



Séchage solaire des produits agricoles en Europe



THERMIE (1990-1994)

Il s'agit d'un important programme de la Communauté européenne destiné à promouvoir une utilisation plus large de la technologie énergétique européenne. Son but est d'aider la Communauté européenne à réaliser ses objectifs fondamentaux, à savoir :

- améliorer les perspectives de l'Union Européenne en matière de fourniture d'énergie ;
- diminuer la pollution de l'environnement grâce à la réduction des émissions, notamment de CO₂, SO₂ et NO_x ;
- renforcer la compétitivité de l'industrie européenne, et avant tout de petites et moyennes entreprises (P.M.E.) ;
- favoriser le transfert de technologie vers les pays tiers ;
- consolider la cohésion économique et sociale au sein de l'Union Européenne.

La plupart des fonds du programme THERMIE sont consacrés au soutien financier de projets destinés à appliquer des technologies énergétiques nouvelles et innovatrices à la production, à la conversion et à l'utilisation de l'énergie dans les domaines suivants :

- l'utilisation rationnelle de l'énergie dans les bâtiments, l'industrie, l'industrie de l'énergie et les transports ;
- les sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire, l'énergie provenant de la biomasse et des déchets, ainsi que l'énergie géothermique, hydroélectrique et éolienne ;
- les combustibles solides, l'utilisation des déchets gazeux, liquides et solides, ainsi que la gazéification à l'intérieur de cycles combinés ;
- les hydrocarbures, leur exploration, production transport et stockage.

Le programme THERMIE (1990-1994) prévoit aussi des fonds destinés à une meilleure diffusion de l'information afin de favoriser une application et une utilisation plus larges des technologies énergétiques qui ont fait leurs preuves. Cette information est rassemblée, par exemple, dans des publications telles que cette maxibrochure. Les maxibrochures constituent une source d'informations inestimable pour ceux qui désirent découvrir la pointe du progrès dans une technologie particulière ou dans un secteur particulier. Les informations qu'elles contiennent proviennent de tous les Etats membres et permettent ainsi d'apprécier la situation au niveau pan-européen.

Afin de garantir l'efficacité maximum des fonds disponibles, le programme THERMIE (1990-1994) est doté d'un élément dont

Remerciements :

Nous remercions les organismes suivants pour leur contribution à

- Région Rhones-Alpes (F)
- Association SOLAGRO (F)
- Centro de Estudos em Energia da Energia dos Transportes e Energia
- Association Savoyarde pour le Développement des Energies Renouvelables (F)
- Chambre d'Agriculture (EDE) Haute-Savoie (F)
- Agricultural University of Norway (N)
- Centre d'Études Drômois sur les Énergies Renouvelables (F)
- Landtechnik Weihenstephan (D)
- Provincia Autonoma di Trento (I)
- Station fédérale de recherches en économie et technologie agricole (D)
- Universität Hohenheim (D)

Il s'agit d'un important programme de la Communauté européenne destiné à promouvoir une utilisation plus large de la technologie énergétique européenne. Son but est d'aider la Communauté européenne à réaliser ses objectifs fondamentaux, à savoir :

JOULE-THERMIE (1995-1998)

Le programme JOULE-THERMIE pour la "démonstration" et la promotion de nouvelles technologies, propres et performantes dans le domaine de l'énergie, des énergies renouvelables, des combustibles solides, et des hydrocarbures est destiné à promouvoir les activités promotionnelles avec celles de

Le programme JOULE-THERMIE (1995-1998) est plus connu sous le nom de "programme JOULE" et se trouve au sein du quatrième programme de la Communauté européenne pour le développement technologique. Le programme JOULE-THERMIE est financé par le traité de l'Union européenne et les gouvernements nationaux. Pour la première fois, les gouvernements nationaux ont financé la recherche et le développement de technologies d'énergie et de "démonstration".

Le programme JOULE-THERMIE est financé par le traité de l'Union européenne et les gouvernements nationaux.

Le programme JOULE-THERMIE est financé par le traité de l'Union européenne et les gouvernements nationaux.

Le programme JOULE-THERMIE est financé par le traité de l'Union européenne et les gouvernements nationaux.

Le programme JOULE-THERMIE est financé par le traité de l'Union européenne et les gouvernements nationaux.

Le programme JOULE-THERMIE est financé par le traité de l'Union européenne et les gouvernements nationaux.

Le programme JOULE-THERMIE est financé par le traité de l'Union européenne et les gouvernements nationaux.

Le programme JOULE-THERMIE est financé par le traité de l'Union européenne et les gouvernements nationaux.

Le programme JOULE-THERMIE est financé par le traité de l'Union européenne et les gouvernements nationaux.

Séchage solaire des produits agricoles en Europe

PROGRAMME THERMIE ACTION N° SE 22



Pour la Commission Européenne
Direction Générale de l'Énergie

Membre du réseau des OPET
RARE : RhonAlpÉnergie-Environnement
10, rue des Archers
69002 - Lyon - FRANCE
Tél : (33) 78 37 29 14 - Fax : (33) 78 37 64 91

Toute reproduction du contenu est soumise à une autorisation préalable de la Commission Européenne.

Ni la Commission Européenne, ni aucune personne agissant en son nom, ne peut : (a) offrir la moindre garantie ou représentation, expresse ou implicite, concernant les informations contenues dans le présent rapport ; ni (b) être tenue pour responsable de l'utilisation ou d'éventuels dommages résultant de l'utilisation de ces informations.

L'opinion exprimée dans cette publication ne reflète pas forcément celle de la Commission.

Production : O' Graphica

Rédaction : Association SOLAGRO

Photos : Association SOLAGRO / X

Couverture : Séchoir solaire de fourrages (Haute-Savoie, France)

Mars 1996

SOMMAIRE

	Page
A. SÉCHAGE SOLAIRE : ASPECTS GÉNÉRAUX	7
1. Introduction	7
2. Développement actuel, impacts énergétiques et environnementaux	7
2.1 Le séchage solaire : une réalité en Europe	7
2.2 Gisement solaire en Europe	10
2.3 Impacts énergétiques et environnementaux	10
3. Principes et technologies des séchoirs solaires	11
3.1 Principe du séchage des produits agricoles	11
3.2 Les énergies du séchage	14
3.3 Principe des capteurs solaires	15
3.4 Technologies des capteurs solaires	16
4. Aspects économiques du séchage solaire	19
4.1 Comparer ce qui est comparable	19
4.2 Les durées d'utilisation du système	19
4.3 Séchage solaire de fourrages comparé au séchage au fioul	20
4.4 Séchage solaire de riz comparé à un séchage classique au gaz	20
5. Filières d'applications	21
5.1 Séchage solaire des fourrages	21
5.2 Séchage solaire des grains	24
5.3 Séchage solaire des plantes aromatiques et médicinales	26
5.4 Séchage solaire des fruits	28
6. Pour le développement du séchage solaire en Europe	29
B. ÉTUDES DE CAS	31
1. Séchage solaire de fourrages en France (Savoie)	31
2. Séchage solaire de fourrages en Italie	31
3. Séchage solaire de fourrages en Suisse	32
4. Séchage solaire de fourrages en France (Ariège)	32
5. Séchage solaire de fourrages en balles rondes en Allemagne (Bavière)	33
6. Séchage solaire de fourrages en balles rondes en Allemagne (Munich)	34
7. Séchage solaire de fourrages et de grains en Norvège	34
8. Séchage solaire de riz au Portugal	35
9. Séchage solaire de grains en Norvège	36
10. Séchage solaire de grains en France	36
11. Séchage solaire de plantes aromatiques en Allemagne	37
12. Séchage solaire de plantes aromatiques en France	37
13. Séchage solaire de fruits en France	38
C. LISTE D'ORGANISMES DE DÉVELOPPEMENT DU SÉCHAGE SOLAIRE	40
D. RÉFÉRENCES SÉLECTIONNÉES	41

A. SÉCHAGE SOLAIRE : ASPECTS GÉNÉRAUX

1. Introduction

Le séchage : un mode de conservation efficace des productions agricoles

La mise au point de systèmes de conservation efficaces des produits agricoles est l'un des facteurs importants de l'évolution quantitative et qualitative de l'agriculture européenne. La réfrigération et les autres techniques du froid ont révolutionné la gestion des ressources alimentaires. L'anaérobiose et les techniques d'ensilage dans les années 70 ont permis de répondre aux besoins d'intensification des surfaces fourragères. Cependant, le séchage des produits agricoles, un des modes les plus anciens de conservation, est encore aujourd'hui, un des plus répandus dans le monde. Il est bien souvent le plus facile à mettre en oeuvre, le plus économique, et sa maîtrise permet maintenant d'assurer une conservation quasi-parfaite des produits.

Avec au moins 2 millions de tep - tonnes d'équivalent pétrole - utilisées par an en Europe pour le séchage des produits agricoles en exploitations (hors coopératives et négociants en céréales), ce secteur constitue un domaine d'économies d'énergie potentielles important.

Le recours à l'énergie solaire, énergie renouvelable, non polluante, de mobilisation relativement aisée, adaptable à de multiples situations, constitue une voie très intéressante, compatible avec la montée des préoccupations environnementales en agriculture.

Son emploi est d'ailleurs très ancien pour ce type d'utilisation : l'image des tas de foin dans nos vertes campagnes fait partie des clichés-type de l'agriculture traditionnelle, de même pour les céréales (riz, maïs, ...) ou les fruits, légumes, plantes aromatiques et médicinales habituellement conservés par cette voie.

Mais des progrès ont été faits pour rendre plus efficaces et économiques ces pratiques artisanales.

Quinze ans de séchage solaire

A la suite du premier choc pétrolier, et dans l'élan des actions de développement vers le tiers-monde, des équipes de recherche se sont penchées sur les possibilités d'emploi de l'énergie solaire dans des domaines très divers.

Parmi les secteurs les plus prometteurs et les plus consommateurs d'énergie, le séchage des produits agricoles a retenu l'attention de nombreux chercheurs. Les études ont été menées dans de nombreux pays, industrialisés ou non, du Sud et du Nord, selon des pistes souvent en rapport avec le contexte local.

Depuis quinze ans, de nombreuses recherches et expérimentations de séchoirs solaires ont été menées en Europe et dans le monde. Elles ont permis de mettre au point des techniques aujourd'hui matures qui connaissent, dans divers pays, un développement important. Plusieurs pays européens comptabilisent chacun au moins une centaine d'installations solaires.

Les besoins de séchage des pays européens sont très variés, mais les principales voies développées le sont pour les fourrages pour nourrir les animaux l'hiver, les grains stockés à la ferme pour l'autoconsommation ou pour la vente différée, les fruits et légumes, les plantes aromatiques et médicinales ... La conservation et le séchage de tous ces produits reposent sur des principes identiques, pour lesquels l'énergie solaire est bien adaptée.

Les principales techniques sont simples et la plupart du temps mises en oeuvre par les agriculteurs ou des artisans locaux. Elles s'appuient sur des capteurs thermiques avec ou sans effet de serre, qui permettent le réchauffage direct de l'air de ventilation. Des systèmes plus industrialisés existent également.

L'évolution de l'agriculture et la prise en compte des préoccupations environnementales - gestion des ressources naturelles (énergie en particulier), qualité des produits, réduction des émissions polluantes, ... donnent aujourd'hui des chances réelles de développement au séchage solaire des produits agricoles.

2. Développement actuel, impacts énergétiques et environnementaux

2.1. Le séchage solaire : une réalité en Europe

Une enquête d'identification des équipes de recherche & développement menée en 1991 auprès de l'ensemble des pays européens fait apparaître que :

- 45 équipes environ détiennent des compétences en matière de séchage solaire; elles ont réalisé des séchoirs solaires et effectué des contrôles de performances.
- Quelques 2.500 séchoirs fonctionnent en Europe occidentale, dont 700 à 800 dans l'Union Européenne (à quinze).
- Le séchage solaire est beaucoup plus développé dans les pays du Nord de l'Europe (pour le fourrage et les grains) que dans ceux du Sud.
- Le développement le plus important concerne le séchage du fourrage avec près de 2.000 installations, suivi par le séchage des grains (céréales essentiellement) avec environ 400 installations. Les séchoirs solaires des autres produits sont peu nombreux, de l'ordre de quelques installations par pays.

