchage afin d'être certifié. Pour ne pas dégrader ces composés, ni la qualité visuelle des cônes, le séchage doit se faire à **une température n'excédant pas les 60°C à l'intérieur du cône** de houblon. De manière générale, plus le houblon est séché à basse température, plus les composés aromatiques peuvent être préservés. Mais si la température de séchage est trop basse, le taux d'humidité optimal des cônes séchés sera difficile à atteindre.

Il existe deux types de houblon : **le houblon aromatique et le houblon amérisant**. Pour chacun d'entre eux, des plages de température de séchage peuvent être distinguées :

- Le **houblon aromatique est idéalement séché entre 40 et 45°C**.
- Alors que le **houblon amérisant peut être séché jusqu'à 60°C**.

En pratique, ces températures ne sont pas forcément respectées mais sont plutôt adaptées en fonction de la taille et de l'aspect des cônes, de la variété du houblon à sécher, de son humidité initiale, des conditions météorologiques et de la disponibilité du séchoir [9–13].

L'AUTO-CONSTRUCTION D'UN SÉCHOIR

L'auto-construction présente l'avantage de pouvoir être totalement **adaptée au volume de production et aux objectifs** souhaités par l'agriculteur. Elle peut s'avérer également économique, l'investissement étant souvent moins lourd que pour l'achat d'un séchoir.

Pour envisager l'auto-construction du séchoir, il faut prêter attention **au choix des matériaux et au dimensionnement**. Les matériaux doivent être non polluants, non contaminants, pour les produits séchés. **Le dimensionnement du séchoir quant à lui est dépendant de la quantité et du volume de plantes à sécher** (dans un temps limité), de la température, de la capacité d'absorption de l'eau, etc. Il peut être nécessaire d'établir un calendrier de récolte afin de ne pas surdimensionner son séchoir (et donc consommer moins d'énergie). Il faut donc réfléchir au débit d'air nécessaire et à la puissance des équipements afin de dimensionner le séchoir et sa capacité de séchage en adéquation avec les objectifs de production. Au-delà du dimensionnement du séchoir, il faut également penser à son entretien ainsi qu'au stockage des productions après séchage [1, 3, 7, 14].



LES DIFFÉRENTS TYPES DE SÉCHAGE

SÉCHAGE PAR FLUX D'AIR

Le principe de ce type de séchage est simple : un **flux d'air** traverse les plantes pour permettre leur séchage, en **se chargeant de leur humidité**.

Séchage par convection naturelle ou forcée

Le **système de circulation de l'air par convection** est le plus rencontré pour le séchage des PPAM. La convection de l'air est un **phénomène naturel** : l'air **chaud monte naturellement** tandis que l'air froid, lui, descend. Cette **convection peut être naturelle** ou **forcée**.

- Lorsqu'une source chaude est placée en dessous du végétal, la convection naturelle peut être suffisante pour le sécher. Le séchage naturel est toutefois considéré comme étant adapté à **de petits volumes de production** et est fortement **dépendant des conditions météorologiques**.
- Si la circulation naturelle de l'air est insuffisante, il est possible d'appliquer une circulation forcée de l'air grâce à un ventilateur. **La convection forcée correspond donc à un flux d'air généré par un ventilateur** (le flux d'air est « poussé » pour passer à travers les couches de plantes disposées dans le séchoir). La ventilation permet **de renouveler l'air en permanence**, afin qu'un air suffisamment sec puisse toujours traverser le végétal [3, 8, 10].

La circulation de l'air en circuit ouvert ou fermé

Le séchage par convection peut se faire en circuit ouvert ou fermé.

- Dans un circuit **ouvert**, l'air humide, saturé en eau, est directement **évacué vers l'extérieur**.
- Dans un circuit **fermé**, l'air humide n'est pas évacué. Il est **réutilisé** le plus souvent au moyen d'un **déshumidificateur** qui réduit la teneur en eau de l'air et assure un taux d'humidité suffisamment bas pour la poursuite du séchage [2, 10].

Tableau récapitulatif des caractéristiques des flux d'air pouvant être utilisés pour le séchage

	Type de convection		Circuit de l'air	
	Naturelle	Forcée	Ouvert	Fermé
Description	Phénomène physique de circulation de l'air	Flux d'air généré par un ventilateur	Circulation de l'air s'échappant vers l'extérieur	Circulation de l'air en circuit fermé (déshumidificateur)
Avantages	Adapté à de petits volumes à sécher	Renouvellement de l'air permettant l'efficacité du séchage	Évacuation de l'air humide	Recyclage de l'air chaud Possible réduction de la ventilation (grâce à l'utilisation du débit du déshumidificateur)
Inconvénients	Pas possible dans tous les séchoirs Fortement dépendant des conditions climatiques	Utilisation d'un ventilateur et coût énergétique associé	Pertes d'énergie si l'air est chauffé	Limité aux petites installations



SÉCHAGE PAR MICRO-ONDES

Le principe du séchage par micro-ondes est de **générer de la chaleur à l'intérieur du produit** à sécher grâce à des micro-ondes ou hyperfréquences. La plante, étant une substance non conductrice d'électricité, s'échauffe sous l'action d'un **champ électrique** alternatif. Un mouvement moléculaire est créé dans ce champ, ce qui permet un chauffage par génération interne de chaleur.

Cette méthode est surtout avantageuse pour des **processus industriels** et représente un coût **d'investissement élevé** [8].

Cette méthode ne peut par exemple pas être utilisée pour sécher du houblon : les micro-ondes entraînent **des modifications de la couleur** ainsi que **des pertes en huile essentielle** du produit final. Elle peut cependant l'être pour l'extraction des huiles essentielles [15].

LYOPHILISATION

La lyophilisation est un séchage artificiel demandant un **investissement conséquent** et est donc plutôt réservée à **une utilisation industrielle** également. Ce séchage fonctionne selon un principe de **sublimation à basse température**. La sublimation est un phénomène physique : c'est un changement d'état de l'eau qui passe directement **de l'état solide à l'état gazeux** dans des conditions de pression et de température données. L'objectif de la lyophilisation, opération extrêmement complexe et technique, est d'extraire l'eau sans déformer les cellules de la plante.

L'avantage de cette technique est **la qualité** des produits obtenus par lyophilisation (aspect, réhydratabilité, conservation). Mais ce procédé est **coûteux** en énergie et en équipements (lyophilisateur discontinu, composé principalement d'une pompe à vide, d'un piège à glace, d'une ventilation et de plaques chauffantes) [8].

ZÉODRATATION

La **zéodratation** par confinement repose sur le principe d'une déshydratation du produit **grâce à une argile** : la zéolite. **La zéolite capte l'eau**, grâce à ses pores, mais ne dégrade pas les composés de la plante ce qui permet d'assurer la qualité organoleptique du produit (Dominique BOUTAUD : comm. pers.).

Les avantages de cette technique sont économiques : le cycle de séchage est plutôt rapide, et la **consommation d'énergie faible**. D'un point de vue écologique, il faut noter l'absence de fluides frigorigènes ou autres polluants. La zéolite peut être utilisée pour plusieurs cycles de séchage car elle peut être régénérée en la chauffant, ce qui permet d'évacuer l'eau précédemment adsorbée.

Cette technique est un processus industriel de pointe, peu développé, utilisé surtout en industrie cosmétique, pharmaceutique et chimique ainsi que dans le domaine médical et de la recherche, et qui demande un très lourd investissement (700 000 € de licence pour une installation canadienne Zeodryplus). En termes de consommation, la zéodratation est moins énergivore que la lyophilisation [10, 16, 17].



LES SOURCES D'ÉNERGIE

Le séchage requiert **un apport d'énergie** (**thermique** pour le chauffage de l'air ou **électrique** pour l'alimentation des ventilateurs permettant la circulation de l'air).

Différentes sources d'énergie sont envisageables produisant soit de la chaleur, soit de l'électricité.

Une source d'énergie peut toutefois produire les deux : c'est ce que l'on appelle la cogénération. Une unique **source d'énergie** produit **simultanément de l'électricité et de la chaleur** [18]. Par exemple, le biogaz et le thermo-voltaïque sont deux sources d'énergie de cogénération.

LES ÉNERGIES FOSSILES : GAZ ET FIOUL

Le fioul et le gaz sont des énergies fossiles et sont donc épuisables. Elles sont encore majoritairement utilisées parce qu'elles demandent peu d'investissements de départ et que les équipements existants fonctionnent avec ce type d'énergie. Elles sont donc un combustible fréquent des éléments thermiques (chaudières, brûleurs) des séchoirs [8].

L'utilisation des énergies fossiles pose question à plusieurs niveaux [7, 19, 20] :

- **ECONOMIQUE** : Le prix des énergies fossiles est volatil et en hausse ces dernières années, augmentant le coût du processus de chauffage.
- **ENVIRONNEMENTAL** : Les énergies fossiles sont non renouvelables, et leur combustion dégage du CO₂. Leur utilisation est réglementée en France, et elles sont amenées à progressivement disparaître au profit de sources d'énergies renouvelables, comme évoqué par la loi énergie-climat.
- **QUALITATIF** : Les fumées de combustion des systèmes de chauffage au fioul peuvent entraîner **une dégradation de la qualité de la plante** : il ne faut pas qu'elles entrent en contact avec le végétal.

L'ÉLECTRICITÉ

Au cours du séchage, l'électricité est surtout utilisée pour alimenter des équipements tels que le **ventilateur** ou le **déshumidificateur**. L'électricité peut être générée de multiples manières, **à partir d'une autre source d'énergie**. Elle peut par exemple être produite sur place dans le cas de certains séchoirs équipés de panneaux photovoltaïques.

L'ÉNERGIE SOLAIRE

L'énergie solaire est une source d'énergie **« gratuite » et respectueuse de l'environnement**, mais dont la puissance est **dépendante des conditions extérieures**. On ne peut capter au maximum que 50 % de l'énergie provenant du rayonnement solaire. Pour pallier des variations trop importantes de la puissance de l'énergie solaire, il peut être envisagé d'utiliser une autre **source d'énergie en complément** pour le séchage (électricité...) [8].



LE PHOTOVOLTAÏQUE ET LE THERMO-VOLTAÏQUE

Le photovoltaïque est une **énergie renouvelable** obtenue par la **conversion de l'énergie solaire** en **énergie électrique**. En général, cette conversion est réalisée par des cellules photovoltaïques situées au sein d'un **panneau photovoltaïque**. La quantité d'énergie produite est alors variable et dépend de l'ensoleillement, de la puissance du panneau photovoltaïque et de sa capacité à transformer le rayonnement solaire. Les panneaux photovoltaïques peuvent être disposés sur le toit, une terrasse, ou encore au sol [21].



Un exemple de système de séchage en grange, à partir d'énergie photovoltaïque, est donné dans un document publié sur le site de l'IDELE, institut de l'élevage. Le bâtiment photovoltaïque permet non seulement la production d'électricité mais également la récupération de chaleur sous le toit. Les unités de séchage disposées dans la grange sont équipées de ventilateurs régulés automatiquement en fonction de l'hygrométrie détectée par les sondes. Le document recommande de prévoir 3 m² de toit par m² de séchage et de prêter attention à l'orientation du panneau par rapport au soleil [22].

À la différence de l'énergie photovoltaïque, **l'énergie thermo-voltaïque** correspond à une production à la fois **de chaleur et d'électricité**. Le thermo-voltaïque consiste à utiliser le rayonnement solaire pour produire de l'électricité grâce aux panneaux solaires mais également à récupérer la chaleur produite par les cellules photovoltaïques.

Certains séchoirs associés à des panneaux solaires thermo-voltaïques utilisent cette énergie pour réchauffer l'air **de 5 à 15°C environ**. Ainsi, **la chaleur** est directement **utilisée pour le séchage** alors que **l'électricité** produite, elle, peut être **revendue**. Cette source d'énergie est utilisée pour du séchage en grange de fourrages le plus souvent [23, 24].

LA BIOMASSE

La biomasse est une **source d'énergie renouvelable** pouvant être utilisée pour **produire de la chaleur**. Le plus souvent on utilise **le bois** ou **un résidu organique** (paille, tourteaux, grignons). La biomasse est souvent produite localement, ou même directement sur l'exploitation. Elle peut permettre la revalorisation de certains résidus organiques.

Bien que le bois soit une source d'énergie renouvelable, sa combustion donne lieu à des dégagements de CO₂, de monoxyde de carbone, de particules fines et autres polluants. Les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) lors de la combustion sont malgré tout compensées par le CO₂ ayant été absorbé au cours de la vie de l'arbre utilisé pour produire la biomasse. Ainsi, le bilan carbone du chauffage au bois reste meilleur que celui d'un chauffage au fioul ou à l'électricité par exemple.

D'un point de vue économique, l'utilisation de la biomasse réduit les coûts liés à l'énergie (le bois est moins onéreux que le gaz ou l'électricité) mais nécessite un investissement initial dans **une chaudière à biomasse**. Son prix varie entre 3 000€ et 20 000€ en moyenne [8, 11, 25].

Il y a deux inconvénients majeurs à l'utilisation d'une chaudière à biomasse [11] :

- le **besoin en main d'œuvre** : elle doit être approvisionnée régulièrement pendant toute la durée du séchage.
- elle ne permet pas de chauffer à plus **de 45 °C**, ce qui peut convenir au séchage des PPAM mais qui est une température plutôt faible pour le séchage du houblon (cela impliquerait donc de rallonger la durée du cycle).