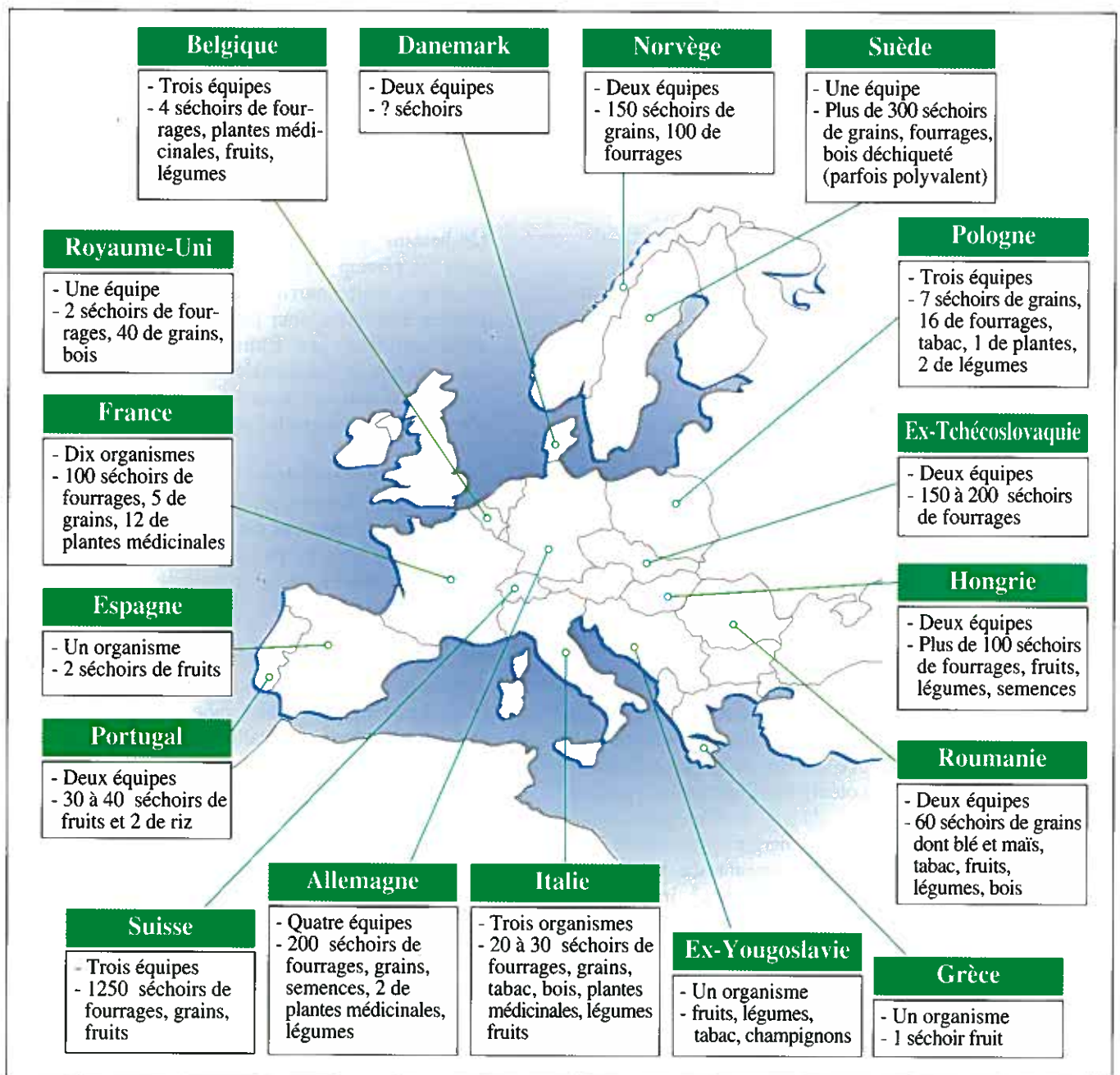


Figure 1 : État du développement du séchage solaire des produits agricoles en Europe. Pour chaque pays, nombre d'équipes et de séchoirs, et type de produits concernés. Solagro - 1992

Cet état de développement est issu de contextes très variés d'un pays à l'autre et dépend des produits agricoles à sécher. Quatre critères doivent être réunis : techniques, structurels, économiques et contextuels (cf. tableau 1).

Fourrages : un développement corrélé avec celui du séchage en grange.

Si le séchage solaire des fourrages est l'application la plus répandue, c'est parce qu'il a pu se greffer sans difficulté sur le séchage en grange, une technique apparue dans les années 1950 et qui s'est développée lorsque la mécanisation de la chaîne de récolte a remplacé la manutention pénible des fourrages verts.

Et c'est très logiquement dans les pays où les besoins de séchage des fourrages sont les plus importants - Europe du Nord, zones de montagnes, que le séchage en grange

en général, et le séchage solaire en particulier sont les plus répandus.

Autre facteur jouant en faveur de l'implantation du séchage solaire : le séchage en grange est le mode de conservation fortement conseillé voire le seul autorisé dans certains bassins de production fromagère tels que le Comté, le Gruyère, l'Emmenthal, le Beaufort, la Tomme, le Reblochon ... et d'autre part le foin est le mode d'alimentation le plus adapté aux petits ruminants (moutons, chèvres) et aux chevaux.

Grains : une opportunité pour les exploitants et les petites structures collectives.

Le séchage solaire des grains intéresse surtout les particuliers et les petites structures de commercialisation

qui souhaitent une valorisation soit en alimentation animale au sein de l'exploitation, soit en vente différée avec parfois des productions spécialisées : biologique, alimentation humaine, semences.

Il intervient quand la récolte ne peut pas être effectuée aux normes d'humidité requises pour la commercialisation ou la conservation. C'est le cas de différentes céréales (blé, orge, avoine dans les pays tels que l'Allemagne, la Suède, la Norvège, et même le nord de la France ou la Grande-Bretagne, maïs et riz en France, Portugal, Espagne, Italie) ou des oléoprotéagineux dans les zones septentrionales de cultures (France, Italie, Allemagne).

Si le séchage solaire est adapté aux seules exploitations agricoles ou aux petites structures collectives, c'est parce que la surface de captation disponible est en adéquation avec les débits de séchage nécessaires. Pour d'importants organismes stockeurs telles les grosses coopératives, les surfaces convertibles en capteurs sont généralement insuffisantes.

**Plantes aromatiques et médicinales, fruits :
un développement handicapé par la concurrence internationale.**

Le séchage solaire de ces produits est en fait peu développé, et sauf pour certains pays tels que le Portugal ou la France, le nombre de réalisations est inférieure à une dizaine. Ceci tient au fait qu'une grande partie de ces produits est commercialisée en frais, et de plus s'ils sont séchés, ils sont soumis à la concurrence internationale. Le séchage solaire intervient donc quand une valorisation locale ou une reconnaissance de la qualité est possible : c'est en particulier le cas des produits biologiques, des produits vendus en circuit court, ou pour des besoins spécifiques de séchage ou d'industriels.

**Pays par pays, produit par produit :
un développement également conditionné par
l'implication des relais locaux.**

Dans certains pays, le stade de développement du séchage solaire est tel que sa dissémination est conduite avec le support des structures agricoles. Ce niveau de développement se rencontre surtout en Suisse, en Suède et en Norvège, et dans une moindre mesure en Allemagne ou dans certaines zones de France (Alpes) pour le séchage des fourrages, des grains ou des plaquettes de bois (spécificité scandinave) avec plusieurs centaines d'installations pour chacun de ces pays.

Dans d'autres pays tels que l'Italie (pour les fourrages), le Portugal (pour les fruits) ou certaines zones de France (Sud-Ouest), la technique de séchage solaire est peu présente et surtout promue par des "énergéticiens", des "universitaires" ou des structures de promotion des énergies renouvelables, donc en marge du développement agricole majoritaire. Le nombre d'installations est de l'ordre de quelques dizaines.

Il existe aussi des zones ou des pays, où pour diverses raisons, l'emploi du séchage solaire n'a connu aucun développement. Les réalisations solaires se comptent par unité, et restent bien souvent expérimentales. Ce ne sont pourtant pas les régions les moins favorables à cette technique du point de vue ensoleillement, tels que l'Espagne, le Portugal, la Grèce, l'Italie, si elle concerne surtout les plantes aromatiques et médicinales et les fruits.

Produits	Humidité initiale max.	Périodes de récolte	Débits de séchage (par jour)	Lieu de séchage	Type de production	Prix de l'énergie	Durée d'utilisation minimum	Politiques de développement	Savoir-faire
• Fourrages	45-50 %	Mai à sept.	2 à 10 t	Exploitations	- Production fromagère (ensilage interdit ou déconseillé) - Zones de montagnes	0,03 Ecu/kWh 0,04 0,06	26 j 20 j 13 j	- Autonomie production animale - Environnement - Maîtrise Energie	- Expérience solaire - Présence d'équipes de développement
• Grains • Semences	25 % 45 %	Nord : juin à sept. Sud : mai à oct.	Nord : 8-10 t Sud : 20 t	Exploitations et petites coopératives.	- Biologique - Semence - Qualité	0,03 Ecu/kWh 0,04 0,06	26 j 20 j 13 j	- Production qualité - Maîtrise de l'énergie	- Expérience solaire - Présence d'équipes de développement
• Fruits et légumes	50 % à 80 %		quelques kg à quelques tonnes /jour	Exploitations		Les systèmes solaires remplacent souvent le séchage traditionnel. L'intérêt économique est lié à l'obtention d'une meilleure qualité.		- Qualité - Développement du marché	- Expérience solaire - Présence d'équipes de développement
• P.A.M. Plantes Aromatiques et Médicinales	80 %	Mai à octobre	Récolte manuelle, quelques centaines kg/j. Récolte mécanisée qq t/j.	Exploitations et petites coopératives	- Biologique - Qualité			- Qualité - Développement du marché	- Expérience solaire - Présence d'équipes de développement

Tableau 1 : Critères favorables au séchage solaire des produits agricoles

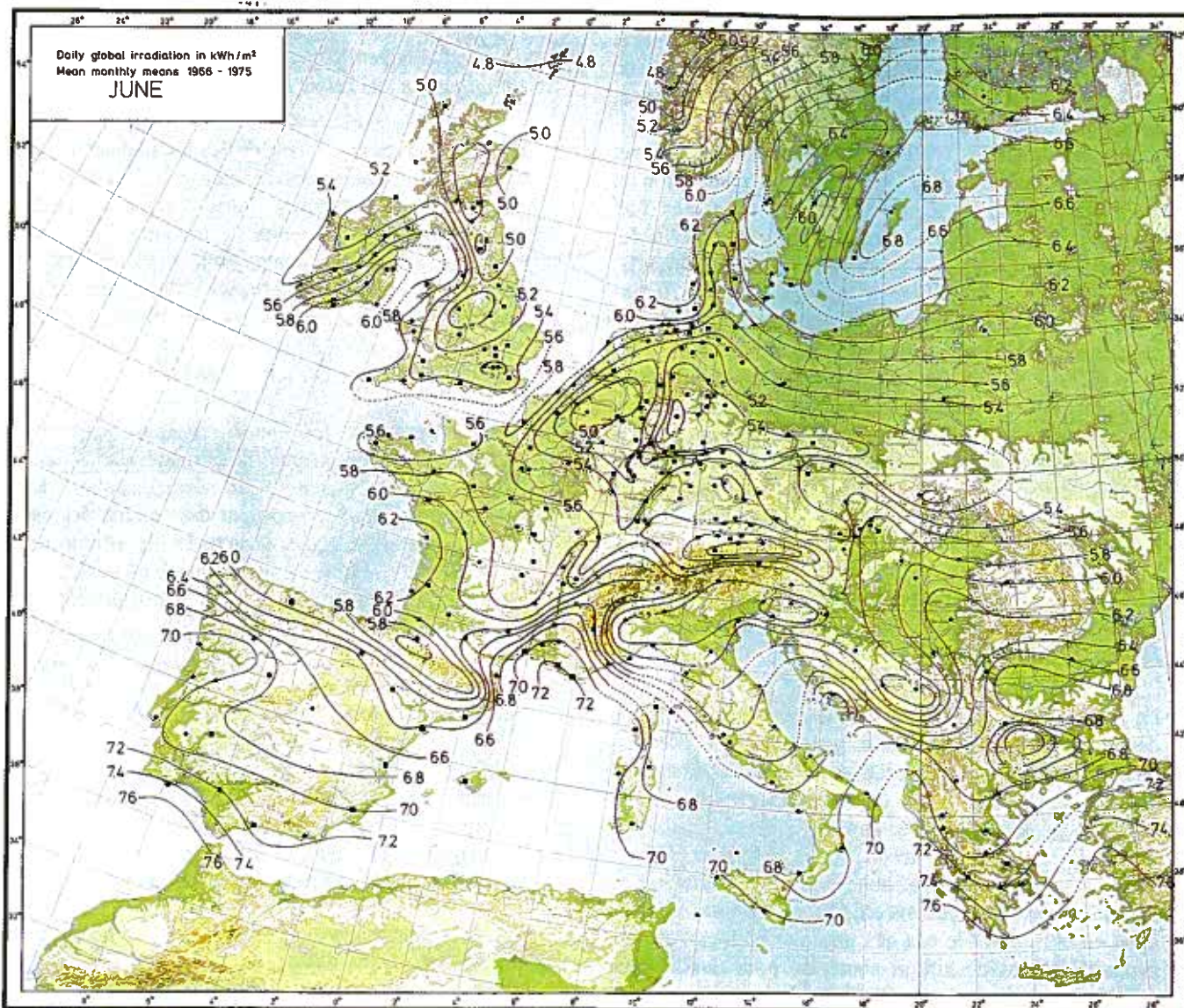


Figure n° 2 : Le rayonnement solaire global au mois de juin en Europe (exprimé en kWh/m²/jour)

2.2. Gisement solaire en Europe

Le soleil, une énergie disponible, où il faut et quand il faut !

Le rayonnement solaire entre le 36ème et le 62ème parallèle est forcément très différent. Toutefois, les plantes ayant un rythme de croissance en adéquation avec les conditions climatiques, le foin arrive à maturité dans le Sud de l'Europe au mois de mai avec un rayonnement solaire moyen de l'ordre de 5,5 à 6,5 kWh/m²/jour, et dans le Nord, au mois de juin avec un rayonnement solaire de l'ordre de 5 à 6 kWh/m²/jour pour les pays scandinaves. Le phénomène est équivalent pour les céréales telles que le blé ou l'orge avec un décalage d'un mois environ. L'énergie solaire pour le séchage est donc relativement disponible au moment des besoins potentiels de séchage. Ceci explique la présence de séchoirs solaires dans les pays à priori défavorables tels que les pays scandinaves et les zones de montagne.

D'autant plus que les besoins de séchage pour ces produits sont plus importants car le séchage au champ ne peut pas être réalisé correctement : les conditions ambiantes de l'air (température et humidité relative) ne sont pas suffisantes.

La captation du rayonnement solaire incident apporte alors un réel complément thermique adapté aux besoins de séchage.

Mais pas pour tous les produits ...