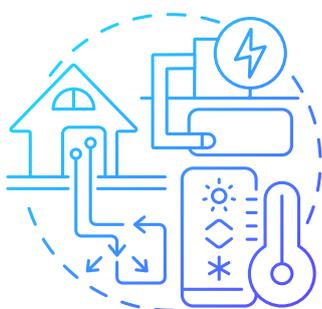
LE BIOGAZ ET LA MÉTHANISATION



Le biogaz est produit par le **processus de méthanisation** à partir de **matière organique**. La transformation de cette matière organique se fait **en absence d'oxygène** sous l'action de **micro-organismes** dans un digesteur. Il en résulte un gaz énergétique : **le biogaz** ainsi qu'un digestat pouvant être utilisé comme fertilisant. Le biogaz est une énergie pouvant être convertie **entièrement en électricité** ou encore **en électricité et chaleur** (cogénération).

Sur une exploitation, la méthanisation a pour avantage de valoriser les effluents d'élevage. La chaleur récupérée peut servir à chauffer une installation de séchage, comme c'est le cas pour le séchage des prunes dans une coopérative du Lot-et-Garonne. Le biogaz issu de la méthanisation est aussi utilisé pour le séchage fourrager, de céréales ou de bois. L'installation d'une unité de méthanisation représente toutefois un lourd investissement [9, 26, 27].

L'ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE



L'énergie géothermique provient de la **chaleur terrestre**. Cette chaleur est extraite en profondeur grâce à de l'eau qui est réchauffée **au contact des roches** et qui est acheminée jusqu'à la surface.

Dans le domaine du séchage, l'énergie géothermique et plus précisément la chaleur qui en résulte est principalement utilisée pour sécher des fruits et des légumes [28, 29].

LES PRINCIPAUX ÉQUIPEMENTS D'UN SÉCHOIR

LES ENCEINTES DE SÉCHAGE : ARMOIRES OU CAISSONS

L'enceinte de séchage est le plus communément **soit une armoire** dans laquelle il est possible de disposer les claies **soit un caisson**. Ces deux enceintes peuvent être de différents matériaux, mais le plus souvent les armoires sont **en bois** et les caissons en bois ou en parpaing. Les séchoirs auto-construits peuvent aussi être fabriqués en OSB, parquet, lambris, panneaux de bois. L'important est que le bois soit non traité, non brut, qu'il ne travaille pas dans **des conditions d'humidité et de chaleur** et que l'enceinte soit isolée. Également, pour faciliter l'utilisation du séchoir, un système de trappes entre plusieurs caissons ou armoires peut permettre **une flexibilité d'utilisation** en fonction de la quantité à sécher. D'après les données recueillies par l'enquête, les armoires sont principalement auto-construites en bois non traité et les caissons en bois ou OSB sans formaldéhyde [1, 2].

La **mobilité du séchoir** peut être un paramètre important pour certains producteurs, ou encore pour ceux pratiquant la cueillette.

Le séchoir mobile peut alors être : un petit séchoir **facilement déplaçable** ou une **benne séchante**. Le mini séchoir mobile est facilement transportable et automatisé. Une benne séchante peut également être utilisée et déplacée. Elle présente l'avantage de pouvoir être utilisée en dehors du séchage, pour la récolte par exemple [30].



LES SUPPORTS DE SÉCHAGE

Séchage sur claies – couches minces

Les claies sont des « grilles » sur lesquelles sont déposées des couches minces de plantes et à travers lesquelles l'air circule. Les claies sont souvent **auto-construites, en bois**.

La grille au contact du végétal peut être de plusieurs matières différentes mais elle doit être **facilement lavable et classée alimentaire**. Des **grilles en inox**, des **moustiquaires en nylon alimentaire**, des **stores à fromage** ou des **toiles à beurre** sont par exemple adaptées. La dimension des claies est assez variable mais elle est le plus souvent **d'environ 1m²** (0.8 x 1.2m), ce qui permet de les manipuler assez facilement.



Pour établir le nombre de claies nécessaire, il est conseillé d'identifier les besoins en termes de séchage en fonction du calendrier de récolte et du pic d'utilisation du séchoir. Le nombre de claies correspond ensuite approximativement à **1 m² de claie pour 1 kg de plante fraîche**. Autre méthode de calcul : la surface de claies correspond à environ 1 % de la surface cultivée (par exemple, pour 1 000 m² de culture, il faut prévoir environ 10 m² de claies). Il est recommandé toutefois de garder une marge de sécurité après calcul des besoins [2, 7, 31].

Dans le tableau suivant sont répertoriés quelques couvertures pouvant être utilisées pour la fabrication de claies de séchage. Il est recommandé de se renseigner auprès des constructeurs pour des demandes précises afin de s'assurer de la compatibilité de l'équipement avec l'usage envisagé.

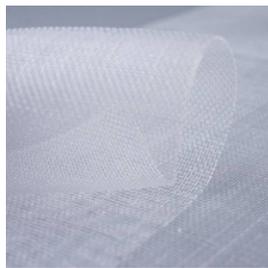
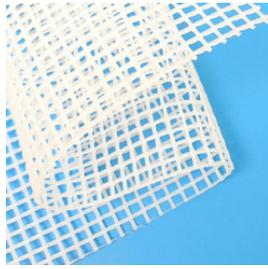
Equipement	Modèle	Fabricant	Lien internet	Caractéristiques
	Tissu 100% PEHD traité anti-UV PE 22.30	DIATEX	https://agro.diatex.com/fr/	Compatible usage alimentaire Perméable à l'air Anti-insectes
	Store PEHD	SOGEBUL	https://sogebul.fr	Supporte la chaleur jusqu'à 50°C Pas de protection UV

Tableau construit d'après les données des constructeurs Diatex et Sogebul



Séchage sur caillebotis – couches épaisses

Le séchoir **en couche épaisse** est généralement composé d'une grande **enceinte couverte d'un caillebotis** (le plus souvent une grille en acier inoxydable permettant une circulation de l'air satisfaisante) Les grilles doivent se trouver à minimum 40 - 60 cm du sol et peuvent être recouvertes d'un filet alimentaire si nécessaire. Cette installation est adaptée à **d'importants volumes de production** : les plantes y sont séchées en couches épaisses comprises **entre 20 et 150 cm selon l'espèce** [1, 32].

Afin que le séchage soit homogène et de bonne qualité sur ces hauteurs de plantes, il faut obligatoirement **les brasser régulièrement au cours du séchage**. Il faut également apporter **un fort débit d'air** grâce à des ventilateurs qui font remonter le flux d'air sec du bas vers le haut du séchoir. L'air traversant la couche de plantes en ressort humide. La ventilation peut être associée à un réchauffage de l'air ou non, selon les plantes et selon les conditions extérieures [2, 4, 7, 8].

Afin de mieux contrôler le processus, il est parfois conseillé, pour certaines espèces comme le houblon, de diminuer l'épaisseur du végétal disposé dans le séchoir [33]. Plus la couche de plante à sécher est importante, plus le séchage sera long, plus le coût énergétique sera élevé.

Comparaison des systèmes en couches épaisses et minces

Les principaux avantages et inconvénients de chacun des systèmes sont synthétisés dans le tableau ci-dessous [1, 7].

	Séchage en couche épaisse (sur caillebotis)	Séchage en couche mince (sur claies)
AVANTAGES	<ul style="list-style-type: none">• Adapté pour de grands volumes de production, produits volumineux et lourds (thym, racines...)• Traitement de grandes quantités de plantes en même temps• Contraintes de manutention moins importantes que pour des claies	<ul style="list-style-type: none">• Adapté pour de petites quantités de production, produits fragiles ou à forte valeur ajoutée• Adapté pour sécher plusieurs espèces différentes en même temps (mais potentiellement des contraintes d'incompatibilités de certains produits)• Souplesse d'utilisation grâce à la manipulation individuelle des claies facilitée par leur faible poids
INCONVÉNIENTS	<ul style="list-style-type: none">• Nécessite un brassage régulier des plantes• Fumées de combustion (selon la source d'énergie utilisée)• En général, plus consommateur d'énergie qu'un système à claies	<ul style="list-style-type: none">• Contraintes de manutention des claies, nécessite beaucoup de main-d'œuvre• Importance de l'homogénéité de chargement (ne pas surcharger les claies et bien répartir les végétaux sur les claies pour ne pas perturber le flux d'air)

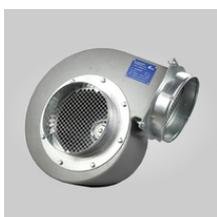


LE VENTILATEUR

L'utilisation d'un ventilateur est recommandée, quelle que soit la technique de séchage choisie. Ce dernier sert à faire circuler l'air au sein du système de séchage et à **renouveler l'air** qui, progressivement, se charge en eau. Il fournit également une certaine pression, les obstacles au flux d'air entraînant des pertes de charge. Les ventilateurs fonctionnent à **l'électricité**. Ils peuvent être utilisés seuls ou couplés à un système de chauffage ou de déshumidification.

Le dimensionnement du ventilateur est important. Si la pression fournie est trop faible, la capacité de séchage ne sera pas suffisante. A l'inverse, si la pression fournie est trop importante, elle entraînera une **surconsommation d'électricité** et donc une augmentation du coût du séchage. Le choix du ventilateur doit donc s'effectuer en fonction du **séchoir considéré** [2, 34].

Il existe deux grands types de ventilateurs : centrifuges ou hélicoïdaux [2] :



AEIB Ventilateurs

- Le **ventilateur centrifuge** fonctionne à **faible débit et forte pression**. Il est plus cher et volumineux, et convient plutôt aux systèmes **en couches épaisses** sur caillebotis.



- Le **ventilateur hélicoïdal**, lui, est plus souvent utilisé dans les systèmes **à claies** : il a une vitesse plus élevée mais une pression plus basse qu'un ventilateur centrifuge.

Tableau de quelques données caractéristiques sur la ventilation [10, 34]

Capacité du ventilateur	1000 m ³ /h/m ² pour un séchoir de 15m ³
Pression	25 – 50 mmCE
Débit	300 – 1000 m ³ /h/m ²
Prix	Environ 1 000 € pour 20 – 30 m ² de séchoir Entre 2 000 et 4 000€

LE DÉSHUMIDIFICATEUR

Le séchage par déshumidification est un **séchage qualitatif** de la plante car il permet de mieux conserver ses propriétés. Il permet de **réduire le taux d'humidité relative** de l'air et de maintenir un air suffisamment sec pendant toute la durée du séchage. Le fonctionnement du déshumidificateur repose sur **la condensation de la vapeur d'eau** contenue dans l'air sur l'évaporateur. L'air déshumidifié (et refroidi) est ensuite **réchauffé par un condenseur** et de nouveau soufflé par un ventilateur sur les plantes. Le déshumidificateur est utilisé le plus souvent dans **une enceinte fermée**, et fonctionne avec une source d'**énergie électrique**.

Un déshumidificateur maintient une **humidité relative comprise entre 15 et 30 %** selon les modèles et les réglages. La capacité de déshumidification de l'air est dépendante de la puissance du déshumidificateur (compresseur, condenseur, ventilateur). Le prix à l'achat est lui-même très dépendant de la puissance du système de déshumidification pouvant facilement varier de 100 à 5 000 €. Le déshumidificateur a une durée de vie d'approximativement 10 ans. Il est conseillé de ne pas dépasser une certaine température (variable selon les modèles) au-dessus de laquelle le déshumidificateur ne peut plus fonctionner et entre en surchauffe car il n'est plus capable d'amener l'air à son point de rosée. Idéalement, il faut garder autant que possible une plage de températures pour lesquelles le déshumidificateur a un **rendement satisfaisant**. Le principe de séchage par déshumidification est de manière générale adapté à **de petits volumes** de production, **à forte valeur ajoutée** [1, 2, 35].

Utiliser la déshumidification plutôt qu'un système de chauffage de l'air présente deux avantages [7, 33] :

- Il n'y a pas besoin d'un **temps de refroidissement** à la fin du processus de séchage. Lorsque le végétal est chauffé à l'inverse, le ventilateur est laissé en fonctionnement après le séchage afin de refroidir le matériel végétal,
- Lorsqu'un déshumidificateur est utilisé au sein de l'enceinte de séchage, le **débit du ventilateur peut être réduit**. Il est même conseillé de calculer le débit du ventilateur en fonction de celui du déshumidificateur.

Le **dimensionnement** et le choix du déshumidificateur se fait encore une fois en fonction de la capacité de séchage recherchée, de la vitesse de séchage et de l'investissement. La capacité de déshumidification est souvent indiquée en L/24h. Il est recommandé que celle-ci soit de l'ordre de **1L/24h pour 1m² de claies** [32, 34].

Equipement	Modèle	Fabricant	Utilisation	Lien internet	Caractéristiques
	Déshumidificateur 380 ECO	TROTEC	Déshumidificateur pour les opérations de séchage Peut fonctionner en mode automatique	www.trotec24.com	Sélection d'une valeur d'humidité (30 % ± 10%, 35% ± 5%) selon modèle Fonctionnement optimal : 5 à 32°C Débit d'air maximum : 950 m ³ /h Capacité maximale de déshumidification : 80 L/24h De 199.99 à 1 194.99 € selon modèle
	Déshumidificateur professionnel mobile 3600N	REXAIR	Déshumidification de l'air et contrôle de l'humidité Hygrostat pour la mise en marche	www.rexair.fr	Débit d'air maximum : 510 m ³ /h Capacité maximale de déshumidification : 27,2 L/24h De 888 € à 1 056 € selon modèle
	Déshumidificateur TTK25E	NEVO	Déshumidification de pièces de 10 à 50m ²	https://nevo.fr	Plage hygrométrique : 30-80 % d'humidité relative Fonctionnement optimal : 5 à 32°C Débit d'air maximum : 50 m ³ /h Capacité maximale de déshumidification : 20 L/24h

Tableau construit d'après les données des constructeurs Trotec, Rexair et Nevo

LE SYSTÈME DE CHAUFFAGE

L'objectif du système de chauffage, quelle que soit sa source d'énergie, est de **réchauffer l'air**, permettant d'augmenter son pouvoir évaporatoire et ainsi de réduire la durée du séchage. Le pouvoir évaporatoire de l'air augmente de 0,25 g/m³ lorsque l'air est réchauffé de 1°C.

Le réchauffage de l'air peut aussi intervenir **de manière occasionnelle** : il peut être déclenché seulement en fin de séchage, lorsque l'eau devient plus difficile à évaporer, ou lorsque les conditions climatiques l'exigent en cas d'humidité relative de l'air ambiant élevée [2, 32].

Chaudières

En général, les combustibles utilisés sont **le gaz, le fioul et le bois**, alimentant des chaudières. Les brûleurs sont de moins en moins utilisés du fait des risques d'incendies qu'ils présentent, du risque de contamination des plantes par les co-produits de combustion et de leur consommation en énergie fossile non renouvelable.

Les recommandations concernant la puissance du système de chauffage sont de 1 kW pour 30 kg de chargement. Un réchauffeur à gaz coûte environ 3 000 euros [2, 10].

Pompe à chaleur

On peut également réchauffer l'air avec une pompe à chaleur (PAC). Ce système de chauffage consiste à utiliser de **l'air extérieur plus sec** et à le réchauffer au moyen d'un condenseur (ou à capter la chaleur du sol avec la géothermie). Un fluide frigorigène placé à l'intérieur est comprimé et change d'état, ce qui permet une restitution de chaleur. Ce système est **plus écologique** qu'un chauffage au fioul ou au gaz.

La pompe à chaleur peut intervenir de deux façons différentes pour le séchage :

- Soit elle permet de directement **chauffer l'air** entrant dans le séchoir,
- Soit elle fonctionne comme **un déshumidificateur en recyclant l'air** du séchoir. Dans ce cas, l'air sortant est condensé au contact d'une surface froide puis réchauffé au sein de la PAC avant d'être réutilisé [8].



DESCRIPTION TECHNICO-ÉCONOMIQUE DE QUELQUES SÉCHOIRS

La bibliographie étudiée pour la rédaction de ce guide, ainsi que les réponses apportées par les producteurs lors de l'enquête réalisée entre avril et août 2024 ont permis d'étudier différents types de séchoirs, et de recenser leur principales caractéristiques technico-économiques, reprises sous forme de tableau.

Sont d'abord recensés quelques séchoirs dans lesquels l'air circule en circuit ouvert, puis quelques séchoirs dans lesquels le circuit de l'air est fermé.

SÉCHOIRS À CIRCULATION DE L'AIR EN CIRCUIT OUVERT

Séchoir type caillebotis (une seule couche épaisse)

Paramètres techniques du séchoir				
	D'après la bibliographie [32, 34, 36]	Enquête n° 1	Enquête n° 2	Enquête n° 3
Particularité du système		Auto-construction		
Type d'énergie	Souvent gaz (ou fioul), Electricité (ventilateur), Solaire ou biomasse	Gaz, électricité	Gaz	Gaz
Fonctionnement global du système	Grande surface de séchage sur caillebotis avec air chauffé et ventilé			
Circulation de l'air	En système ouvert	En système fermé	En système fermé	En système ouvert
Surface de séchage	Grande surface comprise entre 20 et 80 m ² en moyenne	Caisson de 120 m ²	200 m ²	120 m ²
Capacité maximale du séchoir			Dépendante de la hauteur de plantes (jusqu'à 40 kg de frais par m ²)	70 m ³
Température maximale du séchoir	30-50°C	20 - 25°C	35 - 40°C	40°C
Besoin en manutention	Brassages réguliers des plantes		Brassage des plantes, peu de main d'œuvre	Peu de manutention
Présence de la mesure du taux d'humidité		Oui, automatisée via des sondes	Oui, automatisée	Non
Débit d'air maximal	Entre 8 000 et 15 000 m ³ /h pour 15 à 30 m ²			Ne sait pas
Présence d'un variateur de débit	Conseillée			Oui, 3 vitesses de variation : petit, moyen, fort
Renouvellement/recyclage de l'air	Non	Oui	Oui, réutilisation partielle	Non
Mobilité du séchoir	Non			
Assistance informatique	Non	Oui		Non
Caractéristiques économiques				
Consommation moyenne d'énergie	De 0,15 à 1,7 L de fioul / kg sec	0,43 €/kg de plantes sèches (approximé)	0,8 kg de gaz / kg de plantes sèches	De 0,70 à 2,70 €/kg sec (selon l'organe à sécher, préfanage réalisé)
	De 0,5 à 1,12 kg de gaz / kg sec			
Coût pour 1kg de plante sèche	De 0,17 à 2,04 € (fioul) (calculé)	0,43 €/kg de plantes sèches (approximé)	0,5 €/kg de plantes sèches	De 0,70 à 2,70 €/kg sec (selon l'organe à sécher, préfanage réalisé)
	De 0,57 à 1,45 € (gaz) (calculé)			
Coût de construction du séchoir	Entre 2 000 et 12 000€ selon la surface du séchoir			



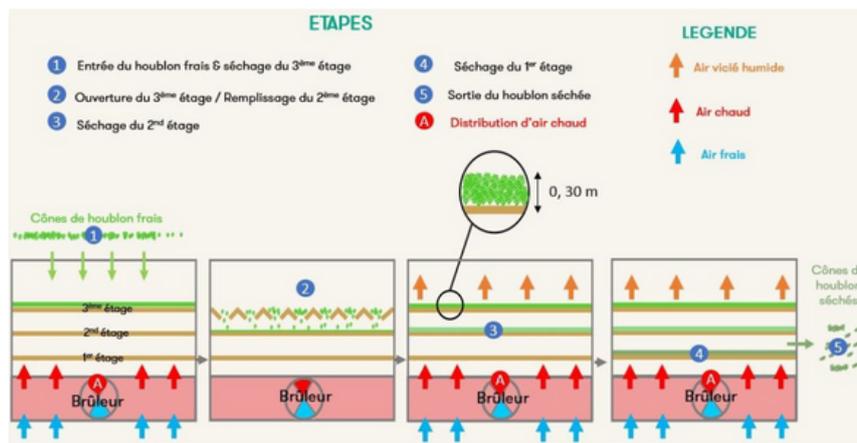
Le séchoir en "batch" du houblon

Le séchage en batch est assez **simple** et **peu coûteux**. Le houblon est disposé en couche épaisse (de 50 cm à 1 m) et un **air réchauffé** (souvent par un brûleur) passe à travers cette couche séchant le végétal. La source d'énergie est alors souvent le fioul ou le gaz. Un des principaux inconvénients de cette technique est l'hétérogénéité du taux d'humidité entre le dessus et le dessous du tas, il est ainsi difficile de déterminer quand le séchage est terminé pour l'ensemble du chargement. Il faut donc que le houblon soit retourné plusieurs fois pour permettre un séchage plus homogène [11, 12, 37].

Caractéristiques techniques			
	D'après la bibliographie		Enquête n° 3
Type d'énergie	Fioul (principalement)	Gaz	Gaz
Fonctionnement global du système	Séchage en batch du houblon		
Circulation de l'air	En système ouvert		
Surface de séchage			
Capacité maximale du séchoir		360 kg frais en 10h	360 kg de matière sèche / batch
Température maximale du séchoir	50 - 63°C		55°C
Besoin en manutention		Égalisation (toutes les 2h)	Beaucoup de manipulations
Présence de la mesure du taux d'humidité			Non
Débit d'air maximal			
Présence d'un variateur de débit			
Renouvellement/recyclage de l'air			Non
Mobilité du séchoir			Non
Assistance informatique			
Caractéristiques économiques			
Consommation moyenne d'énergie	0,29 L / kg de houblon sec	0,4 kg de gaz pour sécher 1 kg de houblon	
Coût pour 1 kg de plante sèche	0,33 - 0,35 €/kg de houblon sec (calculé)	0,294 €/kg sec	
Coût d'achat du séchoir		Investissement initial moins élevé que pour les autres types de séchoirs à houblon	



Le séchoir multi-niveaux dynamique du houblon (type Alsacien)



Hopen, Terre de Houblon

Le **séchoir multi-niveaux** ou à étages consiste à faire passer le houblon d'un niveau à l'autre (du haut vers le bas) grâce à des **clais basculantes**. Il y a, en général, trois étages de clais superposés, un brûleur (au fioul principalement) pour chauffer l'air et un ventilateur pour pousser l'air à travers les clais. Les cônes sont disposés sur les clais par le haut du séchoir, changent d'étage au cours du séchage. Lorsqu'il est sec, le houblon est sorti de la claie la plus basse. Cette **méthode dynamique** a pour avantage d'optimiser le flux d'air et d'être **plus homogène**. Ces séchoirs sont souvent équipés d'appareil de mesure de la température ou du débit d'air, ce qui les rend beaucoup plus précis. Les cônes y sont séchés en couche **de 30 cm**. La vitesse de ventilation pour un séchage optimal serait comprise entre 0,3 et 0,4 m/s [12, 13, 37].

Caractéristiques techniques			
	D'après la bibliographie		D'après l'enquête (basé sur un échantillon de 10 réponses)
Type d'énergie	Gaz ou fioul		Fioul (principalement)
Fonctionnement global du système	Séchage dynamique du houblon grâce à des clais basculantes (3 à 4 niveaux)		
Circulation de l'air	En système ouvert		Généralement ouvert
Surface de séchage			
Capacité maximale du séchoir			
Température maximale du séchoir	53-58°C	63-71°C [29]	De 40 à 70°C avec une moyenne autour de 58°C
Besoin en manutention	Basculement des clais		
Présence de la mesure du taux d'humidité			Appareil de mesure dans 50 % des cas (manuel ou automatisé)
Débit d'air maximal			
Présence d'un variateur de débit			Non
Renouvellement/recyclage de l'air			Non
Déshumidificateur et caractéristiques			Non
Mobilité du séchoir			Non
Assistance informatique			Non
Caractéristiques économiques			
Consommation moyenne d'énergie	0,5 L de fioul/kg Maximum 1 à 2 L de fioul pour sécher 1 kg de houblon	0,44 L/kg de houblon sec [29]	De 0,35 à 2 L/kg de houblon sec
Coût pour 1 kg de plante sèche	0,33 €/kg		De 0,50 à 2,50 €/kg de houblon sec
Coût d'achat du séchoir ou de ses matériaux de construction	Investissement important (dans le cas d'un séchoir neuf) De 3 000 à 10 000€ pour 3 à 5 ha de houblon [39]		

Le séchoir en continu du houblon

Ce type de séchage est moins utilisé et est **assez énergivore**. Plusieurs grilles sont disposées à la suite sur plusieurs étages et le houblon circule lentement sur des sortes de tapis roulants, par petites quantités, **de manière continue** en étant acheminé sur les bandes inférieures. L'air circulant est réchauffé et permet un **séchage uniforme** du houblon. Différentes sources d'énergie sont possibles pour ce type de séchoir : biomasse, gaz, fioul, chaleur de cogénération [11, 12, 37].

Caractéristiques techniques	
	D'après la bibliographie
Type d'énergie	Fioul Biomasse, chaleur de cogénération possible
Fonctionnement global du système	Séchage continu du houblon qui circule lentement de la bande supérieure vers les bandes inférieures du séchoir
Circulation de l'air	En système ouvert
Surface de séchage	
Capacité maximale du séchoir	
Température maximale du séchoir	60 – 65°C 55 – 60°C
Besoin en manutention	Peu de manipulations
Caractéristiques économiques	
Consommation moyenne d'énergie	1,05 L de fioul pour sécher 1 kg de houblon
Coût pour 1 kg de plante sèche	0,696 €/kg sec
Coût d'achat du séchoir ou de ses matériaux de construction	Investissement important (séchoir neuf)



BIOMASSE - Exemple d'un séchoir à houblon multi-niveaux auto-construit

Le séchoir présenté dans ce paragraphe est un séchoir auto-construit, utilisé par une productrice de houblon qui en cultive 3 hectares. Il s'agit d'un séchoir utilisant **la biomasse** et plus précisément le bois comme source d'énergie. Ce séchoir comprend 2 petites unités de séchage ainsi que 3 systèmes de chauffage à partir de biomasse. Les systèmes de chauffage, ajoutés au fur et à mesure pour pallier une température trop basse sont :

- Une chaudière de maison (de marque Miquée),
- Un insert de maison (de marque inconnue),
- Un "brûle-tout" (de marque inconnue également).