Le séchage solaire n'est toutefois pas adapté au séchage de certaines productions telles le maïs, qui est récolté avec des teneurs en humidité des grains trop importantes, ou encore les pruneaux d'Agen, ou le tabac blond qui nécessitent des protocoles de séchage très particuliers.

Et qui intéresse surtout les petites structures

Le séchage solaire ne permet pas en effet de sécher des volumes trop importants, d'où son utilisation préférentielle à la ferme, par les exploitants, ou par des structures coopératives ou privées de petite taille.

2.3. Impacts énergétiques et environnementaux

Les 700 à 800 séchoirs solaires existant en 1991 dans l'Union Européenne représentent une surface de captation

Pays	Types de produits séchés	Nombres d'installations solaires recensées	Quantités de produits séchés (en tonne de matières sèches)	Surface de capteur solaire (en m ²)	Economie d'énergie (en tep)
Allemagne	Fourrages P.A.M., légumes, grains	200 une dizaine	12 000 ?	50 000 ?	320 ?
Belgique	Fourrages, P.A.M., légumes	4	?	?	?
Espagne	Fruits, bois d'œuvre	2 1	? ?	300 ?	14 ?
France	Fourrages grains P.A.M. et fruits	100 5 12 à 15	12 000 3 500 30 à 35	35 000 2 000 700	300 à 350 26 33
Royaume-Uni	Fourrages grains	2 40	100 à 200 3 à 4 000	400 à 800 5 000 à 7 000	2,5 à 5 30 à 40
Grèce	Fruits, légumes	1	?	?	?
Italie	Fourrages fruits, P.A.M., légumes, tabac	20 à 30 moins d'une dizaine	5 000 ?	2 à 30 000 ?	53 à 80 moins de 10
Portugal	Grains fruits	quelques uns 30 à 40	1 000 à 1 500 35 à 40	1 000 4 000	7 à 10 40 à 50
Suède	Fourrages grains bois	100 200 quelques uns	8 000 20 000 ?	30 000 60 000 ?	200 200 ?
Total CEE		700 à 800		180 à 200 000	1 000 à 1 300

Tableau 2 : Nombre d'installations de séchage solaire dans les différents pays de l'Union Européenne, surface de capteurs solaires et énergie récupérée.

de près de 200 000 m² et permettent une économie d'énergie thermique fossile évaluée à plus de 1000 tep par an, soit l'équivalent de 1,2 millions de litres de fioul.

S'y ajoute une économie d'électricité pour le fonctionnement des ventilateurs de 30 à 50 % par rapport à une ventilation à l'air ambiant. C'est ainsi environ 500 tep supplémentaires d'énergie primaire économisée.

Une installation moyenne de séchage solaire de fourrages permet de substituer 1 à 4 tonnes équivalent pétrole par an. Cette énergie vient pour l'essentiel à la place de fioul domestique. Elle correspond donc à une réduction d'émission de 3 à 12 tonnes d'équivalent gaz carbonique par an, soit environ 5000 tonnes pour les installations de l'Union Européenne.

3. Principes et technologies du séchage solaire

3.1. Principe du séchage des produits agricoles

L'eau dans le produit ...

Pour éliminer l'eau d'un produit, deux voies principales existent :

- la voie mécanique qui met en oeuvre des procédés de pressage, d'égouttage, de décantation, de centrifugation,...; elle est surtout destinée à pré-sécher le produit (teneur en eau finale de l'ordre de 60%)

- la voie thermique soit par ébullition (vide, lyophilisation, ...), soit par entraînement.

Le séchage solaire des produits agricoles dans les exploitations est un des modes de séchage par entraînement qui consiste à faire traverser (ou "balayer") le produit à sécher par de l'air, qui peut circuler naturellement, ou le plus souvent par l'intermédiaire d'un ventilateur.

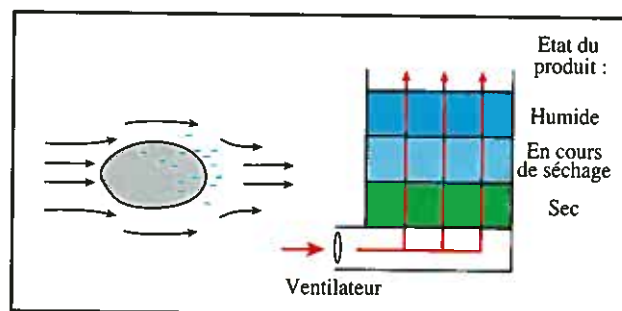


Figure 3 : le séchage, du microscopique au macroscopique

De manière simple, quand un produit végétal sèche, c'est l'eau en surface du produit qui est évaporée puis entraînée par un courant d'air - d'où le nom de séchage par entraînement. L'eau contenue à l'intérieur du produit migre vers la surface au fur et à mesure du séchage, où elle est à son tour évaporée puis évacuée.

Ce processus n'est pas uniforme. On distingue deux phases :

- dans un premier temps, le séchage est facile, le produit étant gorgé d'eau. On évapore l'eau "libre", c'est-à-dire l'eau qui s'évapore comme l'eau pure à l'air libre.

- dans un second temps, il faut évaporer l'eau "liée", fixée aux constituants du produit, qui se vaporise de plus en plus difficilement au cours du séchage.

Un séchage total, par exemple en étuve, aboutit à évaporer toute l'eau du produit. Il ne reste alors que la matière sèche.

Par exemple, pour le maïs, on évapore de l'eau libre jusqu'à atteindre une teneur de 27%. Puis c'est une eau osmotique - contenue dans les cellules du grain - jusqu'à 13%, et enfin une eau fortement absorbée par le grain, non solvante et liée au niveau moléculaire.

La quantité d'eau à évaporer dépend de la teneur en eau avant le séchage - en général c'est la teneur en eau à la récolte - et de la teneur en eau finale qu'il faut atteindre pour conserver le produit. Elle est d'autant plus importante que l'humidité initiale du produit l'est. Si la teneur en eau initiale passe de 40% à 55%, la quantité d'eau à évaporer est multipliée par deux.

Humidité initiale du produit	Eau à enlever (kg d'eau par tonne de produit à 15%)
80%	3 250 kg
70%	1 833 kg
60%	1 125 kg
55%	889 kg
50%	700 kg
45%	545 kg
40%	417 kg
35%	308 kg
30%	214 kg
25%	133 kg
20%	63 kg
15%	0 kg

Tableau 3 : Quantité d'eau à enlever à une tonne de produit sec (15%) en fonction de l'humidité initiale.

L'air doit évaporer cette eau...

L'air contient de l'eau sous forme de vapeur invisible. Cette quantité d'eau est variable : à 20°C par exemple, un mètre cube d'air peut contenir jusqu'à 17,2 grammes de vapeur d'eau. Au-delà, la vapeur se condense en fines gouttelettes : c'est le brouillard. On dit que l'air est saturé ou que son humidité relative est de 100 %.

Température (°C)	10	20	30
Quantité maximale de vapeur en gramme par m ³ à saturation	9.2	17.2	30.5

Le pouvoir évaporatoire de l'air est sa capacité à absorber de l'eau. Il est lié à sa possibilité de se refroidir : un air proche de la saturation a un pouvoir évaporatoire et une possibilité de refroidissement faibles, et inversement pour un air sec.

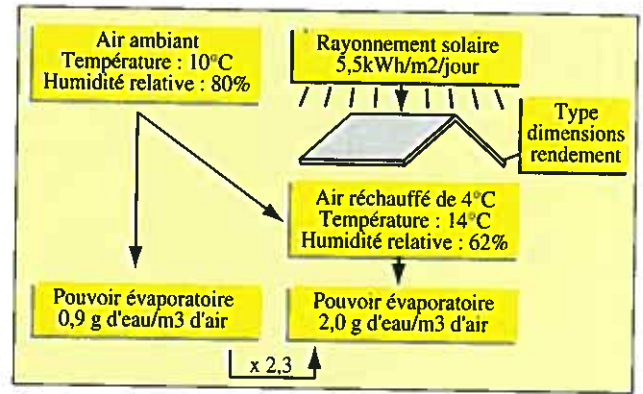


Figure 4 : Pouvoirs évaporatoires de l'air ambiant et réchauffé

Un air à 10°C et 80% d'humidité relative peut avant d'être saturé absorber 0,9 grammes de vapeur d'eau par mètre cube - sa température sera alors de 8,5°C. Réchauffé de 4°C - par exemple par un capteur solaire, l'air atteint 14°C et 62% d'humidité relative. Il peut alors absorber 2,1 grammes de vapeur d'eau par mètre cube. Son pouvoir évaporatoire est multiplié par 2,3.

Le séchage : une compétition entre l'eau de l'air et l'eau du produit

En raison de ces caractères propres aux produits vivants, on ne peut sécher un produit avec n'importe quel air : cet air doit être suffisamment sec pour pouvoir "aller chercher" l'eau liée. L'humidité de l'air est une caractéristique importante qui conditionne la teneur en eau finale du produit.

Le pouvoir évaporatoire réel de l'air de séchage prend en compte la résistance du produit à céder son eau, traduite par la courbe de sorption-désorption. Ce qui explique que l'air en sortie du séchoir n'est pas toujours saturé. C'est le cas par exemple quand l'épaisseur du produit est insuffisante, quand l'air traverse trop rapidement le produit, ou à la fin du séchage.

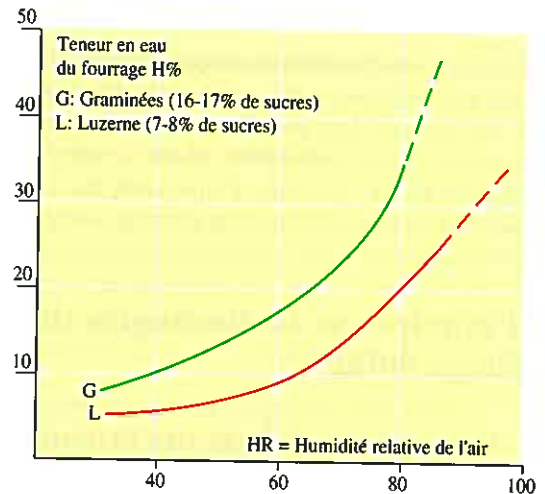


Figure 5 : Courbes de sorption des fourrages. (doc ITCF)
La teneur en eau des fourrages doit être inférieure à 15% pour une bonne conservation.
Les fourrages de type graminées nécessitent une humidité de l'air inférieure à 55% pour être stabilisés à 15%, alors que la luzerne nécessite une humidité de l'air inférieure à 75%.

Les conditions climatiques moyennes dans la plupart des pays ne permettent pas une humidité relative suffisamment basse pendant les périodes de séchage. Un air dont l'humidité est de 80% arrivera à sécher la luzerne à une

teneur en eau de 18% - ce qui peut être acceptable - alors que les graminées se stabiliseront à une teneur en eau de 30%, ce qui est insuffisant .

Le pouvoir évaporatoire de l'air doit donc être augmenté pour assurer un séchage efficace. Une faible élévation de température - de 3 à 5 °C en général - est un bon compromis entre les objectifs qualitatifs et quantitatifs du séchage, et des coûts d'investissement et de fonctionnement raisonnables. Elle permet de plus :

- la diminution du volume d'air nécessaire ou l'augmentation de la capacité de séchage,
- une rapidité et une sécurité de séchage accrues, surtout en fin de séchage.

région d'Oslo de doubler les capacités de séchage à l'origine assez faibles (passage d'un pouvoir évaporatoire réel de 0,7 g/m³ d'air à 1,5 g/m³) et de rendre possible le séchage par ventilation sur les régions côtières (passage d'un pouvoir évaporatoire réel nul à un pouvoir évaporatoire réel de 1 g/m³).

Les mêmes courbes établies dans les différents pays européens feraient apparaître des gains équivalents ou supérieurs.

Un séchage rapide pour maintenir la qualité initiale

La rapidité du séchage est un facteur important pour conserver la qualité initiale du produit.

Indépendamment des procédés mis en oeuvre, des contraintes spécifiques au produit doivent être respectées, telles qu'un seuil de température (par exemples : 42°C maximum pour maintenir le pouvoir germinatif des semences, altération des constituants de certains produits qui croît avec la température, risques éventuels d'incendie si la température est trop forte - cas du tournesol, ...), ou une humidité de l'air minimale (séchage du pruneau ou du tabac), ...

Mais le produit - qui reste vivant pendant et après le séchage - respire. Son activité respiratoire est d'autant plus forte que sa teneur en eau est élevée. Ainsi, un fourrage avec une teneur en eau de 45% perd 2% de matière sèche par jour. La diminuer rapidement permet de limiter la respiration du produit, et par conséquent les altérations qu'il subit.

Cette rapidité est liée aux conditions climatiques et aux choix des moyens de ventilation et de réchauffage de l'air. La puissance de ces moyens conditionne la rapidité du séchage et sa consommation énergétique.

Pour un même produit à sécher et avec des technologies identiques, l'augmentation de la quantité d'énergie mise dans le séchage permettra d'accélérer le rythme de séchage. Les dégradations du produit lors du séchage sont ainsi très limitées, voire totalement évitées, et sa qualité optimale.

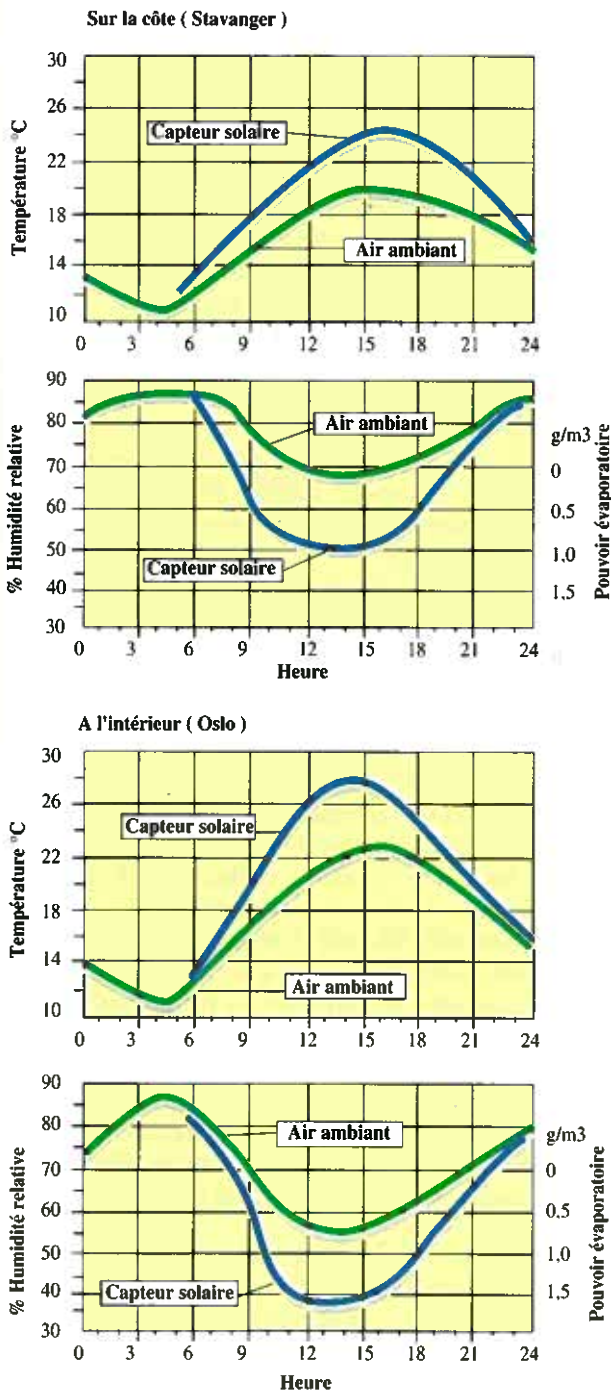
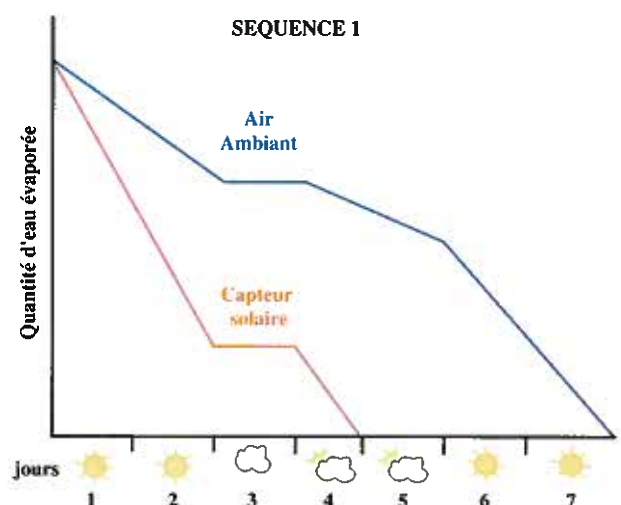


Figure 6 : Exemple du gain apporté en Norvège par le réchauffage solaire de l'air ambiant. Une augmentation de température de quelques degrés permet dans la



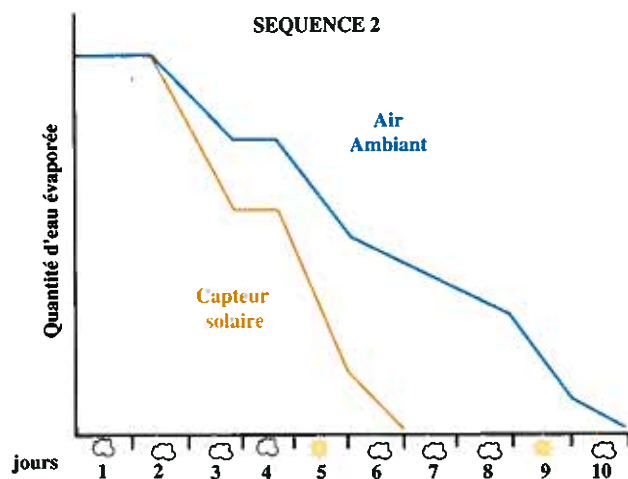


Figure 7 : Évolution de la quantité d'eau à évaporer pour deux séquences climatiques.

3.2 Les énergies du séchage

Parfois uniquement naturelles ...

Le séchage par convection naturelle utilise l'énergie naturelle du vent, de l'air et du soleil, tout en améliorant le processus de séchage naturel à l'air libre : le rayonnement solaire incident, piégé par différents matériaux, permet de donner à l'air une capacité supplémentaire d'accueil de vapeur d'eau. Il permet aussi de canaliser les mouvements de l'air, et éventuellement de protéger les produits à sécher du rayonnement solaire pour éviter leur dégradation non souhaitée. Ce procédé de séchage ne consomme pas directement d'énergie; il valorise les énergies ambiantes.

Mais souvent accompagnées par d'autres formes d'énergie

Le séchage par convection forcée peut mobiliser en plus de l'énergie de l'air ambiant des énergies complémentaires pour :

- d'une part mettre l'air en mouvement et contrôler son débit,
- et d'autre part donner une capacité d'accueil de vapeur d'eau supplémentaire en le réchauffant le plus souvent. Il consomme donc directement de l'énergie, l'une étant de l'électricité pour le fonctionnement du ventilateur, et l'autre étant "thermique" pour le réchauffement de l'air.

Optimiser les énergies

L'optimisation énergétique d'un séchoir vise à valoriser au mieux l'énergie thermique et l'énergie de ventilation, tout en respectant les objectifs quantitatifs et qualitatifs du séchage. La consommation spécifique d'énergie est le critère qui permet de mesurer l'efficacité du procédé de séchage. Elle prend en compte toutes les énergies consommées par le séchage, rapportées à la quantité d'eau évaporée.

Suivant les produits et le procédé, cette consommation spécifique varie, pour le séchage par convection forcée, de 0,1 à plus de 10 kWh par kg d'eau évaporée.

Exemples :

- le séchage solaire des fourrages a une consommation spécifique de 0,4 à 1 kWh/kg d'eau (dont 0,05 à 0,15 kWh électrique) en fonction de la durée de ventilation journalière, du rendement du capteur solaire, de la zone géographique et de la période de séchage. Le séchage en grange traditionnel a une consommation spécifique plus faible de l'ordre de 0,2 à 0,3 kWh/kg d'eau évaporée, qui s'explique par un séchage moins rapide, moins efficace et par une moindre qualité des fourrages.
- le séchage solaire des céréales a une consommation spécifique totale de 0,5 à 1,1 kWh/kg d'eau évaporée (dont environ 0,15 kWh électrique), alors que le séchage classique (systèmes à haute température) a une consommation spécifique de 1,1 à 2,5 kWh/kg d'eau.
- le séchage des plantes aromatiques et médicinales, ou des fruits, a une consommation spécifique de 4 à plus de 10 kWh/kg d'eau. L'enceinte de séchage - les claies - et la faible épaisseur de produit ne permettent pas la saturation de l'air. L'énergie thermique - pourtant nécessaire pour satisfaire les contraintes de séchage - est mal valorisée. Il est alors d'autant plus intéressant d'utiliser l'énergie gratuite du soleil.

L'intérêt de l'énergie solaire est son caractère renouvelable qui ne met pas en péril les ressources énergétiques mondiales ou nationales. Sa part est souvent prépondérante dans la consommation spécifique. La part d'énergie électrique - souvent fossile et payante - dans la consommation spécifique est souvent de l'ordre de 0,1 à 0,2 kWh/kg d'eau.

Des énergies renouvelables pour le séchage

Si les énergies fossiles sont souvent utilisées pour remplir ces fonctions, les énergies renouvelables peuvent intervenir à plusieurs niveaux :

- L'électricité du ventilateur peut provenir de l'hydraulique ou de groupes électrogènes utilisant des carburants tels que les huiles végétales, le bioéthanol et le biogaz. L'énergie solaire photovoltaïque est aussi utilisée dans plusieurs petits séchoirs de fruits, légumes et plantes; elle permet l'électrification du site et, en venant s'ajouter à l'énergie solaire thermique, la réalisation de séchoirs 100% solaires (plusieurs exemples existent).
- le réchauffage de l'air peut aussi provenir des biocombustibles tels que le bois, les huiles végétales, le biogaz, ... Indépendamment de l'investissement, ils représentent toujours un coût de fonctionnement.

Des capteurs solaires pour valoriser une énergie disponible et gratuite

Les vastes toitures des bâtiments agricoles - soumises en permanence au rayonnement solaire - constituent déjà des "capteurs solaires" simples et rustiques. Récupérer l'air chaud sous ces toitures est souvent facile : il suffit de canaliser l'air et de l'amener jusqu'au ventilateur.

Les capteurs solaires n'engendrent pas de coût de fonctionnement spécifique. Du point de vue énergétique, ils permettent d'augmenter le pouvoir évaporatoire de l'air, ce qui, comme on l'a vu, augmente la rapidité du séchage et évite la dégradation des produits.

Les capteurs solaires permettent aussi souvent de récupérer une quantité d'énergie qui ne serait pas consommée si elle devait être payée par l'exploitant.

Ainsi, par exemple, le séchage classique des fourrages est dans certaines zones réalisé avec un brûleur fioul en sécurité, utilisé en périodes défavorables - pluies, brouillard, ... La consommation de fioul est selon les années et la taille de l'installation de 1000 à 2500 litres par an. Mais l'essentiel du séchage est conduit à l'air ambiant. Des suivis de campagne effectués sur des séchoirs solaires montrent que le capteur solaire a permis de récupérer pendant les périodes de ventilation l'équivalent de 2000 à 5000 litres de fioul, et parallèlement de réduire la consommation électrique et la durée de séchage. Les agriculteurs équipés d'un brûleur n'auraient jamais accepté de dépenser ce fioul.

EXEMPLE :

SÉCHAGE DE 50 TONNES DE BLÉ OU D'ORGE

1ère étape : calcul de la quantité d'eau à évaporer

Teneur en eau initiale : 20%

Teneur en eau finale : 14%

Quantité d'eau à évaporer :

$$\frac{20-14}{100-20} \times 50\,000 \text{ kg sec} = 3\,750 \text{ kg d'eau}$$

2ème étape : détermination du débit d'air à partir des caractéristiques du produit

Masse volumique moyenne du blé/orge : 750 kg/m³

Volume de grain : 66 m³

Surface de stockage : 15 m²

Hauteur de grain : 4,4 m

Vitesse apparente de l'air dans le produit à sécher : 0,1 à 0,13 m/s (norme)

Débit d'air conseillé : 6 000 m³/h - 1,6 m³/s

Pression utile du ventilateur : 50 mm CE

Puissance absorbée du ventilateur : 1,1 kW

3ème étape : détermination du pouvoir évaporatoire de l'air (PE)

Air ambiant :

Température : 10°C

Humidité relative : 80%

PE = 1 g d'eau/m³

soit : 6 kg/h

Durée théorique du séchage:

$$\frac{3\,750 \text{ kg d'eau}}{6 \text{ kg/h}} = 625 \text{ heures}$$

Air réchauffé de 5°C :

Température : 15°C

Humidité relative : 58%

PE = 2,2 g d'eau/m³

soit : 13,2 kg/h

Durée théorique du séchage:

$$\frac{3\,750 \text{ kg d'eau}}{13,2 \text{ kg/h}} = 285 \text{ heures}$$

Mais l'air ambiant ne permet pas de sécher le grain car il est trop humide en moyenne. Le réchauffage de l'air de séchage est donc nécessaire.

4ème étape : consommation d'énergie directe avec l'air réchauffé de 5°C

Ventilation :

285 heures x 1,1 kW = 315 kWh électriques au lieu de 690 kWh électriques.

Energie thermique :

285 heures x 0,34 x 6 000 x 5 = 2 900 kWh

Total : 3 215 kWh

Consommation spécifique : 0,86 kWh/kg d'eau

dont : 0,08 kWh/kg d'eau d'énergie payante

Exemple de calcul simplifié de la durée de séchage de 50 tonnes de blé ou d'orge, à l'air ambiant ou avec un réchauffage de 5°C.

3.3 Principe des capteurs solaires

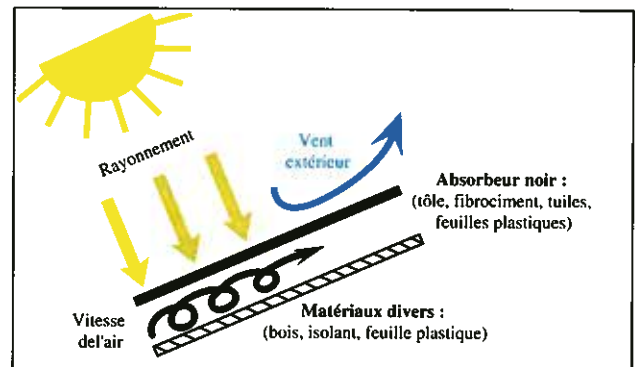


Figure 8 : Schéma de principe d'un capteur solaire

Il s'appuie sur la théorie du corps noir et les échanges de chaleur qui régissent son équilibre thermique. Les rayons du soleil transportent de l'énergie sous forme d'ultraviolets, de lumière visible et d'infrarouges. Cette énergie est plus ou moins absorbée par les corps qui la reçoivent : par exemple, le corps noir parfait absorbe la totalité des longueurs d'ondes du spectre solaire, ce qui lui donne sa couleur noire.