Enceinte du séchoir à biomasse auto-construit
Cours cocotte



Chaudières à biomasse alimentant le séchoir à houblon
Cours cocotte

Le principal inconvénient de l'utilisation de la biomasse est **l'importante surveillance** liée à l'approvisionnement des chaudières. Cette installation permet le séchage du houblon à une température de **45°C**, pendant environ 10 heures ; bien que le temps de séchage soit dépendant des conditions climatiques. Le principe de fonctionnement est celui d'un **séchoir à houblon classique sur plusieurs niveaux** : le houblon change d'étage aux cours du séchage grâce à des claies basculantes (installation dans l'entreprise « Cours cocotte »). Les informations techniques concernant le système de séchage sont répertoriées dans le tableau ci-dessous :

Paramètres techniques du séchoir	
Type d'énergie	Biomasse (bois)
Fonctionnement global du système	Fonctionne comme un "séchoir multi-niveaux" classique mais avec une source biomasse (bois)
Localisation géographique du séchoir	Auvergne (petite montagne)
Circulation de l'air	En système ouvert
Marque / constructeur pour certains équipements cibles	Chaudière biomasse de marque Miquée
Surface de séchage	4m ² par claie basculante (3 niveaux)
Capacité maximale du séchoir	-
Température maximale du séchoir	45-50°C
Besoin en manutention	Beaucoup de manutention : suivi, surveillance, et approvisionnement des chaudières
Matériaux dans le cas d'une auto-construction	Bois, OSB, grilles métalliques et section en acier
Type d'isolation (auto-construction)	-
Présence de la mesure du taux d'humidité	Non
Débit d'air maximal	-
Présence d'un variateur de débit	Non
Renouvellement/recyclage de l'air	Non
Déshumidificateur et caractéristiques	Non
Mobilité du séchoir	Non
Assistance informatique	Non
Caractéristiques économiques	
Consommation moyenne d'énergie	Environ 0,0038 stères de bois / kg de houblon sec
Coût pour 1 kg de plante sèche	0,23 - 0,57 €
Coût de l'auto-construction ou de ses matériaux de construction	2 000 €

SOLAIRE - Exemple d'un séchoir solaire auto-construit de type séchoir en grange

Ce séchoir solaire auto-construit est utilisé par une productrice de plantes aromatiques possédant 6 hectares de PPAM. Les espèces séchées sont principalement la mélisse, la menthe poivrée et le bleuet.

Le séchoir est un bâtiment en béton pour lequel la charpente et la couverture ont été faites par des professionnels, le reste du système de séchage ayant été auto-construit. Ce séchoir est construit sur le modèle **du séchage en grange** : le réchauffage de l'air se fait via **l'énergie solaire collectée en toiture**.

Le système est de type "caillebotis" (séchage en couche épaisse) d'une surface **de 70 m²**. Le recyclage de l'air de séchage se fait en particulier la nuit grâce à un système de **déshumidification**. Le reste du temps, l'air extérieur est utilisé (système ouvert).

Un appoint de chaleur est possible lorsque l'apport d'énergie solaire est insuffisant (en particulier la nuit et les jours de pluie). Le dégagement de chaleur complémentaire est possible grâce au **refroidissement d'une cuve d'eau**. Couplée au séchoir se trouve une cuve d'eau froide (d'une capacité de 9000 L) dont l'eau est chauffée en journée par le **fonctionnement de la distillerie**. La distillation produit de l'eau chaude qui dégage, en refroidissant, de la chaleur qui peut être utilisée dans le séchoir. Le fonctionnement du système est donc optimal lorsque la distillerie et le séchoir fonctionnent en même temps, ce qui n'est pas toujours assuré en raison des aléas climatiques même si le calendrier de récolte est prévu en conséquence (Catherine MAHÉ : comm. pers).



Extérieur du séchoir : couverture de 200m² pour le captage de l'énergie solaire
Catherine Mahé



Intérieur du séchoir solaire : plantes en train de sécher sur l'aire de séchage
Catherine Mahé

Paramètres techniques du séchoir	
Type d'énergie	Solaire : réchauffage de l'air Electricité : pour alimenter le ventilateur
Fonctionnement global du système	Inspiré du fonctionnement du séchage en grange
Localisation géographique du séchoir	Mayenne
Circulation de l'air	En système ouvert
Surface de séchage	Caisson de 70 m ²
Capacité maximale du séchoir	6 T de plantes fraîches
Température dans le séchoir	Entre 20 et 35 °C
Besoin en maintenance	-
Matériaux dans le cas d'une auto-construction	Bâtiment en béton, bardage en bois, revêtement de couleur noire pour le captage de l'énergie solaire
Type d'isolation (auto-construction)	Oui
Présence de la mesure du taux d'humidité	Oui, manuelle
Débit d'air maximal	20 000 m ³ /h
Présence d'un variateur de débit	-
Renouvellement/recyclage de l'air	Oui, réutilisation de l'air la nuit grâce à la déshumidification
Déshumidificateur et caractéristiques	Oui
Mobilité du séchoir	Non
Assistance informatique	Non
Caractéristiques économiques	
Consommation moyenne d'énergie	1,5 kWh / kg de plante sèche
Coût pour 1 kg de plante sèche	0,3 € / kg
Coût de l'auto-construction ou de ses matériaux de construction	

SÉCHOIRS À CIRCULATION DE L'AIR EN CIRCUIT FERMÉ

Séchoirs à claies

Les claies peuvent être disposées dans différentes enceintes :

- Les **armoires à claies** [2, 4, 32]

Les claies sont introduites dans une enceinte de séchage, les plantes séchant en couches minces de **quelques centimètres**. Une armoire à claies est étanche (système fermé). Les armoires à claies présentent l'avantage de pouvoir sécher plusieurs espèces de plante en même temps car les claies sont **individuelles**. La hauteur des claies et le remplissage peut être ajusté en fonction du volume du matériel à sécher. Leur utilisation est recommandée pour le séchage de **petits volumes** de production et ne permettrait pas de sécher plus de 100 kg par an.

L'air circule le plus souvent du bas vers le haut, traversant les claies et se chargeant en eau. Ces systèmes sont souvent associés à **un déshumidificateur** qui convient à de petites unités de transformation. Si le déshumidificateur est utilisé seul (non associé à un flux d'air forcé), il faut veiller aux différences de séchage entre les claies : les claies les plus proches du déshumidificateur séchent en général plus rapidement. En l'absence de déshumidificateur, l'air doit être chauffé avant de traverser les plantes.



M. Bucher AG

- Le **séchoir pièce** [4]

Le séchoir pièce a une surface de séchage plus importante. Dans le cas d'une auto-construction, il faut veiller à son bon dimensionnement : un surdimensionnement entraînera une surconsommation d'énergie et un sous-dimensionnement impactera le confort de travail [24]. Dans ces enceintes de séchage, les claies peuvent être disposées au mur ou sur des chariots à roulettes. Ces derniers permettent une **manipulation plus facile**.

Caractéristiques techniques		
	D'après la bibliographie [1, 2, 38]	D'après l'enquête (basé sur un échantillon de 56 réponses)
Type d'énergie	Electricité, solaire	Electricité, séchage naturel, solaire, photovoltaïque, biomasse
Fonctionnement global du système	Armoire dans laquelle les plantes sont disposées en fines couches et traversées par un flux d'air en circuit fermé	
Circulation de l'air	En système fermé	En système fermé (pour la majorité)
Surface de séchage	10 à 15 claies d'environ 1m ² par armoire, mais la taille varie selon le volume à sécher	De 20 à 60m ²
Capacité maximale du séchoir	Dépendant du nombre de claies (environ 1m ² de claies pour 1kg de plantes fraîches)	
Température maximale du séchoir		De 22 à 70°C Mais la majorité des températures de séchage pratiquées sont situées autour de 30°C maximum 40°C Hygrométrie autour de 32 - 35% (déshumidificateur)
Besoin en manutention	Beaucoup de manutention liée à la manipulation des claies	Manipulations importantes des claies
Matériaux dans le cas d'une auto-construction	Bois, OSB (sans colle) principalement Claies en tissu, plastique, inox [9]	Bois, OSB, couverture de claies : toile à fromage, à beurre moustiquaire...
Type d'isolation (auto-construction)		Laine de chanvre, de roche, de bois
Débit d'air maximal	De 200 à 500 m ³ /h pour 30 kg de plantes fraîches (avec chauffage) En fonction du déshumidificateur sino	
Présence d'un variateur de débit		Non
Renouvellement/recyclage de l'air	Oui	Réutilisation de l'air dans le cas où le déshumidificateur est utilisé en système fermé
Déshumidificateur et caractéristiques	1L / 24h pour 1m ² de claies	
Mobilité du séchoir	Non	Non
Assistance informatique	Non	
Caractéristiques économiques		
Consommation moyenne d'énergie		De 0 kWh (séchage naturel et solaire) 2 réponses entre 2 et 4 kWh 2 réponses entre 30 -47 kWh
Coût pour 1kg de plante sèche	Jusqu'à 2 - 3 € / kg de plantes sèches	De 0€ (séchage naturel et solaire) Entre 0,50 et 1,30 € (5 réponses) Entre 5 et 12 € (4 réponses)
Coût de construction du séchoir	De 800 à plus de 5 000€ pour des séchoirs de 8m ² à 29m ²	



Armoire à claies auto-construite – énergie photovoltaïque

Ce séchoir armoire individuel et auto-construit appartient à un producteur possédant 1 hectare de plantes médicinales. Il permet de sécher de petites quantités de plantes dans une armoire fermée.



Ce séchoir utilise essentiellement **l'électricité**. Il s'agit d'un système fermé à claies où l'air circule **par convection forcée**. L'installation **photovoltaïque** n'a pas été initialement conçue pour alimenter le séchoir, mais elle offre aujourd'hui au producteur une source d'énergie renouvelable complémentaire. Cette installation mesure **60 m², produit 9 kW**, avec trois orientations possibles (Est, Sud et Ouest) pour un coût s'élevant à 16 000 € HT (installation dans l'entreprise « La Ferme aux Herbes »).

Ce séchoir est basé sur le principe de la déshumidification. Il comprend deux enceintes de séchage associée chacune à un déshumidificateur dont les caractéristiques sont référencées dans le tableau suivant.

Paramètres techniques du séchoir	
Type d'énergie	Électricité, photovoltaïque
Fonctionnement global du système	Claies dans une armoire avec système de déshumidification
Localisation géographique du séchoir	Vosges
Circulation de l'air	En système fermé
Surface de séchage	Grand séchoir : maximum 9,60 m ² (12 claies de 0,8 m ²) Petit séchoir : environ 6 m ² (12 claies de 0,7 m x 0,7 m)
Capacité maximale du séchoir	Séchage de 350 kg sec / an
Température maximale du séchoir	35-38 °C
Besoin en maintenance	Manutention des claies
Matériaux dans le cas d'une auto-construction	Epicéa non traité
Type d'isolation (auto-construction)	-
Présence de la mesure du taux d'humidité	Non
Débit d'air maximal	Grand séchoir : inconnue Petit séchoir : 580 m ³ /h
Présence d'un variateur de débit	Non
Renouvellement/recyclage de l'air	Système de déshumidification
Déshumidificateur et caractéristiques	Grand séchoir : CFT Ecosec Passat, capacité de 80 L/24h Petit séchoir : TROTEC TTK140S, capacité de 40 L/24h
Mobilité du séchoir	Non
Assistance informatique	Non
Caractéristiques économiques	
Consommation moyenne d'énergie	Grand séchoir : 5,76 kWh/kg sec (ortie)
Coût pour 1kg de plante sèche	1,45 € / kg sec (pour un coût du kWh estimé à 0,25 €)
Coût de l'auto-construction ou de ses matériaux de construction	Coût de l'installation photovoltaïque = 16 000 € HT

Le four à tabac

Initialement conçu, comme son nom l'indique, pour le séchage du tabac, **d'anciens fours à tabac** *Virginie* sont utilisés pour sécher des PPAM. Le séchoir à tabac est un **caisson isolé** qui peut être installé à l'extérieur et dans lequel les plantes sont séchées grâce à un système **de ventilation** et **de chauffage**. Quelques modifications ont été apportées à ces fours afin de pouvoir y sécher des PPAM. Les peignes à tabac ne sont plus utilisés et peuvent être remplacés soit **par des claies**, soit le séchoir peut être utilisé **en couche épaisse sur caillebotis**. Un filet alimentaire peut être nécessaire pour couvrir le caillebotis [1, 32].



Four à tabac
Come

La température de séchage n'est pas la même : si les fours pouvaient chauffer jusqu'à 70 °C pour sécher le tabac, la température utilisée pour les PPAM dans ces fours est comprise **entre 30 et 35 °C**. La durée de séchage pratiquée est de 3 à 4 jours, mais cela peut varier en fonction des conditions météorologiques et de la récolte. La consommation énergétique est évidemment très dépendante des produits à sécher. Les paramètres essentiels au séchage dans le four à tabac sont **la température** qui conditionne l'apport d'énergie ainsi que la vitesse de l'air (Régis GENEVE : comm. pers.). Dans le four à tabac, c'est un brûleur (le plus souvent au gaz) qui produit la chaleur et un ventilateur (hélicoïdal ou centrifuge) permet de mettre l'air en mouvement [39].