Comme tout corps, le capteur solaire est soumis à des échanges thermiques avec son environnement : il reçoit de l'énergie sous forme de rayonnement et perd de l'énergie par rayonnement (dans le spectre infrarouge), par conduction (à l'intérieur du matériau et en contact avec les autres matériaux) et par convection (avec l'air environnant).

Le capteur solaire doit récupérer au mieux l'énergie par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur dont les plus courants sont l'eau (eau chaude pour le chauffage ou eau chaude sanitaire) et l'air (chauffage de l'habitat et séchage).

La performance d'un capteur solaire est exprimée par son rendement, rapport entre l'énergie récupérée par l'air de séchage et l'énergie incidente reçue par le capteur. L'énergie récupérée est évaluée à partir de l'élévation de température de l'air entre l'entrée et la sortie du capteur solaire, et du débit de ventilation.

Il varie en fonction de nombreux paramètres dont les caractéristiques des matériaux (formes et coefficient d'échanges de chaleur pour l'absorbeur, les matériaux utilisés pour la canalisation de l'air, éventuellement la transparence de la couverture utilisée comme effet de serre), et les paramètres liés aux échanges de chaleur par convection (vitesse de l'air à l'intérieur du capteur, vitesse du vent extérieur, température de l'absorbeur, ...).

La conception du capteur et en particulier ses caractéristiques dimensionnelles doivent être déterminées avec précaution afin d'optimiser le rendement du capteur.

3.4. Technologies des capteurs solaires

De nombreuses équipes ont mené des recherches et des expérimentations sur les types d'absorbeurs, les types de couvertures transparentes, les modalités de circulation de l'air dans les capteurs, ... Ces résultats ont fait l'objet de publications.

De nombreux prototypes de séchoirs solaires existent aussi. De nouveaux capteurs solaires sont encore envisageables. Les technologies présentées ici sont développées en nombre dans différents pays européens. Elles sont donc fiables et reproductibles.

Les types regroupent les capteurs du point de vue de leur mise en oeuvre en fonction des structures existantes sur les exploitations : présence d'une toiture transformable en fibrociment ou tôles, ou en tuiles, avec ou sans effet de serre, et utilisation de serres.

Type 1 : capteur toiture nu avec absorbeur en fibrociment ou en tôle

La toiture existante est utilisée comme absorbeur sans autre transformation qu'une éventuelle coloration en noir ou sombre. Une sous-face est posée pour délimiter un passage d'air dans lequel l'air va circuler pour se réchauffer. L'air est mis en mouvement par un ventilateur.

La fonction recherchée de la sous-face est de canaliser l'air entre l'aspiration et la sortie du capteur : on utilisera des panneaux de bois ou des panneaux isolants garantissant une étanchéité à l'air, en évitant les entrées d'air parasites.

Ce capteur est le plus fréquent par sa simplicité de mise en oeuvre. Il est utilisé dans tous les pays pour sécher des produits en quantités variables, avec des surfaces de captation de 10 à 2500 m².



Photo 1 : Installation de M. PROVENT, (France)
Capteur de type 1. L'air est aspiré par un pignon et récupéré sur l'autre pignon. De nombreuses variantes existent sur la circulation de l'air : gaine de récupération centrale, aspiration par le faîtage ou la gouttière, ...

Type 2 : capteur-toiture avec effet de serre

Une couverture transparente permet d'éviter la concurrence avec le vent extérieur. L'absorbeur est la toiture existante (fibrociment, tôle, ... de couleur noire ou sombre). L'air peut circuler soit entre ces deux toitures, soit entre l'absorbeur et une sous-face.



Photo 2 : Capteur toiture avec effet de serre sur l'installation séchage solaire de grains de la coopérative de Salvagnac (France)

Type 3 : capteur toiture avec toit en tuiles

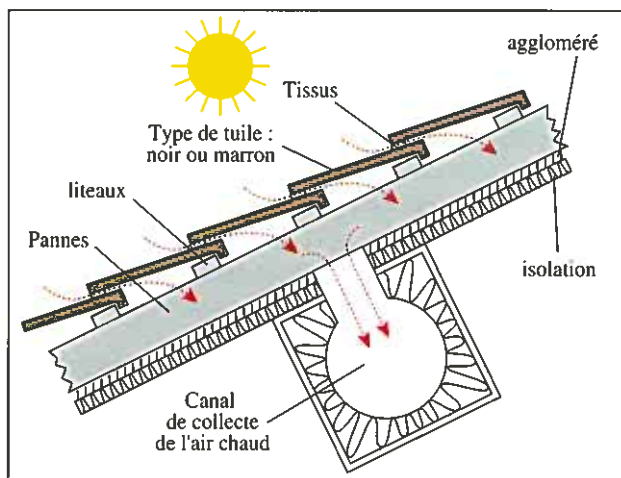


Figure 9 : Schéma du capteur type 3

L'air est aspiré entre les tuiles (disjointes) de couleur sombre, et est canalisé par une sous-face en panneaux de

bois isolés ou en panneaux isolants, posée sous les chevrons. L'air chaud est récupéré dans une gaine parallèle au faîtage et conduit jusqu'au ventilateur. Les tuiles peuvent être légèrement surélevées par une cale en tissu perméable à l'air, imperméable à la neige et imputrescible.

Type 4 : capteur à absorbeur poreux intégré dans la toiture

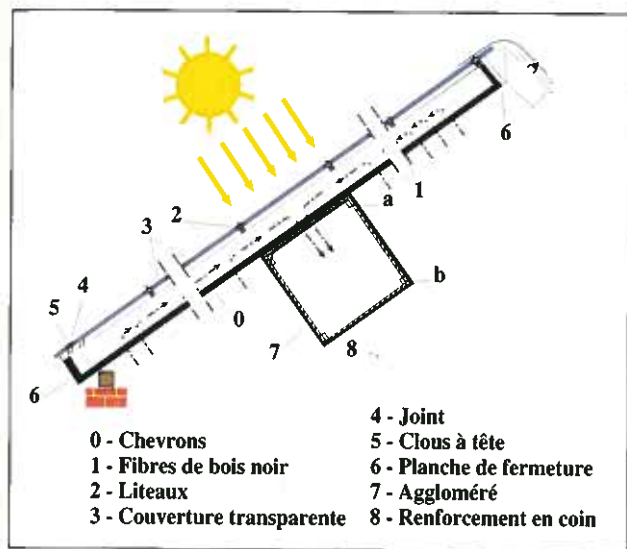


Figure 10 : Schéma du capteur type 4

Une partie de la toiture du bâtiment agricole (tuiles ou ardoises) est remplacée par une couverture transparente. Un absorbeur poreux, recevant le rayonnement solaire, est placé sous les chevrons. L'air, aspiré à travers cet absorbeur, est prélevé soit à l'intérieur du bâtiment, soit à l'extérieur si ce bâtiment est utilisé pour le séchage ou pour loger les animaux (l'air y est alors plus humide qu'à l'extérieur).

Dans ce dernier cas, il sera nécessaire de poser une sous-face pour prélever l'air extérieur au niveau de la gouttière et du faîtage.

L'absorbeur poreux est constitué de fibres de bois tenues entre deux feuilles de tissu polyester et des grillages en zinc.

Type 5 : Serre type maraîchère transformée en capteur solaire

Un film plastique (polyéthylène ou autres) noir est utilisé comme absorbeur. Il est posé sur le sol horizontal, ou tendu en travers (incliné ou horizontal, suivant l'orientation de la serre). L'air chaud est aspiré par un des pignons et récupéré sur l'autre. Une variante consiste à positionner un film transparent à environ 40 cm au dessus du film noir. En profitant de la pente du sol, ce capteur solaire peut être utilisé sans ventilateur, le mouvement ascendant de l'air chaud étant alors naturel. Les produits à sécher peuvent être disposés dans la partie haute du capteur ou dans un bâtiment spécifique.



Photo 3 : Exemple de capteur de type 5 (Allemagne)

Type 6 : serre à absorbeur poreux

Une serre est construite à l'aide d'un tissu poreux tendu sur une armature métallique ou en bois, spécifique ou adossée à un mur. Une feuille plastique en polyéthylène est posée au sol. Des sacs de sable au sol maintiennent la tension du film. Aucun orifice n'est aménagé car l'air, aspiré par un bout de la serre, doit traverser la couverture poreuse. Le tissu poreux est une membrane géotextile utilisée pour la stabilisation des sols des routes, ce qui garantit sa résistance mécanique et dans le temps.

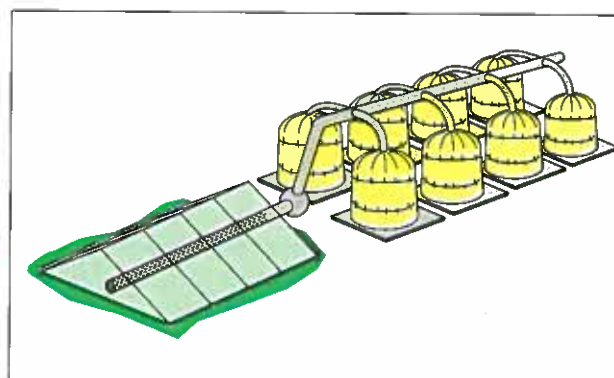


Figure 11 : Schéma du capteur type 6

Type 7 : serre spécifique utilisée pour le chauffage de l'air et comme bâtiment de séchage

Une serre - de forme pyramidale - est constituée de plusieurs modules juxtaposés comprenant chacun un ventilateur et un aménagement intérieur en système de

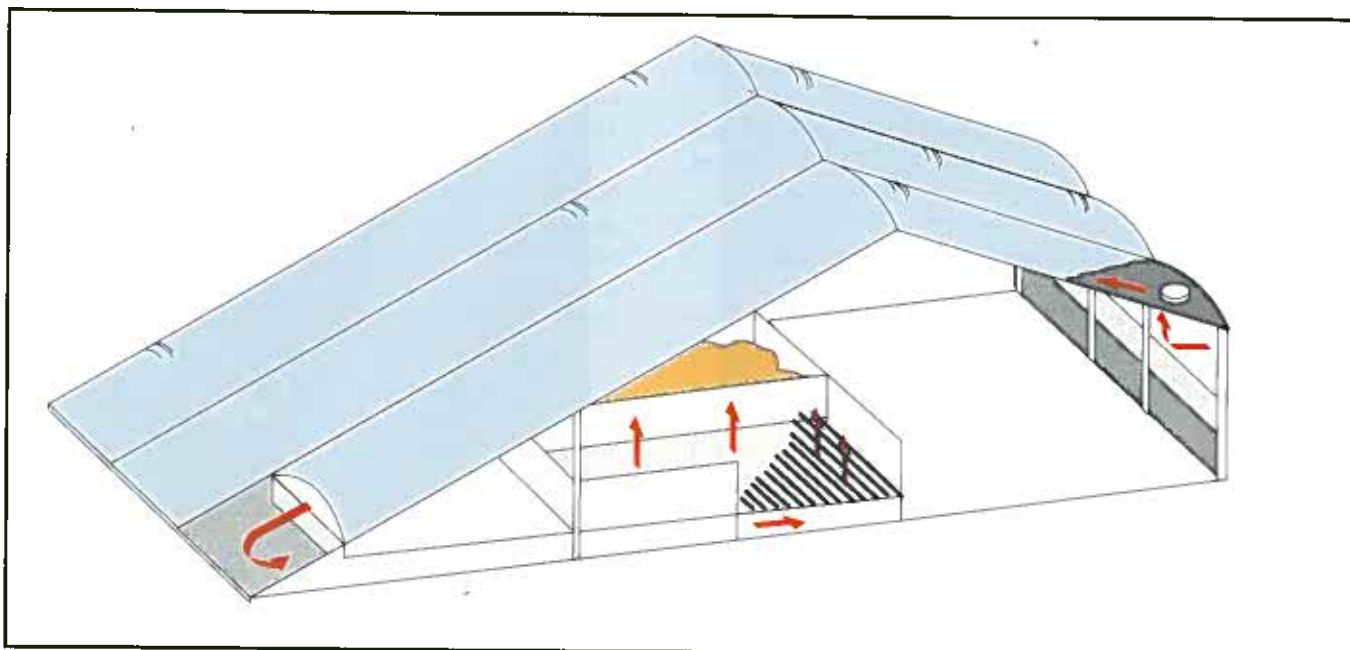


Figure 12 : Schéma du capteur type 7

Tableau 4 : Caractéristiques des différents types de capteurs solaires

	Rendement moyen sur la journée	Coût indicatif	Avantages	Inconvénients
Type 1	25-50%	50-150 F/m ² (hors toiture)	<ul style="list-style-type: none"> - simplicité de mise en oeuvre - faible coût - durée de vie : 15 ans ou plus - utilisation des toitures existantes,, et particulièrement les bâtiments d'élevage déjà isolés 	<ul style="list-style-type: none"> - très forte sensibilité au vent qui fait baisser le rendement de captation (déconseillé en site très venté : vent moyen > 5 - 7 m/s)
Type 2	40 - 65%	150 - 300 F/m ²	<ul style="list-style-type: none"> - peu sensible au vent, - meilleur rendement, conseillé en site venté 	<ul style="list-style-type: none"> - coût élevé, nécessite la pose d'une couverture supplémentaire - diminution de la transparence de la couverture transparente, avec les années (variable en fonction des matériaux utilisés)
Type 3	20 - 35%	100 - 150 F/m ²	<ul style="list-style-type: none"> utilisation des toitures en tuiles, qui présente une intégration architecturale parfaite en particulier dans les sites protégés ou classés 	<ul style="list-style-type: none"> - rendement faible, ce qui nécessite des surfaces plus grandes - résistance assez forte au passage de l'air
Type 4	40 - 60%	200 - 300 F/m ²	<ul style="list-style-type: none"> rendement élevé grâce à l'absorbeur poreux et à l'effet de serre 	<ul style="list-style-type: none"> - coût assez élevé - plus complexe de mise en oeuvre
Type 5	15 - 20%	20 - 30 F/m ² environ, plus main d'œuvre agricole	<ul style="list-style-type: none"> - faible coût des matériaux, - possibilité d'un usage double de la serre (séchage et production) 	<ul style="list-style-type: none"> - faible durée de vie des films plastiques, d'où main d'œuvre fréquente - faible rendement (dû à la faible vitesse de l'air), d'où surface plus importante (longueur)
Type 6	30 - 60%	20 - 30 F/m ² environ, plus main d'œuvre agricole	<ul style="list-style-type: none"> - très bonne durée de vie du tissu poreux (les premières réalisations de ce type datent de près de 10 ans), - très bonne résistance mécanique aux intempéries (vent, neige, ...) - bon rendement de captation et faibles pertes de charges engendrées (2 mm CE avec débit de l'ordre de 100 m³/h/m² de capteur) 	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement très dépendant du vent - Non utilisable par temps très humide car le tissu est chargé en eau
Type 7	40 - 60% (maximum)	1 000 - 1 500 F/m ² suivant les équipements intérieurs	<ul style="list-style-type: none"> - fabrication industrielle - sert aussi de bâtiment de séchage - bon rendement de captation grâce à l'effet de serre 	<ul style="list-style-type: none"> - coût relativement élevé - ne peut être utilisé pour tous les produits agricoles
Type 7 variant	20%	50 - 100 F/m ²	<ul style="list-style-type: none"> - peu coûteux 	<ul style="list-style-type: none"> - faible durée de vie des plastiques

séchage. L'ensemble des modules forme un bâtiment adapté aux besoins de séchage. La serre est dissymétrique, ce qui permet d'exposer un des deux pans de manière la plus favorable vis à vis du rayonnement incident.