Four à tabac avec peignes
(pour le séchage du tabac)
Agriexpo

Caractéristiques techniques			
	D'après la bibliographie [1, 10, 32, 39, 40]	Enquêté n° 1	Enquêté n° 2
Culture concernée	Tabac	Plantes médicinales	Plantes aromatiques
Type d'énergie	Gaz (générateur d'air chaud), électricité (ventilateur)	Gaz, électricité	Gaz, fioul, biomasse
Fonctionnement global du système	Caisson isolé, fermé comprenant ventilation et chauffage		
Circulation de l'air	En système fermé, l'air est remis plusieurs fois en circulation et une admission d'air est possible pour éviter la saturation dans le four		
Surface de séchage	11 m ² (en moyenne)	Séchoirs de 14 m ² sur caillebotis Séchoirs de 29 m ² ou 50 m ² (type container)	Environ 25m ²
Capacité maximale du séchoir	Environ 30 kg/m ²		
Température maximale du séchoir	75 °C	Utilisation du four entre 30 et 35°C	
Besoin en manutention	Besoin de manutention important		
Présence de la mesure du taux d'humidité	Régulation hygrostatique[1] en général	Equipé de sondes hygrométriques	Oui, automatisé
Débit d'air maximal	Entre 10 000 et 14 000 m ³ /h et jusqu'à 30 000 m ³ /h	Utilisation de ventilateur centrifuges à forts débits (mais débit inconnu)	Ne sait pas
Présence d'un variateur de débit	Oui		Non, forte ventilation
Renouvellement/recyclage de l'air	Recirculation de l'air partielle	Partiellement	Oui, grâce aux volets d'air
Mobilité du séchoir	Non		
Assistance informatique	Oui	Non, mais réglage de la température possible	Oui, mesure automatisée de l'humidité relative
Caractéristiques économiques			
Consommation moyenne d'énergie	0,64 kg de gaz / kg de tabac sec	1 kW et 0,08 – 0,09 kg de gaz/kg de plantes sèches (approximé)	0,4 kg de gaz ou 0,5 L de fioul/kg de plantes sèches
Coût pour 1 kg de plante sèche	0,56 € / kg de tabac sec	0,60 – 0,90 € / kg de plantes sèches (mélisse)	1,00 € / kg de plantes sèches
Coût d'achat du séchoir	Entre 1 500 et 5 000 € d'occasion Entre 15 000 et 30 000€ neuf	Equipements souvent amortis 20 000 – 25 000 €	20 000 €

Un avantage certain du four à tabac est la possibilité de **réguler l'admission de l'air** dans le séchoir, via un **volet d'air**. L'air circulant dans le four est **remis plusieurs fois en mouvement** avant d'être évacué lorsqu'il est chargé d'humidité. En parallèle, l'admission d'un air "neuf" permet d'éviter la saturation en eau de l'air. Cette admission peut être gérée **de manière automatique** : des sondes de température et d'hygrométrie conditionnent l'admission de l'air, ce qui permet **des économies d'énergie** par rapport à une gestion manuelle [1, 39].

La principale amélioration possible de ces séchoirs serait de permettre davantage de mécanisation (par exemple, en utilisant des containers), car la manutention est aujourd'hui importante pour remplir les séchoirs et y égaliser les plantes. Également, dans certains fours, l'air circule du haut vers le bas, ce qui pose des problèmes de tassement des plantes (Régis GENEVE : comm. pers.)



TABLEAU COMPARATIF DES SÉCHOIRS PRÉSENTÉS

Séchoirs commercialisés

Séchoir présenté	Culture	Source d'énergie	Coût investissement	Consommation moyenne	Avantages	Inconvénients
Four à tabac	PPAM	Gaz ou fioul, électricité, biomasse	A partir de 1 500 - 2 000 € d'occasion Autour de 20 000 € neuf	0,1 à 0,6 kg de gaz / kg sec Environ 0,5 kg de fioul / kg sec (Selon les plantes)	Régulation du flux d'air et mesure de l'hygrométrie automatisée Capacité à traiter une grande quantité de plantes Qualité du séchage	Manipulation importante Utilisation d'énergies fossiles (gaz, fioul)
Séchoir à claies (armoire)	PPAM	Électricité		1,23 kWh à 3,1 kWh (selon modèle)	Adapté à des productions diversifiées Claies individuelles	Beaucoup de manutention
Séchoir mobile					Facilement transportable Adapté aux petites productions	
Séchoirs à houblon traditionnel	Houblon	Gaz, fioul	Faible investissement (par rapport aux autres séchoirs à houblon)	Environ 0,4 kg de gaz / kg sec Environ 0,5 L de fioul / kg sec	Simplicité d'utilisation Peu d'investissement (par rapport aux autres séchoirs à houblon)	Hétérogénéité du séchage en couche épaisse Brassages et manipulations Source d'énergie fossile
Séchoir multi-niveaux	Houblon	Fioul principalement, gaz	Autour de 15000 € neuf	De 0,35 à 2 L de fioul / kg sec	Précision grâce aux appareils de mesure (température, débit d'air)	Source d'énergie d'origine fossile
Séchoir en continu	Houblon	Fioul, biomasse, chaleur de cogénération	Investissement important pour un séchoir neuf	1,05 L de fioul / kg sec	Séchage uniforme	Plutôt énergivore



Séchoirs auto-construits

Séchoir présenté	Culture	Source d'énergie	Coût investissement	Consommation moyenne	Avantages	Inconvénients
Séchoir type "caillebotis"	PPAM	Gaz, électricité, solaire, biomasse	Entre 2 000 et 12 000 € (selon la surface de séchage)	De 0,5 à 1,12 kg de gaz / kg de plantes sèches	Séchage de grandes quantités de plantes	Source d'énergie souvent d'origine fossile
Séchoir à claies	PPAM	Électricité, solaire, biomasse, séchage naturel, photovoltaïque	Entre 800 et 5 000 € (selon la surface de séchage)		Plus faible investissement Adapté à de petits volumes de production	Manutention des claies importante
Séchoir à houblon multi-niveaux	Houblon	Biomasse	Environ 2 000 €	Environ 0,0038 stères de bois / kg de houblon sec (4 stères pour 1T de houblon)	Pas d'utilisation d'énergie fossile Energie produite sur l'exploitation Pas de coût d'énergie	Beaucoup de manutention et de surveillance
Séchoir solaire type séchage en grange	PPAM	Solaire, Electricité		1,5 kWh / kg de plante sèche	Utilisation de l'énergie solaire Limitation du coût de l'énergie Optimisation de l'utilisation de l'énergie grâce au couplage avec la distillerie	Gestion du fonctionnement du séchoir couplé à la distillerie Impact des conditions climatiques
Séchoir armoire à claies	PPAM	Electricité, photovoltaïque	Coût des panneaux photovoltaïques 16 000 € HT		Qualité du séchage Séchage de petites productions	Manutention des claies



QUELS LEVIERS POUR ÉCONOMISER L'ÉNERGIE ?

« MIEUX » ÉQUIPER SON SÉCHOIR

L'isolation

L'isolation de l'installation de séchage permet d'**éviter les pertes énergétiques**. Elle se fait généralement à **l'extérieur** de l'enceinte pour ne pas « polluer » les plantes lors du séchage. Les matériaux pouvant être utilisés pour l'isolation sont des panneaux en **fibre de bois**, de la **laine de bois**, du **chanvre** ou du **liège** [11]. D'après les réponses reçues lors de notre enquête, les différents types d'isolation utilisés par les répondants sont la **laine de chanvre**, de bois, de roche, du **polystyrène extrudé**, du PIR (polyuréthane).

Le pilotage et l'automatisation

Le pilotage et/ou l'automatisation de certains éléments du séchoir a un avantage double : la **réduction du besoin en main-d'œuvre** mais aussi **une économie d'énergie**.

Les ventilateurs peuvent avoir un fonctionnement **automatisé** en fonction **de la température et de l'humidité mesurées par les sondes** [41]. Le **débit d'air devient alors variable** selon la période de la journée. La nuit par exemple ou lors de périodes où l'air est trop humide, les ventilateurs seront coupés automatiquement : cela permet de faire des économies d'énergie et de ne sécher que lorsque **l'efficacité** est élevée. Pour un fonctionnement idéal, il est recommandé de recalibrer les appareils de mesure, au minimum, tous les ans. Le pilotage et l'automatisation du séchage restent cependant associés à des systèmes assez sophistiqués [23, 42].

Le ventilateur à débit variable

Relier le ventilateur à un variateur de fréquence peut permettre de faire des économies notamment en termes **d'énergie**. L'utilisation d'un ventilateur **avec moteur à deux vitesses** ou **variateur de débit** permet une consommation électrique plus faible que celle d'un ventilateur à vitesse constante. Cette variation du débit permet aussi d'avoir un **processus optimal** en fonction des phases de séchage et **un débit adapté** au séchage de chacune des espèces ou de chacun des organes de plantes à sécher [23, 39].

De manière plus concrète, le ventilateur à débit variable a un intérêt :

- Lorsqu'il faut adapter le débit à la surface de séchage (si celle-ci est variable selon la saison).
- La nuit : lorsque l'air est plus humide, même une forte ventilation ne permet pas d'évaporer l'eau. Il n'est alors pas utile d'utiliser la puissance maximale du ventilateur.

Différentes solutions sont possibles :

- **ventilateur à double vitesse** : le petit débit égal à la moitié du grand débit,
- **ventilateur à débit variable** : le choix de n'importe quel débit est possible jusqu'au maximum indiqué par le constructeur,
- **variateur électronique** : peut être couplé à de petits ventilateurs.



La sonde hygrométrique ou l'humidimètre

Le « bon séchage » des plantes est souvent vérifié visuellement ou au toucher par les producteurs : une plante cassante assure un taux d'humidité, en général, correct.

Mesurer l'humidité de l'air au cours du séchage peut néanmoins permettre **d'optimiser le processus** de séchage et de savoir **avec précision** quand l'arrêter. La teneur en eau de l'air se mesure grâce à **un humidimètre** ou **une sonde hygrométrique**. La sonde **mesure l'humidité de l'air en entrée et en sortie du séchoir** : lorsque celles-ci sont identiques, les plantes sont sèches. Disposer de capteurs de température et d'hygrométrie est donc un bon moyen de **piloter efficacement son installation** de séchage, et **donc de réduire sa consommation d'énergie** [4, 8, 39].

Quelques modèles de sondes d'hygrométrie et de température sont détaillées dans le tableau suivant. Avant d'effectuer un choix, il faut s'assurer que la sonde fonctionne bien aux températures de séchage pratiquées.

Tableau construit d'après les données des constructeurs PCE instruments et Trotec

Equipement	Modèle	Fabricant	Utilisation	Lien internet	Caractéristiques
	Thermo-hygromètre PCE-THD-50	PCE instruments	Enregistrement de la température et de l'humidité ambiante de l'air dans le temps Stockage des valeurs	https://www.pce-instruments.com/	Mesures de températures entre -20 et +60°C (peut varier selon modèle) (Mais le thermocouple mesure entre -100 et +1372°C) 165.90 € HT 199.08 € TTC
	Thermo-hygromètre BC21	TROTEC	Mesures de la température et de l'humidité de l'air	www.trotec24.com	De -10 à 50°C ou de -40 à +70°C selon appareil De 69.99 à 99.99 €



UTILISER L'ÉNERGIE SOLAIRE

Le pré-fanage

Un « pré-séchage » peut éventuellement être envisagé avant le début du séchage : on appelle cela le **pré-fanage**. C'est une méthode qui consiste à laisser sécher les végétaux au soleil pour réduire leur taux d'humidité avant l'entrée dans le séchoir. Cela permet alors de **réduire le temps de séchage** et donc les coûts associés.

Mais il est cependant recommandé la plupart du temps que le séchage se fasse à l'abri de la lumière et des UV, qui pourraient entraîner **une dégradation des plantes**. Le pré-fanage, même s'il peut permettre de faire des économies, n'est donc pas toujours possible compte tenu du type de plante à sécher et de son débouché. Il est parfois même vivement **déconseillé**, considéré comme **trop dégradant** et présentant trop d'aléas [9, 10, 44].

L'enquête a effectivement révélé que le pré-fanage n'est que peu utilisé par les producteurs répondant : moins de 8 % d'entre eux le pratiquent.

Utilisation de la chaleur solaire des bâtiments et préchauffage de l'air de séchage

L'utilisation de l'énergie solaire peut consister à directement utiliser le rayonnement thermique pour **chauffer l'air**. L'air chaud du bâtiment est directement utilisé pour le séchage, réduisant ainsi la consommation énergétique. Ces installations représentent un certain coût car il est nécessaire de se protéger contre les risques d'incendies [11].

Le réchauffage de l'air peut se faire via **une toiture** de hangar [4]. Dans certains systèmes, il est possible que le réchauffage de l'air se fasse **en grange ou en serre** [41]. Dans le cas de la serre, l'air est réchauffé par rayonnement solaire puis acheminé jusqu'au séchoir et ventilé [32, 45].

Le stockage de l'énergie solaire

Dans le cadre de l'utilisation d'un **séchoir solaire**, il peut être intéressant de stocker l'énergie captée. Ce stockage permet encore une fois d'**optimiser l'utilisation de la source d'énergie**. Mais l'intérêt, ici, est double car le stockage permet également de **réguler le séchage le jour** pour que la température ne soit pas trop élevée. Grâce au stockage, l'énergie superflue du jour est restituée sous forme **de chaleur** la nuit (lorsque les températures sont plus froides). Ainsi, le stockage permet une utilisation optimisée de l'énergie solaire en évitant les pics de températures qui pourraient détériorer le végétal et en permettant l'utilisation efficace du séchoir pendant la nuit. Une telle installation est à réfléchir car elle représente un **coût élevé** d'investissement [1].