La couverture de chaque module est constituée d'une double feuille de polyéthylène transparent, à bulle d'air, résistant aux ultraviolets A, et entre lesquelles est délimité un passage d'air. Le ventilateur aspire l'air à l'extérieur (ou par un jeu de volets recycle tout ou partie de l'air intérieur), le souffle entre les deux plastiques et le pulse, une fois réchauffé, dans le produit placé dans des caissons ou des armoires aménagés à l'intérieur de la serre. L'absorbant est un tissu noir disposé au-dessus de la feuille inférieure. L'ensemble est maintenu par un système de fixation profilé.

Ce système présente l'avantage d'être fabriqué industriellement. Il est particulièrement adapté aux producteurs qui veulent s'équiper d'un système complet de séchage. Bien que le système soit modulaire, il est réservé à des quantités assez limitées de produits à sécher, en particulier les plantes aromatiques et médicinales, les épices, les semences, ... en Europe ou dans les pays tropicaux ou subtropicaux.

D'autres variantes du type 7 existent. Nous en citerons 2 :

- le séchoir-serre constitué d'une partie capteur solaire avec effet de serre et d'une surface couverte abritant le produit à sécher. L'air est poussé dans le capteur et au dessus du produit par un ventilateur de faible puissance, qui peut permettre ainsi l'usage de l'électricité photovoltaïque. Ce système est particulièrement destiné au séchage en pays chauds de petites quantités de produits très divers.

- * le séchoir-serre adossé à un bâtiment ou un mur, avec une structure en matériaux locaux pour maintenir un plastique transparent. Il est beaucoup plus artisanal que la serre-pyramide. Les produits à sécher sont étalés le plus souvent sur des claies. La circulation de l'air peut utiliser l'effet de cheminée ou être assistée par un ventilateur.

4. Aspects économiques du séchage solaire

4.1 Comparer ce qui est comparable

L'analyse de l'intérêt économique du séchage solaire relève de paramètres extrêmement variés et complexes à aborder tels que :

- Les filières avec lesquelles est comparée la technique (séchage naturel sans équipement spécifique, ventilation froide qui comporte un risque par rapport à la qualité du produit, ventilation chaude avec des énergies fossiles aux coûts fluctuants, séchage haute température pour certains produits, séchage en coopératives,...).

- La situation antérieure à l'installation du séchage : existence et adaptabilité des équipements tels que les silos,

les bâtiments, les appareils de manutention..., ce qui va largement influencer sur les coûts d'investissement.

- Le cours des produits sur le marché (cas des fruits secs ou des plantes aromatiques et médicinales, spéculation sur le stockage des céréales et oléoprotéagineux,...).

- les effets économiques induits dus à l'amélioration qualitative du produit séché (cas des fourrages avec la diminution des compléments d'alimentation ou la réduction des intrants, ...)

Cependant, l'analyse des grandes filières d'application du séchage solaire permet de faire ressortir les paramètres essentiels, qui vont influencer sur la rentabilité économique.

4.2 Les durées d'utilisation du système

Il n'est pas étonnant de voir que le séchage solaire s'est particulièrement développé pour le fourrage. Ce produit est récolté en plusieurs coupes successives qui vont s'étaler sur plusieurs mois (début mai à fin août, et parfois à l'automne), pendant lesquels va être utilisée l'installation.

Exemple de calendrier de récolte de fourrages

	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.
Prairies permanentes	-	←→	-	-	-	-
Luzerne	←→	←→	←→	←→	-	-

De même, le séchage solaire des grains montre une bonne rentabilité s'il est utilisé sur une exploitation en polyculture dont les récoltes se succèdent sur une longue période :

Exemple de calendrier de récolte de grains

	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.
Blé	←→	-	-	-	-
Tournesol	-	-	←→	-	-
Soja	-	-	←→	-	-
Sorgho	-	-	-	←→	-

Les systèmes polyvalents, tels qu'ils sont développés en Norvège et en Suède (grain, fourrage, bois déchiqueté) permettent également une bonne rentabilité.

Des séchoirs multifonctions sont également rentables si l'on tient compte de l'utilisation annexe de l'installation : les séchoirs de figues portugais, constitués par des serres ventilées, servent, hors saison de séchage, comme serres pour les semis de melons.

Certains éléments d'un séchoir peuvent avoir une double fonction :

- Les séchoirs solaires de fourrage utilisent souvent des toitures de bergerie, dont l'isolation sert à la fois à délimiter le passage de l'air en toiture et à isoler la bergerie.
- Les séchoirs de grains utilisent des cellules qui sont également des cellules de stockage.

Ces pluri-fonctions sont un des avantages des systèmes solaires (un séchoir classique trouve rarement une utilisation complémentaire hors saison de séchage), mais ils sont difficiles à appréhender car ils relèvent du cas par cas.

Des exemples de démarche de calcul permettent de préciser l'intérêt économique des capteurs solaires.

Exemple de calcul de la durée minimale d'utilisation en fonction de l'investissement et du prix de l'énergie substituée :

Le coût d'un capteur solaire de type I (le plus fréquent) est de 50 à 150 F/m² auquel il faut ajouter les gaines jusqu'au ventilateur (50 à 100 F/m² de capteur). Le coût total varie donc de 100 à 250 F/m² de capteur.

En considérant que le capteur solaire doit être rentabilisé sur sa durée d'amortissement, on calcule la durée minimale annuelle d'utilisation en fonction du prix de l'énergie substituée et de l'investissement.

Hypothèses :

- Rayonnement solaire : R = 5,5 kWh/m²/j
- Rendement moyen : p = 35 %
- Durée d'amortissement : D = 12 ans
- Investissement : I (de 100 à 250 F/m²)
- Prix de l'énergie : E (de 0,15 à 0,4 F/kWh)

La formule de calcul de la durée minimum d'utilisation (DMU) est :

$$DMU = \frac{I}{D \times R \times p \times E}$$

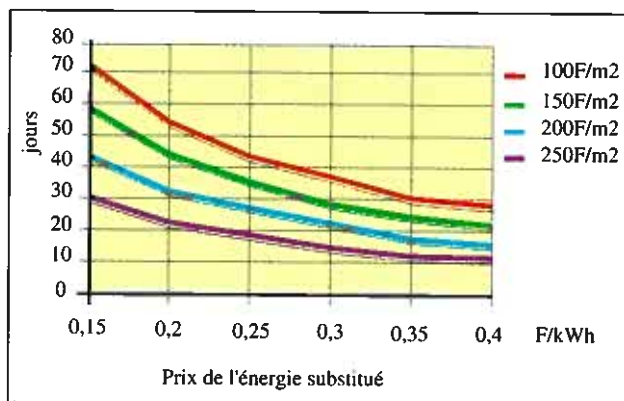


Figure 13 : Durée minimale d'utilisation du capteur solaire

4.3 Séchage solaire de fourrage comparé à un séchage au fioul

Quantité de fourrages séchés		120 tonnes par an	
Conditions climatiques moyennes	Température: 15°C Humidité relative : 65% Rayonnement solaire : 5,5 kWh/jour		
Ventilateur	débit 36 000 m ³ /h ; puissance absorbée : 7 kW		
Équipement de séchage	2 cellules de 115 m ² chacune		
Conduite	Ventilation 12 heures/jour		
Débit de séchage	2,5 tonnes de fourrage sec/jour		
Durée d'utilisation / an	48 jours		
	Capteur solaire	Réchauffage au fioul	
Equipement	330 m ² de capteur -toiture	Brûleur fioul de 68 kW	
Investissement	66 000 F	12 000 F	
Performances techniques	Rendement : 40% Élévation temp. : + 5° C Énergie récupérée : → 3 600 l. de fioul	Rendement : 90% Élévation temp. : + 5° C Éner. consommée : → 4 000 l. de fioul	
Coût de fonctionnement :			
Électricité (4000 kWh/an)	2 000 F	2 000 F	
Énergie thermique	0 F	8 000 F	
Total	2 000 F/an	10,000 F/an	
Temps de retour de l'investissement capteur solaire par rapport au brûleur fioul	66 000-12 000 F 10 000 - 2 000 F	=> 6.7 ans	

L'économie énergétique est dans cet exemple de 2,8 tep pour 100 tonnes de produit séché.

Avec les mêmes services rendus, le temps de retour de l'investissement capteur solaire par rapport au brûleur fioul est de 7 ans environ. Cependant, un capteur solaire de ce type a souvent une double fonction :

- récupération de l'énergie solaire pour le séchage
- isolation du bâtiment où vivent les animaux.

La partie isolation représente souvent plus de 50 % de l'investissement total du capteur. Si l'on affecte le coût de l'isolation sur le coût du bâtiment d'élevage, le temps de retour d'un capteur solaire par rapport à un brûleur fioul est alors de 4 ans environ.

4.4 Séchage solaire du riz comparé à un séchage classique au gaz

Cette comparaison est issue des mesures effectuées en 1993 sur l'installation de Monsieur RAMOS SIMOES située à Lourical au Portugal (cf. étude de cas n° 8).

Les valeurs moyennes pendant le séchage ont permis de calculer l'énergie économisée pour 100 tonnes de produit séché par rapport au séchoir type "Kongskilde" fonctionnant au gaz - le système de séchage le plus fréquent dans la vallée du Montego. Ce séchoir a une consommation spécifique moyenne voisine de 1,4 kWh / kg d'eau évaporée.

Données de séchage :

- Quantité de riz séché : 350 tonnes
- Eau évaporée par tonne de produit séché : 69 kg/t, soit 24 tonnes au total.
- Énergie dépensée (électricité) = 0,163 kWh/kg d'eau évaporée.

En énergie primaire, si on applique un coefficient de 2,58 à la consommation d'énergie électrique (1 kWh électrique = 2,58 kWh thermique), la consommation électrique est de 0,42 kWh/kg d'eau évaporée.

La consommation (énergie primaire) par tonne de produit séché revient à :

$$0,42 \times 69 = 29 \text{ kWh/t}$$

Pour un séchoir type "Kongskilde", la consommation serait de :

$$1,4 \times 69 = 96,6 \text{ kWh/t}$$

L'économie énergétique est de 0,58 tep pour 100 tonnes de produit séché

Temps de retour simple de l'investissement :

$$P = C/(Q \times Y - M)$$

C = différence d'investissement entre l'installation solaire neuve et un séchoir classique au gaz neuf = 1 000 000 d'Escudos

Q = Énergie économisée par le système solaire. Cette économie a été de :

Pour le séchoir solaire :

- Consommation spécifique (énergie non primaire) par tonne d'eau évaporée : 163 kWh/t

- Énergie totale consommée dans le séchoir solaire :

$$163 \times 24 = 3912 \text{ kWh}$$

Pour le séchoir classique :

- Consommation spécifique par tonne d'eau évaporée : 1395 kWh/t

- Énergie totale consommée dans le séchoir classique :

$$1395 \times 24 = 3912 \text{ kWh}$$

Énergie économisée : $33\,480 - 3912 = 29\,568 \text{ kWh}$

Y = Coût du kWh de gaz propane, combustible utilisé dans le système classique. Le coût moyen, en considérant un rendement de 90 % du séchoir, est d'environ 9 Escudos/kWh.

M = Coûts de maintien et d'opération de l'installation de séchage. En admettant que ces coûts, aussi bien ceux relatifs à la main d'oeuvre utilisée qu'à la manutention, sont identiques à ceux d'une installation de séchage classique, nous considérons donc M=0

Le temps de retour de l'investissement est : 3,7 ans.

5. Principales filières d'applications

5.1 Le séchage solaire des fourrages

La conservation des fourrages pour l'alimentation hivernale du troupeau (bovin, ovin ou caprin) est un maillon essentiel de l'élevage. De tout temps, les éleveurs récoltent sous forme de foin les excédents d'herbe du printemps et de l'été pour permettre de nourrir leurs animaux.

Quel mode de conservation : voie sèche ou voie humide ?

L'intensification des productions animales et végétales oblige à augmenter la constitution de stocks fourragers pour l'hiver. Deux voies principales de conservation existent : la voie sèche avec le foin séché traditionnellement au champ ou artificiellement en grange, et la voie humide avec l'ensilage et plus récemment l'enrubannage des balles rondes.

La voie humide s'est largement développée depuis les années 70 et est aujourd'hui prépondérante dans la plupart des pays européens.

Les progrès de la mécanisation dans ces années-là ont permis de développer largement cette technique, d'autant plus qu'elle se prête à un travail en groupe des agriculteurs à l'échelle locale.

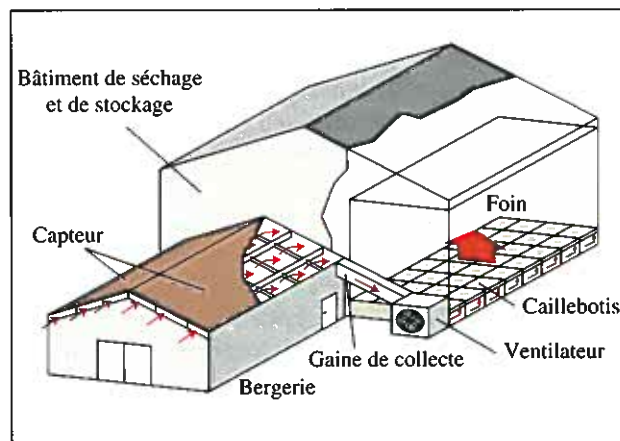


Figure 14 : schéma de principe d'une installation de séchage solaire du fourrage en vrac.

Plus ancienne que l'ensilage, la technique du séchage en grange date des années cinquante. Elle constituait à cette époque le seul moyen de conservation, en dehors du foin traditionnel, qui permet de s'affranchir partiellement des conditions météorologiques lors de la récolte du printemps.

Mais la chaîne de récolte, de conservation et distribution du fourrage étant essentiellement manuelle, le travail est long et pénible. De nombreux agriculteurs abandonneront ainsi leur système de séchage en vrac au profit de l'ensilage qui, mécanisé, permet alors de résoudre les problèmes de main d'oeuvre.

Puis dans les années soixante-dix, les constructeurs de matériels commencent à proposer aux agriculteurs des outils de manutention des fourrages pour la récolte, l'enrangement et la distribution. Parallèlement la crise mondiale de l'énergie fait prendre conscience à certains chercheurs - beaucoup moins nombreux que ceux qui travaillent sur la voie humide - de la consommation énergétique forte de la filière ensilage, notamment en carburant. Le séchage en grange qui utilise le fioul comme énergie thermique, est lui aussi pénalisé par l'augmentation du prix de cette énergie.

Ces chercheurs lancent alors des recherches et expérimentations dans l'objectif d'obtenir des fourrages secs de qualité tout en s'affranchissant totalement ou partiellement des énergies fossiles.

Pays concernés	Séchoirs solaires	Séchoirs en grange
Allemagne	130 à 150	7 000 à 10 000
France	110 à 120	2 500 à 3 000
Italie	15 à 20	Plusieurs centaines
Norvège	50 à 100	Plusieurs centaines
Suède	environ 100	Plusieurs centaines
Suisse	1 250	45 000

Tableau 5 : Nombre de séchoirs de fourrages dans les principaux pays européens - Estimation 1992.

NB : Depuis 1992, le développement des séchoirs solaires s'est poursuivi. On dénombre par exemple une cinquantaine de séchoirs supplémentaires en France, quelques dizaines en Italie et en Allemagne.

Par ailleurs, des problèmes de qualité de lait pour la fabrication de certains fromages sont apparus. Un lien fort a été trouvé avec l'ensilage qui, réalisé dans des conditions pas toujours très bonnes, engendre en particulier la présence de spores butyriques dans le lait. Ainsi, si le principe de la conservation par voie humide est simple, la garantie d'obtenir un fourrage de qualité par cette voie n'est pas systématique. La maîtrise technique de la chaîne de récolte, conservation et distribution doit donc être parfaite. Plusieurs zones de production fromagère traditionnelle telle que le Beaufort, le Comté, l'Emmental, ... ont ainsi interdit l'ensilage dans leur cahier des charges. Les agriculteurs de ces zones sont donc contraints, s'ils ne veulent plus pratiquer le foin traditionnel, d'adopter la technique du séchage en grange.



... fromage éclaté, présence de butyriques.



A bon foin, bon fromage.

Figure 15 : Extrait du guide 'le foin séché par ventilation' - ITCF - BCMEA - EDE Haute-Savoie (France) - 1985. Faites du foin ... mais du bon foin ! On pourrait ajouter : 'pour avoir du bon fromage'.

SÉCHAGE SOLAIRE DES BALLES RONDES

Le principe du séchage des balles rondes est identique à celui du fourrage en vrac : après 2 jours environ de séchage au champ, le fourrage qui a une teneur en matière sèche de l'ordre de 60%, est mis en balles puis au séchage. Quand les balles sont sèches, elles sont retirées du séchoir et stockées sous abri. D'autres balles peuvent alors être mises au séchage. Le séchage s'effectue donc par lot de balles, alors qu'en vrac, la cellule de séchage sert aussi la plupart du temps de stockage.

Deux possibilités de circulation de l'air existent :

- par le bas, les balles sont posées sur une dalle de séchage munies de bouches de soufflage. Ce système nécessite des travaux de génie civil (cf. étude de cas n° 6).
- par le haut, les balles posées sur le sol (ou sur une palette) sont entourées par une gaine en film de polyéthylène. L'air traverse la balle de haut en bas et sort sur la partie inférieure de la balle (cf. étude de cas n° 5).

Le système de serrage et le réglage de la pression de serrage de la balle ont une influence forte sur la circulation de l'air dans chacune des balles. Il semble que le système de soufflage par le haut permette une meilleure répartition de l'air dans la balle, donc un séchage plus homogène.

Le séchage des balles rondes convient aux agriculteurs qui sont déjà équipés d'une chaîne de récolte et de distribution en balles rondes. Toutefois, la qualité du fourrage séché est moindre que celle du fourrage en vrac, du fait de l'hétérogénéité entre les balles d'un même lot et de l'étalement dans le temps de la récolte.

Deux principaux systèmes existent :

- le premier vise à sécher le plus vite possible (dans la journée) un lot de balles rondes et permet donc de récolter à peu près tous les jours. Il nécessite des investissements élevés en puissance de ventilation et en puissance thermique, liés à la rapidité. Le coût de fonctionnement est aussi important. Des capteurs solaires peuvent permettre des économies de fioul, qui reste cependant toujours nécessaire.
- le second vise à sécher plus lentement (entre 3 et 8 jours) les balles rondes et entraîne donc un échelonnement de la récolte. Son intérêt est de limiter les investissements en puissance de ventilation et en puissance thermique, ainsi que les coûts de fonctionnement. Il correspond parfaitement à l'utilisation des capteurs solaires, qui sont souvent la seule source d'énergie thermique utilisée.

Le choix pour un agriculteur entre ces deux systèmes dépend de sa stratégie d'exploitation.

État du développement du séchage solaire des balles rondes :

En Allemagne, il existe environ 50 installations, mais de nombreuses sans capteur solaire;
 en Italie, quelques unités, mais de nombreuses sans capteur solaire;
 et en France, quelques unités



Photo 4 : Exemple d'un séchoir solaire pour 35 balles rondes avec appoint fioul. Aveyron (France) - 1995 - Au premier plan, l'appentis du séchoir; à droite, la bergerie récente dont la toiture constituant le capteur solaire (270 m²) a été colorée au sulfate de manganèse. Derrière, la vieille bergerie toujours utilisée.

Les arguments du séchage en grange : performance, économie et respect de l'environnement

Les raisons qui incitent les agriculteurs à utiliser cette technique sont relatives à un ensemble d'arguments plus ou moins prépondérants suivant le contexte et l'orientation de l'exploitation.

1 - Une récolte rapide, une sécurité accrue

La fauche de l'herbe au stade optimal se situe très souvent pendant des périodes de précipitations fréquentes. Il est alors quasiment impossible de pouvoir sécher correctement le foin au champ car un minimum de 4 jours consécutifs sans pluie est nécessaire. Le séchage en grange permet, en laissant le fourrage environ 48 heures au sol puis en le mettant à l'abri, de s'affranchir en grande partie de cette contrainte météorologique (les prévisions météorologiques sont fiables sur 48 heures). La ventilation du fourrage par un air réchauffé de quelques degrés permet d'atteindre le seuil de conservation (humidité du fourrage de 15 %) en quelques jours (2 à 5 jours selon l'ensoleillement) et ainsi de conserver toutes les qualités initiales du fourrage.

2 - Une récolte au stade végétatif optimal

Le séchage en grange permet de faucher tôt la première coupe, au moment même où le fourrage atteint le stade optimum de sa valeur alimentaire. Celui-ci se situe une dizaine de jours avant l'épiaison pour les graminées, et au stade bourgeonnement pour les légumineuses.

3 - Aucune pertes à la récolte

Le séchage permet de ramasser de l'herbe encore souple limitant ainsi les pertes de feuille au champ. Séché à l'ombre, le foin conserve ses vitamines, sa couleur et sa très bonne appétence.

4 - Économie d'aliments complémentaires

Le foin étant très riche en protéines, il n'est pas conseillé de compléter la ration avec des tourteaux (risques de mammites). Pour les animaux les plus productifs, on complète la ration avec des produits riches en glucides

(céréales, farines, ...). Le foin en grange équilibre, sans complément, la ration alimentaire d'une vache produisant 5 000 kg de lait par an.

5 - Amélioration des prairies

La fauche précoce et multiple, permise par le séchage, favorise :

- le développement des légumineuses en général. Au fil des années, leur proportion croît pour atteindre 25 à 30 % de la flore de la prairie.
- le développement des graminées à feuilles larges (ray-grass anglais, dactyle, fétuque, ...) dont la valeur alimentaire est supérieure à celle des graminées à feuilles fine (brôme dressé, ray-grass anglais, ...)
- la régression voire l'anéantissement des plantes indésirables telles que les chardons, les ombellifères, rumex, renoncules, ...

6 - Réduction d'intrants

Le séchage permet le développement des légumineuses dans les prairies naturelles ou en culture. Ce développement engendre une réduction importante voire totale de l'utilisation des engrais azotés chimiques. Le recours au désherbage des prairies naturelles devient souvent inutile.

De plus, le séchage améliore la pérennité des prairies, ce qui limite les travaux d'implantation de celles-ci. Il engendre donc ainsi une diminution des coûts et une meilleure protection des sols.

7 - Diminution des frais vétérinaires et taux de renouvellement du troupeau

Les agriculteurs pratiquant le séchage en grange ont des dépenses vétérinaires assez faibles (15 à 40 % de moins que pour les éleveurs utilisant l'ensilage).

De même, il est à signaler que les animaux nourris à l'herbe et au foin vivent et produisent plus longtemps que ceux nourris à l'ensilage ou avec d'autres aliments.

8 - Mécanisation de la chaîne de récolte et réduction du temps de travail

La mécanisation de la chaîne de récolte est totale, ce qui supprime en partie la pénibilité des fenaisons. Cette chaîne de récolte est adaptée au travail d'un homme seul.

De plus, la récolte est très rapide. Par rapport au séchage sur le champ réalisé dans de bonnes conditions (fenaison sans pluie), le temps de travail est réduit au moins de moitié. En hiver, la mécanisation fréquente de la distribution du fourrage réduit de façon assez importante le temps et la pénibilité de l'alimentation des animaux.

Ces aspects motivent souvent les agriculteurs pour le choix de cette technique.

9 - Obtention d'un lait de qualité

Les germes butyriques provenant de la terre ne peuvent survivre et proliférer qu'en milieu humide et en absence d'oxygène, ceux-ci sont donc éliminés dans le stock de foin. L'alimentation des animaux à base de foin ventilé permet d'obtenir un lait de bonne qualité "apte" à la transformation fromagère (taux protéique élevé et bonne qualité bactériologique).