LE SÉCHAGE À CONTRE-COURANT

Le séchage à **contre-courant** permettrait de faire des **économies d'énergie** car il utilise au maximum le pouvoir évaporatoire de l'air dans le séchoir. Le séchage à contre-courant consiste à faire passer l'air d'abord à travers les plantes les plus sèches pour ensuite rencontrer les plantes plus humides en sortie du séchoir. Ce système impliquerait **des rotations** entre différents lots de plantes plus ou moins secs et ne serait donc pas adapté à tous les types de séchoirs. Le séchage à contre-courant serait également **plus long qu'un séchage à co-courant**, qui consiste à directement sécher les plantes les plus humides en entrée de séchoir, avec un air plus chaud et sec qu'en sortie. Le séchage à co-courant est celui qui est le plus fréquemment rencontré [8].

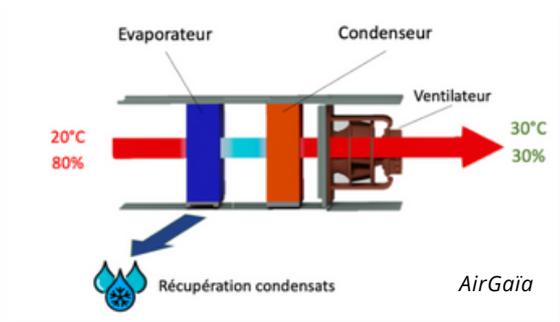


QUELQUES EXEMPLES DE NOUVEAUX ÉQUIPEMENTS ET MÉTHODES INNOVANTES

La technologie AirGaïa

La technologie AirGaïa repose sur le **principe de déshumidification**. Initialement conçu pour réduire l'utilisation de pesticides et la consommation énergétique dans les serres, le déshumidificateur thermodynamique de la solution AirGaïa consiste à diminuer l'humidité et ainsi éviter le développement de micro-organismes.

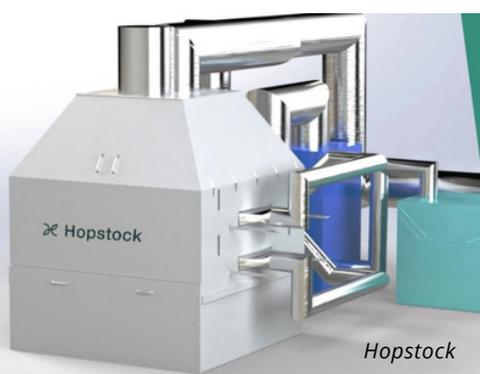
Le système est en cours de test afin d'évaluer son efficacité sur des processus de séchage [46].



Le principe de fonctionnement est le suivant : l'air est déshumidifié grâce à la **condensation de l'eau** au niveau de **l'échangeur froid** (évaporateur du circuit thermodynamique de type pompe à chaleur). Puis l'air est réchauffé jusqu'à **maximum 40°C** au niveau de **l'échangeur chaud** (ou condensateur du circuit). En complément du séchage thermodynamique, la ventilation peut être régulée pour utiliser l'air extérieur lorsque celui-ci est détecté comme étant suffisamment sec par des capteurs. **L'utilisation de l'air extérieur sec peut permettre des économies d'énergie jusqu'à 40%**. En termes de séchage et pour des installations existantes, la solution AirGaïa peut s'intégrer de deux manières différentes :

- Soit le déshumidificateur thermodynamique est **ajouté à une installation** ne disposant que d'une ventilation de l'air extérieur pour diminuer l'humidité de l'air,
- Soit il **remplace un brûleur à gaz** (typiquement dans un séchoir à tabac) (Fabien CUQ : comm. pers.).

En cours de test, le dispositif est seulement applicable **à des systèmes fermés**. Les caractéristiques du déshumidificateur peuvent être adaptées selon la surface du séchoir. Le système fonctionne à l'électricité.



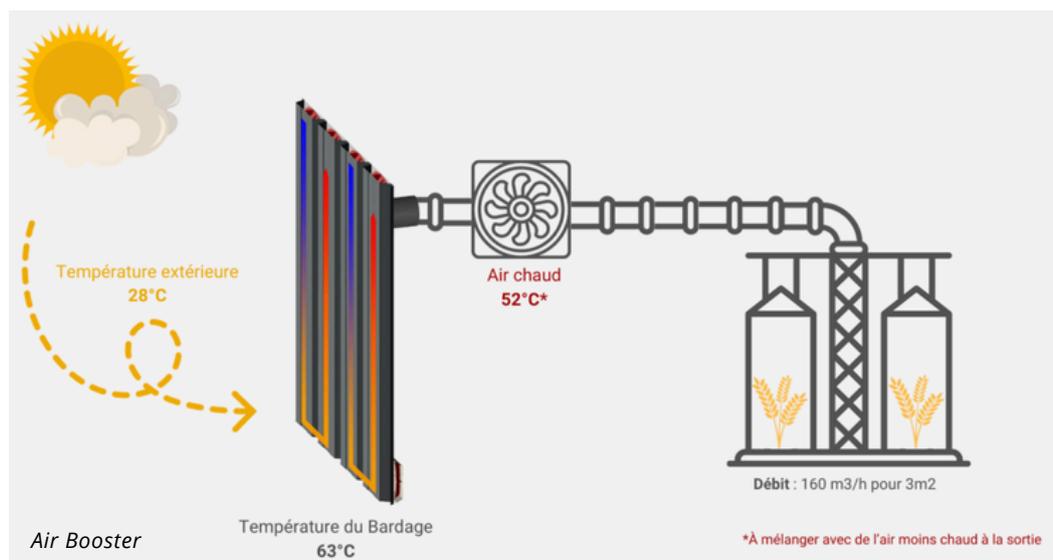
Le séchoir houblon innovant : H140 de Hopstock

Le séchoir houblon H140 de Hopstock est un séchoir avec système **de déshumidification et échangeur d'air**. Ce nouveau système de séchage vise à remédier aux problèmes des séchoirs actuels que peuvent rencontrer les producteurs de houblon ; c'est-à-dire **pallier une consommation d'énergie fossile** (gaz, fioul) importante et permettre **un contrôle précis** de la qualité via la mesure de paramètres techniques (température, humidité, débit d'air) lors du séchage. Le séchoir à houblon de Hopstock est donc pensé pour être pratique, écologique et offrir une qualité de séchage du houblon optimale.

Le processus repose sur le principe de déshumidification et un échangeur d'air permet de recycler l'air et de **diminuer les pertes d'énergie**. Le séchoir fonctionne à l'énergie « **biomasse** », évitant ainsi le recours aux énergies fossiles. Le principe de chaleur tournante est aussi utilisé afin d'éviter les pertes d'une partie de l'air sortant et de faciliter l'homogénéité du séchage [37].



La technologie R'Booster



La technologie R'Booster consiste à utiliser **l'énergie solaire** pour chauffer l'air. Sur le modèle du capteur solaire en toiture, le principe de R'Booster repose sur l'utilisation de la chaleur emmagasinée par **une façade métallique**. La façade métallique des bâtiments, généralement en tôle, joue le rôle d'un échangeur thermique : grâce à l'énergie solaire, **la température** du bardage augmente et l'air à son contact est chauffé.

L'air chaud peut ensuite être employé pour différentes utilisations dont le séchage agricole. Il peut servir à alimenter une pompe à chaleur ou encore être dirigé directement dans l'enceinte de séchage. Le système peut fonctionner uniquement avec l'énergie solaire ou nécessiter **une source d'énergie complémentaire** (gaz par exemple).

Cette technologie, permettant la diminution de consommation en énergie fossile, est en cours de test notamment sur le séchage de céréales [47].

Le séchoir automatisé sur mesure de la coopérative Valplantes

La coopérative suisse Valplantes, en collaboration avec le constructeur Robert Bas, a mis en place à partir de 2015, le projet d'un **séchoir automatisé**. La coopérative, voulant pallier des problèmes liés à la manipulation des plantes et à des installations obsolètes, se lance dans un projet de séchage innovant. Le séchoir nouvellement construit se veut **être économe en énergie tout en assurant l'efficacité de séchage et la rationalisation de la main-d'œuvre**.

L'ensemble du séchoir permet de traiter une quarantaine d'espèces différentes, du séchage au conditionnement, grâce à des systèmes **motorisés et programmés**. Les volumes séchés vont jusqu'à 600 kg de plantes par jour **à 40°C**. L'installation est pilotée et programmable via des écrans tactiles : la vitesse de défilement ou bien la hauteur des plantes sont des paramètres qui peuvent être modifiés. Des tapis et ponts roulants acheminent les plantes jusque dans les cellules de séchage, qui peuvent être **pilotées indépendamment**, avec une ventilation variable au cours du séchage ainsi que des systèmes permettant des économies d'énergie (pompes à chaleur, réutilisation de l'air de séchage, échangeur de chaleur air/eau).

L'ensemble de cette installation complexe et sophistiquée a représenté un investissement de près de 3 millions d'euros pour la coopérative. Elle permet cependant de faire des économies d'électricité et de main-d'œuvre. **Les économies quantifiées ont été estimées à une réduction de 10 kWh à 3kWh / kg de plantes séchées concernant l'électricité et les coûts de main-d'œuvre ont, quant à eux, été divisés par 2**. Globalement, le coût du séchage est de **0,35 à 0,40 € / kg** et d'environ 2€ / kg en comptant la main-d'œuvre [48].

ZOOM SUR LES SÉCHOIRS SOLAIRES AUTO-CONSTRUITS

Le séchoir solaire : principe de fonctionnement et éléments de construction

Le **séchage solaire** consiste à sécher les plantes avec un **air réchauffé par le soleil**, l'air ambiant pouvant gagner jusqu'à 5°C environ grâce à l'installation de capteurs solaires. Ce système est suffisant pour sécher des PPAM à **basse température** (jusqu'à 45°C). L'utilisation de capteurs solaires est d'autant plus adaptée que la récolte des PPAM a lieu pendant des périodes de fort ensoleillement. Le coût du séchage est donc réduit à l'investissement de base (et potentiellement à une consommation d'énergie liée à un chauffage d'appoint). Il est préférable que l'air entrant dans le capteur solaire ne provienne pas directement de l'extérieur mais plutôt d'une autre pièce, de manière à éviter l'entrée d'humidité au sein de l'installation. Il est également important de bien répartir les plantes et le flux d'air à l'intérieur du séchoir pour que le séchage soit **uniforme** [1-3, 49].

Le séchoir solaire peut être de différents types [3] :

- Soit il s'agit d'une enceinte unique dans laquelle les plantes sont séchées en vrac, en couche épaisse (type "caillebotis"),
- Soit les plantes sont séchées dans des armoires à claies,
- Ou encore il existe des systèmes mixtes comprenant ces deux types d'installation.

Auto-construction du séchoir solaire

Le séchoir solaire présente l'avantage de pouvoir être auto-construit, ce qui permet de **limiter l'investissement initial**. Ce système s'adapte autant à des petites qu'à des grandes productions. Le **dimensionnement du séchoir** est d'autant plus important que l'auto-construction doit être faite au plus proche des besoins et objectifs de production.

Le capteur solaire doit être **dimensionné selon le volume de production envisagé** mais aussi prendre en compte **l'ensoleillement** de la région. Il faut prévoir le transfert de l'air chauffé vers l'enceinte de séchage : des gaines peuvent assurer la circulation de l'air mais il faut veiller à limiter les pertes d'énergie en évitant les obstacles au flux d'air (coudes, trop petites sections de gaine...). Dans le cas d'une installation du capteur en toiture, l'air doit être pulsé vers le bas, la circulation de l'air de manière naturelle s'effectuant du bas vers le haut (l'air chaud monte naturellement).

Pour un dimensionnement optimal du séchoir solaire, le choix d'un **appoint thermique** peut être justifié pour pallier ponctuellement de mauvaises conditions climatiques ou augmenter la capacité de séchage. L'appoint permet alors une plus grande souplesse d'utilisation [3].

Le capteur

Le réchauffage de l'air grâce aux capteurs solaires disposés en toiture a d'abord été appliqué au séchage des fourrages et du grain dans les années 1970-80, et est adaptable aux plantes médicinales.

Le capteur solaire en toiture est généralement constitué **d'une sous-face isolante** créant un espace sous le toit où l'air circule. Le principe de fonctionnement est le suivant : l'air circule dans cette lame et s'échauffe grâce à **l'énergie incidente du soleil**, il est ensuite aspiré par un ventilateur avant d'être propulsé à travers l'enceinte de séchage. L'eau des plantes s'évapore dans l'air qui se charge en humidité et ce dernier est ensuite évacué à l'extérieur du système de séchage. L'absorption de l'énergie par le capteur solaire dépend de **son inclinaison**, de **son orientation**, de **sa couleur** et de **la nature du matériau** qui le compose. La vitesse de l'air dans le capteur est aussi à prendre en compte et les conditions d'ensoleillement de la région jouent un rôle primordial dans le rendement de captation. Pour un captage optimal de l'énergie, le capteur solaire devrait avoir une exposition sud et un angle d'inclinaison de 30° à 45° en été, et entre 50° et 60° en automne. La surface du capteur doit être **d'environ 1 m² pour 3 à 5 m² de claies** [1, 3, 32, 49].

Il existe plusieurs types de capteurs : les capteurs nus à effet de corps noirs et les capteurs à effet de serre. Lors de la construction du capteur, il faut veiller à son isolation et à son étanchéité.

Il faut également veiller à la puissance du capteur :

- Si l'énergie est insuffisante, il faut réduire la vitesse de séchage et le volume à sécher,
- Mais si elle est trop élevée, il faut prendre garde au risque de surchauffe [1].

Optimiser l'utilisation du solaire : appoint de chauffage ou stockage ?

Il existe deux façons différentes d'optimiser l'utilisation d'un séchoir solaire :

La première est de **coupler l'utilisation de capteurs solaires à un appoint permettant l'apport d'énergie complémentaire**. L'énergie solaire peut être couplée à une autre source d'énergie afin d'assurer une efficacité optimale du séchoir lorsque le **remplissage est occasionnellement important** ou pour pallier un **ensoleillement insuffisant** (ensoleillement trop faible, nuit...). Dans ce cas, on parle d'un séchoir biénergie : un système mixte avec capteur solaire et une autre source d'énergie. Un **complément de chauffage** ou un **système d'extraction d'humidité** peuvent être ajoutés, ce qui évite de devoir surdimensionner l'installation. Plusieurs équipements peuvent être utilisés comme chauffage d'appoint : brûleur à gaz, fioul, ou bois, résistance électrique ; cela est à raisonner en fonction du système, des **objectifs de production**, de **l'impact environnemental** de la source d'énergie complémentaire [1].

La seconde est de stocker l'énergie solaire.

L'ajout d'un système de stockage de l'énergie solaire peut également être envisagé. Durant la nuit ou durant les périodes de faible ensoleillement, il peut être intéressant **de redistribuer l'énergie accumulée** par un espace de stockage de **la chaleur**. Le séchage peut alors être maintenu lorsque les conditions extérieures ne sont pas optimales. L'utilisation de **galets**, d'**eau** ou de **briques réfractaires** permet cette accumulation de chaleur [3]. Les avantages du stockage sont :

- La **restitution de chaleur** lorsque la quantité d'énergie délivrée par le soleil est insuffisante,
- La **régulation de la température**,
- La **souplesse d'utilisation** (moins dépendant du flux solaire, appoint non nécessaire),
- La **diminution des coûts** de fonctionnement du séchoir.

Cependant, ce système est à bien réfléchir car le système de stockage est difficile à implanter, le **coût d'installation** est important, et la conduite du séchage est moins précise.



CONCLUSION

Le séchage est une étape de transformation qui demande de l'expertise car il est dépendant de nombreux paramètres. La diversité des exploitations agricoles et des besoins en termes de séchage explique **la complexité** des systèmes et **leur diversité**. La filière PPAM est également extrêmement variée, tant en termes d'espèces que de débouchés, et ne dispose que de peu d'informations référencées et chiffrées pour l'ensemble des plantes cultivées. La filière houblon, quant à elle, est davantage renseignée mais se heurte aux enjeux liés à **la consommation énergétique** des séchoirs.

Cet état des lieux des techniques de séchage pour ces filières a donc permis de dresser **un bilan de la situation actuelle** et de répertorier des potentielles alternatives. L'auto-construction se révèle, dans certains cas, être la solution pour dimensionner l'installation de séchage en fonction des besoins de chaque producteur.

Le principal objectif d'amélioration des systèmes existants est la volonté de **maitriser sa consommation énergétique** afin d'en **limiter le coût** et **l'impact environnemental**. De nouvelles méthodes de séchage voient le jour pour faire face à l'utilisation d'énergie fossiles, coûteuses et polluantes. Cependant, la plupart des nouvelles techniques ou des installations les plus « sophistiquées » restent les plus demandeuses **en termes d'investissement**.

Les producteurs recherchent un séchage rapide et efficace garantissant **la qualité de la plante** et une optimisation du procédé. Des recherches et essais complémentaires pourront être envisagés dans ce sens.



ANNUAIRE

ANNUAIRE DE PERSONNES RÉFÉRENTES EXPERTES DU SÉCHAGE

Nom	Téléphone / Mail	Structure	Fonction	Expertise
Ludovic STRUYVE	04.92.87.70.52 ludovic.struyve@crieppam.fr	CRIEPPAM	Conseiller au CRIEPPAM	Expertise plutôt des systèmes type "caillebotis"
Sylvain PERROT	07.67.23.72.47 sylvain@sp-anina.com	ANINA	Consultant spécialiste Transformation des PPAM	Expertise séchage et transformation des PPAM
Thibaut JOLIET	07.87.69.46.55 adoxa.consultant@orange.fr	ADOXA	Formateur consultant (PPAM)	Formations auprès des Chambres d'agriculture et des GAB Accompagnement individualisé à l'auto-construction de séchoirs pour producteurs en circuits courts

ANNUAIRE DE QUELQUES FOURNISSEURS

Entreprise	Contact	Matériel / Lien vers le site
AEIB VENTILATEURS	Parc d'activité de Tresses 2, rue Ampère 33370 Tresses France +33 (0)5.57.80.79.79 aeib@aeib.fr	Ventilateurs industriels, centrifuges, divers appareils de ventilation et de traitement de l'air https://aeib.fr
AGRATECHNIEK	Pays-Bas +31 223 52 28 24 info@agratechnik.com	Installations de séchage et équipements https://www.agratechnik.com
AIRGAMMA	203, route de Millau 81000 Albi France +33 05.63.45.23.99 airgamma@airgamma.com	Equipements de chauffage gaz et fioul https://airgamma.com
ARCOS / ZEPHYTEC	469, route des Charmes 01190 Gorrevod France +33 (0)3.85.30.99.26	Séchoirs fruits /légumes https://www.zephytec.com
ATIE PROCESS	Les étangs du Thoré RN 112 81660 Bout-du-Pont-de-l'Arn France +33 (0)5.63.61.80.22	Séchage industriel https://www.atieprocess.com
BULKIP SAS	380, Route de Maset 47260 Granges-sur-Lot France +33 (0)5.53.88.98.80 contact@bulkip.fr	Matériel de séchage pour l'industrie https://www.bulkip.fr



Entreprise	Contact	Matériel / Lien vers le site
CARRIER		Ventilateurs, pompes à chaleur, traitement de l'air https://www.carrier.com/commercial/fr/fr/
CMA CONCEPTION	ZA du Val d'Eygues 245, chemin de Moras 26110 Aubres France +33 (0)6.82.01.82.68 contact@cmaconception.fr	Séchoirs à étages (fruits à coques : noix, noisette, amande) https://cmaconception.fr/sechoir-a-etages-2/
CONA SOLAR	+43 75 886 446 solar@conasolar.com	Séchage solaire https://www.conasolar.com/fr
CUENOD	Siège : CUENOD SAS (5 autres agences en France) 2, rue Josué Heilmann 68800 Vieux-Thann France +33 (0)3.69.15.51.30	Brûleurs https://www.cuenod.com/fr/fr/page/4/aper-u-des-produits
DIATEX (DIVISION AGRO-TEXTILES)	49, rue Jules Guesde Zone industrielle de la Mouche 69230 Saint Genis Laval France +33 (0)4.78.86.85.00	Toiles pour claies https://agro.diatex.com/fr/
ETS VIGNOLLES (DRYING PROCESS)	Siège : 21, chemin d'Argnat 63530 Volvic France Atelier : Route de Sayat Argnat 63530 Sayat France +33 (0)4.44.05.02.30 contact@ets-vignolles.com	Benne séchante, séchage en cabine, en continu, séchoirs mobiles https://ets-vignolles.com
HANS BINDER	Richard-Wagner-Str.14a 84453 Mühldorf Allemagne +49 (0)8631 187557-0 info@hb-dryer.com	Séchoirs industriels https://hb-dryer.com
M. BUCHER AG	Bielstrasse 12 3053 Münchenbuchsee Suisse +41 (0)31 869 35 38	Séchoirs de type armoire https://www.bucher-trockner.ch
MIQUEE	528, rue de l'Etoile ZI des Franchises 52200 Langres France +33 (0)3.25.87.07.73	Chaudière biomasse www.chaudieres-miquee.fr
MOUGEL	+33 (0)2.40.68.05.00 contact@mougel.fr	Tôles perforées, gaufrées, grillages http://mougel.fr
MUNTERS FRANCE SAS	331, rue de Cormery 37550 Saint-Avertin France	Ventilateurs, déshumidificateurs https://www.munters.com/fr/
NEU-JFK FEVI	+33 (0)2.31.48.54.80 info@fevi.com	Ventilateurs industriels Ventilateurs centrifuges et axiaux https://neujkf-fevi.com/global/fr



Entreprise	Contact	Matériel / Lien vers le site
NEVO	Parc d'Activités Raonnais 3, allée Jean Monnet 88110 Raon l'Etape France +33 (0)3.29.41.66.75	Ventilateurs, déshumidificateurs, chauffage https://nevo.fr
NORWEST	1645, chemin de Saint-Arnoux 06140 Tourrettes-sur-Loup France +33 (0)4.93.24.70.35	Sécheurs et évaporateurs http://www.norwest.fr
NORTH WEST TECHNOLOGY	Via Peveragno, 96 Boves 12012 (CN) Italie	Séchage à froid https://northwest-technology.com/index.jsp
PROMILL	Route de Paris, Route nationale 12 Parc d'activité de la Radio 28100 Dreux France +33 (0)3.23.56.63.00 info@promill.fr	Séchoirs industriels https://promill.fr
REXAIR	5, rue des Boisseliers 95330 Domont France +33 (0)1.34.04.19.19 contact@rexair.fr	Déshumidificateurs https://www.rexair.fr
ROBERT BAS	252 rue Raymond Noël Parc Actival 01140 Saint-Didier-sur-Chalaronne France +33 (0)4.74.04.04.64 accueil@bas-sa.fr	Équipements inox pour l'industrie Séchage des herbes aromatiques www.robertbas.com
SARGI	5, rue Guy Moquet 95100 Argenteuil France +33 (0)1.41.83.76.66 info@sargi.com	Brûleurs à gaz industriels https://sargi.com
SERAIL - TECH ENGINEERING	Responsable vente Europe : A. BEUREL +33 (0)6.35.29.49.96 alexandre.beurel@serail.com	Lyophilisateurs pour l'industrie pharmaceutique et sécheurs à zéolite https://www.serail-technology.com/contact-serail/
SOGEBUL	22, route de Dole 39800 Poligny France +33 (0)3.84.73.78.20 contact@sogebul.fr	Stores utilisables pour des claies https://sogebul.fr
SOLAR BROTHER	+33 (0)1.42.36.15.07	Séchoirs solaires https://www.solarbrother.com
SOLYVENT-VENTEC	+33 (0)3.27.63.16.64	Ventilateurs / réchauffeurs https://fr.chartindustries.com/Products/Centrifugal-Fans
TAUROESSICATORI	Via del Lavoro 6 36043 Camisano Vicentino Italie +39 (0)444 719046 info@tauroessicatori.com	Séchoirs domestiques et professionnels https://www.tauroessicatori.com



Entreprise	Contact	Matériel / Lien vers le site
TOM PRESS	ZA de la Condamine 81540 Soreze France +33 (0)5.63.71.44.99 info@tompress.com	https://www.tompress.com
TROTEC	Rue du Dépôt 67207 Niderhausbergen France +33 (0)3.90.29.48.12 online-fr@trotec.com	Ventilateurs, déshumidificateurs... https://fr.trotec.com
VENTMECA	Direction commerciale : 1 rond-point de l'Europe 92250 La Garenne-Colombes France +33 (0)1.42.42.65.69 Site de production : Rue du Moulin des Forges 60860 Saint-Omer en Chaussée France +33 (0)3.44.84.50.36	Ventilateurs https://www.ventmeca.fr/index.html
WEISHAAPT SAS	21, rue André Kiener 68012 Colmar Cedex France +33 (0)3.89.20.50.50 info@weishaupt.fr	Pompes à chaleur, chaudières, brûleurs https://www.weishaupt.fr
WOLF ANLAGEN-TECHNIK	info.lt@wolf-geisenfeld.de	Système de récupération de chaleur, séchage (houblon) https://www.wolf.eu/fr-fr/solutions



QUELQUES OUVRAGES SUR LE SÉCHAGE DES PPAM

SÉCHAGE

- ITEIPMAI, 1995. Le séchage, des principes... à la définition de votre installation
- Guide PPAM. Le guide de référence de la filière plantes à parfum, aromatiques & médicinales pour la production biologique et conventionnelle (6ème édition). 2022. (Pages 149-154)
- Claudet E., Marie V., 2015. Séchage des plantes aromatiques et médicinales, Inter Bio Corse
- Chambre d'agriculture Occitanie, 2020. Le séchage des plantes à parfums aromatiques et médicinales séchées en agriculture biologique (Eléments technico-économiques pour l'Occitanie)

SÉCHAGE SOLAIRE

- Couturier C., Lhoste B., Pointereau P., 1989. Le séchage solaire des plantes aromatiques et médicinales, Guide de conception et d'utilisation d'un séchoir.
- Gerbranda W. Le séchage solaire, Altitudes



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Couturier, C., Lhoste, B., Pointereau P., Salomon, T., Bernard, J.-L., Jauré, S., ... Gares, R. (1989). Le séchage solaire des plantes aromatiques et médicinales. Guide de conception et d'utilisation d'un séchoir. Archimed, Gefosat, Solagra.
2. Claudet, E., & Marie, V. (2015). Séchage des plantes aromatiques et médicinales. San Giuliano: Inter Bio Corse. Consulté à l'adresse <https://interbiocorse.org/guides-et-fiches-techniques/>
3. Gerbrandra, W. (2004). La culture des plantes aromatiques et médicinales en bio. Éditions du Fraysse.
4. Yvin, C. (coord). (2022). Guide PPAM. Le guide de référence de la filière plantes à parfum, aromatiques et médicinales pour la production biologique et conventionnelle (6e édition.). Chambre d'Agriculture de la Drôme. Consulté à l'adresse <https://drome.chambres-agriculture.fr/actualites-de-la-drome/detail-de-lactualite/ppam-plantes-a-parfum-aromatiques-et-medicinales>
5. Le Terre dei Savoia, DISAFA, FranceAgriMer, & CRIEPPAM. (2020). ESSICA - Résultat des expérimentations du projet - Application des techniques innovantes pour le développement de la filière transfrontalière des plantes aromatiques. Projet Interreg ALCOTRA ESSICA. Consulté à l'adresse <https://www.franceagrimer.fr/Actualite/Filieres/Plantes-a-parfum-aromatiques-et-medicinales/2021/Resultats-du-projet-Essica-Innovation-de-procedes-pour-la-filiere-des-plantes-aromatiques-et-medicinales-seches>
6. CPPARM, Phytolia, & ITEIPMAI. (2017). Qualité des plantes à parfum, aromatiques et médicinales. Guide pratique (Edition 2017.). Manosque: CPPARM.
7. Bonduau, S., & Joliet, T. (2013). Procédés et techniques de séchage de PPAM Bio à la ferme. CAB Pays de la Loire. Consulté à l'adresse <http://www.biopaysdelaloire.fr/publications/fiches-techniques/>
8. Henry, C., & Simonnet, X. (1995). Le séchage: des principes à la définition de votre installation. ITEIPMAI publications.
9. Aeschlimann, T., Christ, B., Bernasconi, L., Carron, C.-A., Gammeter, M., Studer, A., & Simonnet, X. (2021). Plantes aromatiques et médicinales. Fiches techniques. Lausanne: AGRIDEA. Consulté à l'adresse <https://agridea.abacuscity.ch/fr/A~1196/0~0~Shop/Plantes-aromatiques-et-m%C3%A9dicinales-Classeur-de-fiches-techniques>
10. CPPARM. (2018). ESSICA - WP 3.2. Innovations organisationnelles dans le processus de transformation des plantes aromatiques. Projet Interreg ALCOTRA ESSICA. Consulté à l'adresse <https://www.franceagrimer.fr/filiere-plantes-a-parfum-aromatiques-et-medicinales/Actualites/2018/Essica-rapport-Les-innovations-organisationnelles-dans-le-processus-de-transformation-des-plantes-aromatiques>
11. Dufour, A., Lemoine, J., Naveau, F., Rodriguez, J., & Waziniak, S. (2022). Analyse des méthodes de séchage du houblon (Rapport de projet en agriculture). Junia ISA.
12. Le Berre, B., Ahmich, H., & Hop, E. (s. d.). Etat de l'art - séchoir de houblon. Document interne Hopstock Agromécanique.
13. HOPEN, Terre de Houblon. (s. d.). Sécher le houblon - Une étape clé. HOPEN Houblon. Consulté 18 novembre 2024, à l'adresse <https://hopenhoublon.fr/blog/secher-le-houblon-n4>
14. Davis, J., & Hamilton, A. (2008). Dryers for commercial herb growers: a construction guide. North Carolina State University.



15. Le True Hopping? C'es quoi? (s. d.). True Hopping. Consulté 18 novembre 2024, à l'adresse <https://www.true-hopping.com/le-true-hopping>
16. CTCPA. (2017). ESSICA - WP3.1.2. Technologie de séchage: zéodratation. Projet Interreg ALCOTRA ESSICA. Consulté à l'adresse <https://www.franceagrimer.fr/filiere-plantes-a-parfum-aromatiques-et-medicinales/Actualites/2018/Plantes-medicinales-FranceAgriMer-partenaire-du-projet-Essica>
17. Zéodratation par confinement. (2024). Millennium Energy S.A. Zeodryplus-Europe. Consulté 18 novembre 2024, à l'adresse <https://zeodryplus-europe.fr/>
18. Qu'est-ce que la cogénération? (2024). Connaissance des Energies. Consulté 18 novembre 2024, à l'adresse <https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/quest-ce-que-la-cogeneration>
19. CRIEPPAM. (2017). Séchage des plantes aromatiques et médicinales. Compte-rendu technique CRIEPPAM 2016.
20. Ministère du Partenariat avec les territoires et de la Décentralisation, Ministère de la Transition écologique, de l'Énergie, du Climat et de la Prévention des risques, & Ministère du Logement et de la Rénovation urbaine. (2020). Loi énergie-climat. Ministères Territoires Ecologie Logement. site institutionnel. Consulté 18 novembre 2024, à l'adresse <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/loi-energie-climat>
21. Energie photovoltaïque. (s. d.). EDF solutions solaires. Consulté 18 novembre 2024, à l'adresse <https://www.edf-solutions-solaires.com/lexique/energie-photovoltaique/>
22. Halter, P., & Pineau, C. (2016). En bovins viande, rentabiliser le séchage en grange grâce au photovoltaïque. IDELE, Institut de l'élevage. Consulté à l'adresse https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/idele_945
23. Morretti, F. (2019). Le séchage en grange thermovoltaïque, une solution pour sécuriser la production fourragère. In Recueil de communications (p. 18). Présenté à 3èmes Biennales des Conseillers Fourragers, Poisy. Consulté à l'adresse https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/idele_149
24. Groupe Roy Energie. (2024). La technologie thermovoltaïque: comment ça marche? Groupe Roy Énergie. Consulté 18 novembre 2024, à l'adresse <https://www.gre-enr.fr/thermovoltaique/>
25. Bilan carbone du chauffage bois: quelles émissions de CO2 pour la biomasse? (2024). Heero. Consulté 18 novembre 2024, à l'adresse <https://heero.fr/guide-travaux/chauffage/chauffage-ecologique/quel-est-le-bilan-carbone-du-chauffage-au-bois/>
26. Bazin, F., David, L., Heuroux, T., & Jeziorny, T. (2014). Energie et territoire: Valorisation de la chaleur produite par la méthanisation (Bibliographie Projet Pro 2013-2014). ENSAIA. Consulté à l'adresse <http://ensaia.univ-lorraine.fr/telechargements/valorisation-de-la-chaleur-produite-par-la-methanisation2014.pdf>
27. Lindner, C., Schmelzer, E., & Vogt-Kaute, W. (2020). Utilisation de la chaleur résiduelle des méthaniseurs pour sécher les légumineuses fourragères. Projet OK-Net EcoFeed. Consulté à l'adresse <https://organic-farmknowledge.org/fr/tool/37511>
28. Ouali, S. (2008). La technologie du séchage géothermique. CDER review, 229-236.
29. Géothermie. (2024). Connaissance des Energies. Consulté 18 novembre 2024, à l'adresse <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/geothermie>
30. Vignolles - Solutions de séchage sur-mesure. (s. d.). Vignolles - Drying Process. Consulté 18 novembre 2024, à l'adresse <https://ets-vignolles.com/>



31. Dufresne, C. (2008). Séchage des plantes médicinales à la ferme. Documentation et plan d'un séchoir artisanal. Filière des Plantes Médicinales biologiques du Québec. Consulté à l'adresse <https://www.agrireseau.net/agriculturebiologique/documents/73921/documentation-d-une-technologie-simple-pour-le-sechage-de-plantes-medicinales-a-la-ferme>
32. Chambre d'agriculture Occitanie (Éd.). (2020). Le séchage des plantes aromatiques et médicinales en agriculture biologique. Consulté à l'adresse https://occitanie.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Occitanie/Productions_techniques/FT-Sechage-web.pdf
33. Peacock, V., Arendt, B., Thiel, R., Gura, M., & Chadwick, L. (2018). A Comparison of Hop Drying with Unheated, Dehumidified Air Versus Traditional Drying with Heated Air. *MBAA Technical Quarterly*, 55(3), 63-66. <https://doi.org/10.1094/TQ-55-3-1108-01>
34. CTCPA. (2017). ESSICA - WP3.1.2. Technologie de séchage : séchage sur claies à l'air ambiant. Projet Interreg ALCOTRA ESSICA.
35. CRIEPPAM. (2020). Amélioration de la chaîne de transformation des plantes aromatiques séchées: conseils, dimensionnement, expertise. *Compte-rendu technique Réseau PPAM 2019*, 386-389.
36. Brejon, P. (1981). Le séchage des plantes aromatiques et médicinales. Etude de principe. SORETEL.
37. Innovations dans le séchage du houblon. (2023). hopstockagromecanique.fr. Consulté 18 novembre 2024, à l'adresse <https://www.hopstockagromecanique.fr/innovations-sechage-houblon/>
38. Joliet, T. (2010). Etude comparative de systèmes de séchage par déshumidification en Franche-Comté. CFPPA de Montmorot.
39. Delavaud, M. (2007). Séchage du tabac Virginie: maîtriser l'énergie. ANITTA.
40. Four Tabac à flux d'air. (s. d.). De Cloet Italy. Consulté 18 novembre 2024, à l'adresse <http://www.decloet.it/fr/produits/sechage.html>
41. Leborgne, G. (2022). Autonomie protéique: les leviers d'action. « Le séchage en grange pour améliorer la qualité de mes fourrages ». *CAP Protéines*. Consulté à l'adresse <https://www.cap-proteines-elevage.fr/recherche?levier=96>
42. CRIEPPAM. (2018). Séchage des plantes aromatiques et médicinales. *Compte-rendu technique CRIEPPAM 2017*.
43. Wright, J. (2016). L'Herbier du Diois innove dans le séchage des PPAM. *La Luciole*, 11, 10 à 11.
44. Le Terre dei Savoia, DISAFA, FranceAgriMer, & CRIEPPAM. (2017). ESSICA - WP3.1.3. Rapport de l'enquête auprès des producteurs et transformateurs sur leurs besoins en termes de séchage et débactérisation et emballages en France. Projet Interreg ALCOTRA ESSICA. Consulté à l'adresse <https://www.franceagrimer.fr/filiere-plantes-a-parfum-aromatiques-et-medicinales/Actualites/2018/Plantes-medicinales-FranceAgriMer-partenaire-du-projet-Essica>
45. Felzines, M. (2016). Utiliser l'énergie solaire pour sécher les plantes. *La Luciole*, 12, 11 à 11.
46. Accueil - Constructeur de déshumidificateurs pour toutes les cultures sous serre et indoor. (s. d.). AirGaïa. Consulté 18 novembre 2024, à l'adresse <https://www.airgaia.fr/>
47. La solution R' Booster. (2024). Air Booster. Consulté à l'adresse <https://www.airbooster.fr/solution-r-booster/>



48. De Marchi, D., & Fournier, F. (2018). Systèmes de séchage innovants: présentation et témoignages d'acteurs. Présenté à 4èmes rendez-vous d'Herbalia. Les PPAM et l'agriculture Nouvelle, Chemillé-en-Anjou. 17-18/01/2018. Consulté à l'adresse <https://youtu.be/yAHVKrykVdg>

49. Jonas. (2015). Séchoir PPAM avec inertie thermique et bâtiment -. Forum L'Atelier Paysan. Consulté à l'adresse <https://forum.latelierpaysan.org/viewtopic.php?t=3156>

CREDITS PHOTOS

Page 1 : Plantes suspendues de annashevelevich, Freepik - Dried Cornflower Petals de ArtRepublic - Closeup of dried hops for beer background de Wirestock, Getty Images - Pile of Calendula Flowers de chamillewhite /// Page 9 : Bâtiment photovoltaïque, EDF solutions solaires /// Page 10 : Unité de méthanisation, Solagro /// Page 11 : Mini séchoir mobile et Benne séchante, ETS Vignolles. Claies de séchage sur une étagère (cadre bois et tissu PE 22.30), Diatex (Division Agrotextiles) /// Page 12 : Tissu PE 22.30 (Diatex), compatible usage alimentaire pour claies de séchage, Diatex (Division Agrotextiles). Store utilisable pour des claies, Sogebul /// Page 13 : Ventilateur centrifuge et Ventilateur hélicoïdal, AEIB Ventilateurs /// Page 15 : Déshumidificateur TROTEC, Trotec. Déshumidificateur REXAIR, Rexair. Déshumidificateur NEVO, Nevo /// Page 19 : Schéma de fonctionnement du séchage multi-niveaux du houblon, Hopen, Terre de Houblon /// Page 21 : Enceinte du séchoir à biomasse auto-construit et Chaudières à biomasse alimentant le séchoir à houblon, Nellia PELARDY /// Page 22 : Intérieur et extérieur du séchoir, Catherine Mahé /// Page 23 : Séchoir type armoire pour PPAM, M. Bucher AG /// Page 25 : Séchoir armoire avec déshumidificateur et Claies de séchage dans le séchoir armoire, Laurent HALTEL /// Page 26 : Four à tabac, Gome; Four à tabac avec peignes (pour le séchage du tabac), Agriexpo /// Page 31 : Thermohygromètre PCE-THD-50, PCE Instruments. Thermohygromètre BC21, Trotec /// Page 33 : Schéma de fonctionnement du système AirGaïa, AirGaïa /// Page 33 : Modélisation du séchoir à houblon HOPSTOCK, Hopstock. Schéma de la technologie R'Booster pour le réchauffage de l'air de séchage, Air Booster