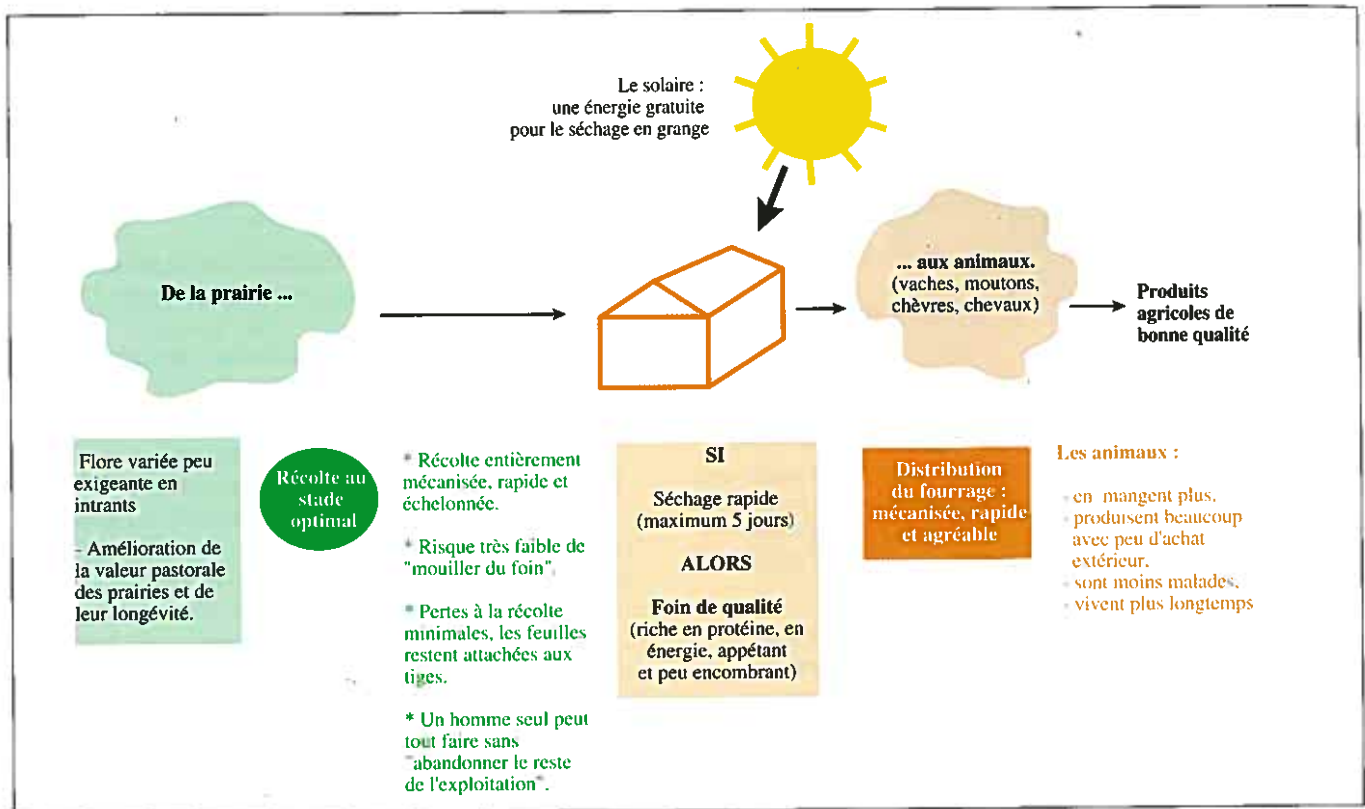


Figure 16 : Le séchage solaire des fourrages : une technique économe, performante et respectueuse de l'environnement. (Schéma Association SOLAGRO)

L'énergie solaire : plus qu'économique

L'énergie solaire est venue s'ajouter à la technique du séchage en grange vers la fin des années soixante-dix, dans une optique de réduction de la facture énergétique. Les vastes toitures des bâtiments agricoles recevant de grande quantité d'énergie solaire pouvaient faire l'objet d'une transformation pour valoriser cette énergie. Les systèmes de capteurs solaires utilisés aujourd'hui sont essentiellement de type 1 (capteur-toiture nu) et de type 2 (avec couverture transparente), les autres types de capteurs (à l'exception du type 7) étant utilisés moins fréquemment.

Les capteurs solaires utilisés permettent de récupérer l'équivalent de 2000 à 5000 litres de fioul par an. La plupart de ce fioul ne serait pas consommé à cause du coût élevé qu'il représenterait. Les agriculteurs font appel au brûleur essentiellement quand les conditions sont défavorables (pluies, brouillard, fourrage qui ne sèche pas car récolté trop humide, ...).

L'énergie solaire, obligatoirement récupérée par le mode de circulation de l'air, augmente la rapidité du séchage en doublant le pouvoir évaporatoire réel de l'air ambiant : le fourrage, récolté principalement quand les conditions météorologiques sont favorables, sèche rapidement (en 2 à 4 jours) ce qui permet d'accélérer le rythme de récolte. La durée du séchage est ainsi diminuée de 30 à 70 % par rapport à une ventilation à l'air ambiant. Les économies de consommation électrique du ventilateur sont en moyenne de 40 à 50%.

5.2 Le séchage solaire des grains

La bonne conservation des céréales (blé, orge, sorgho, millet, maïs) ou des oléoprotéagineux (soja, tournesol,

colza, pois) est obtenue dans des conditions d'humidité spécifique au produit, et avec une température basse qui dépend de la durée du stockage souhaitée. Ces deux conditions (température et teneur en eau) sont indispensables pour empêcher le développement des champignons, des moisissures ou des insectes, et pour limiter la respiration du produit.

Produit	Humidité moyenne de récolte	Norme humidité pour une mise en marché
Blé	15 à 20%	14%
Orge	15 à 20%	14%
Sorgho	17 à 25%	14%
Millet	10 à 20%	9%
Maïs	30 à 35%	14%
Soja	15 à 23%	14%
Tournesol	9 à 18 %	9%
Colza	9 à 18 %	9%

Tableau 6 : Indications d'humidité moyenne de récolte et de norme d'humidité des différents grains en Europe.

Les humidités de récolte varient en fonction des pays et des conditions climatiques de l'année. Vis à vis du séchage, les différents grains peuvent être répartis en deux catégories :

- l'humidité moyenne de récolte est de l'ordre de 15 à 23 % : ces grains peuvent être ramenés aux normes de conservation par un séchage lent basse température, car l'évolution du produit est lente, surtout s'il est soumis à une ventilation. Le séchage solaire est parfaitement adapté pour répondre à ces besoins de séchage.

- l'humidité de récolte est supérieure, de l'ordre de 25 à 35% : ces grains nécessitent un séchage rapide dans la journée (inférieur à 24 heures sauf si présence d'une ventilation de maintien) jusqu'à une humidité au moins inférieure à 23%, le séchage pouvant être ensuite plus lent. Le séchage se pratique donc à une température moyenne (60 à 80 °C) ou haute (100 à 140 °C) qui permet un débit de séchage élevé.

De nombreux types de séchoirs existent. Conçus pour le séchage du maïs - céréale récoltée la plus humide - ils nécessitent quelques ajustements pour le séchage des autres produits notamment pour adapter la température de séchage. Leur consommation spécifique thermique est pour ces derniers de 1,4 à 2,3 kWh par kg d'eau évaporée et au minimum de 1kWh thermique par kg d'eau pour le maïs (la consommation électrique est mal connue et doit être ajoutée).

Deux possibilités de mise en oeuvre de l'énergie solaire existent :

1 - les grains à sécher sont de première catégorie : dans ce cas, le séchage solaire est simplement une amélioration de l'installation existante.

Les grains sont séchés dans la cellule de stockage équipée d'un plancher perforé. Le capteur solaire de type 1 ou 2 est connecté au ventilateur utilisé pour le séchage et le refroidissement du grain. Dans le cas d'un stockage comprenant plusieurs cellules à sécher, une gaine souple et déplaçable peut être envisagée.



Photo 5 : Cellule de séchage de grains équipée d'un plancher perforé (installation de Mme Kollsgard en Norvège).

2 - l'agriculteur souhaite sécher des produits des deux catégories. L'installation de séchage peut alors être spécifique et comprend un capteur solaire (type 1 ou 2) et un générateur d'air chaud au fioul ou au gaz placé dans la gaine permettant une température de 80°C pour les produits de la catégorie 2.

L'installation gagne ainsi en souplesse et permet, en fonction des conditions météorologiques et des produits, de sécher grâce à l'énergie solaire et avec le générateur d'air chaud utilisable à basse température (40°C environ) ou bien à moyenne température, si le débit de séchage nécessite d'être augmenté ou si les produits sont de catégorie 2. Ce séchoir est polyvalent, ce qui en fait son intérêt et sa rentabilité. Sa consommation d'énergie spécifique - comprenant l'énergie de ventilation et l'énergie thermique

y compris l'énergie solaire récupérée) varie de 0,5 kWh/kg d'eau évaporée à 1,2 kWh/kg d'eau.

Quand le séchage est uniquement solaire, la consommation spécifique en énergie payante (électricité du ventilateur) peut se limiter à 0,15 kWh/kg d'eau évaporée. Cette faible consommation est due au procédé de séchage lent basse température.

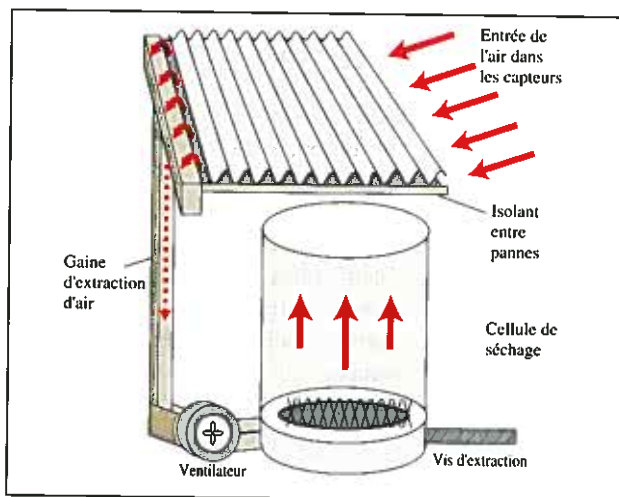


Figure 17 : Schéma de principe d'une installation de séchage solaire de grains. Un générateur d'air chaud peut être disposé dans la gaine en amont du ventilateur.

État du développement

Le séchage solaire des grains se développe dans les pays où le stockage à la ferme est largement pratiqué. Ces grains sont utilisés soit pour l'alimentation des animaux, soit pour la vente. Les problématiques sont légèrement différentes. Dans le premier cas, les agriculteurs souhaitent conserver leur propre production céréalière pour nourrir leur animaux : ils ont donc une activité d'élevage. Dans le deuxième, ils destinent ces productions à la vente : ils stockent leurs produits pour vendre au meilleur moment.

Pays concernés	Séchoirs solaires	Séchage à la ferme
France	5	20% de la production
Norvège	150	2/3 de la production
Suède	plusieurs centaines	?
Grande-Bretagne	40	2/3 de la production

Tableau 7: Estimation du nombre de séchoirs de grains dans les principaux pays européens concernés - 1992.

La rentabilité économique des systèmes solaires dépend surtout de leur durée d'utilisation et des coûts de l'énergie. Bien souvent leur gain énergétique pour les exploitations n'est pas suffisamment attrayant. Aussi, certains pays ont largement subventionné ces systèmes (cas de la Suède avec des subventions de 40 %, de la France, de l'Angleterre...), car ils viennent en substitution d'installation à la ferme, constituées souvent de simples brûleurs fioul ou gaz peu performants, et globalement très consommateurs en énergie. Toutefois, la recherche de la polyvalence du séchoir solaire est un atout à exploiter pour son développement.

5.3 Le séchage solaire des plantes aromatiques et médicinales

Une plante aromatique ou médicinale est caractérisée par le fait qu'elle produit un ou plusieurs types de molécules recherchées, appelées principes actifs : huiles essentielles, alcaloïdes, tanins, etc...

Bien que de nombreux facteurs l'influencent - du lieu de culture aux conditions de conservation, en passant par les traitements post-récolte et le séchage éventuel -, la qualité d'une plante est principalement fonction de son utilisation finale : tisannerie, distillation, extraction de principes actifs ou utilisation en plante entière.

Quatre modes principaux de mise en marché existent :

- en vrac, séchées (négociants, laboratoires).
- conditionnées et séchées (pharmacies, herboristeries, magasins spécialisés, marchés, foires), en sacs ou en sachets avec étiquetage.
- en huiles essentielles (négociants, laboratoires) : les plantes sont alors distillées par l'agriculteur lui-même ou un tiers.
- ou en frais (besoins de l'homéopathie, vente directe sur les marchés) : les plantes sont en général vendues le jour même, voire conservées dans des congélateurs.

Le séchage est obligatoire dans les deux premiers cas, et parfois indispensable dans le troisième cas, lorsque la distillation ne s'opère pas tout de suite après la récolte, ou dans le cas de récolte insuffisante pour effectuer un cycle de distillation.

Les producteurs installés depuis plusieurs années sont en général équipés en générateurs d'air chaud à gaz ou au fioul. La consommation énergétique est en moyenne de 10 kWh/kg sec de produit (soit environ un litre de fioul). Pour certaines plantes, le poste "énergie" occasionne une charge correspondant à 20 % du prix de vente. Cette consommation d'énergie, élevée, est due à un mauvais rendement de séchage et notamment à une température de séchage trop élevée des séchoirs.

Les producteurs qui entrent en phase de production n'ont pas résolu de façon pratique l'étape du séchage. La plupart de ces producteurs étalent leur récolte dans des greniers et sur des claies sans ventilation forcée. Chaque année un pourcentage de la récolte est perdu ou dévalorisé pour cause de mauvais séchage : débit de récolte trop important, plantes récoltées en demi-saison et mal séchées, ...

L'augmentation qualitative ou quantitative de la production passe donc nécessairement par l'achat d'un séchoir.

Or, il n'y a actuellement que peu de matériels disponibles sur le marché et ceux-ci ne répondent que partiellement au cahier des charges des producteurs car les besoins sont très variables entre les exploitations et la plupart des exploitants ont des débits de récolte variables suivant la saison : par exemple, il faut parfois sécher simultanément quelques kilos de fleurs (souci, bleuet, mauve) et plusieurs centaines de kilos de plantes récoltées à la machine (thym, sauge, etc...).

Il existe également des cas de producteurs isolés dont le séchoir ne peut être raccordé au réseau électrique, ce qui entraîne nécessairement une conception différente de celui-ci.

Une grande variété de plantes à sécher :

Le nombre d'espèces récoltées est très important, plus de mille si l'on tient compte de l'homéopathie...

Si le nombre de plantes médicinales et aromatiques est élevé, les organes végétaux à traiter sont aussi très diversifiés :

- racines (gentiane, fenouil),
- plantes entières (menthe, reine des prés, hysope...),
- feuilles (verveine, sauge...),
- inflorescences et fleurs (souci, camomille, rosier de provins...),
- graines (aneth, coriandre, fenouil...).

Les séchoirs doivent donc s'adapter à ce matériel végétal extrêmement varié, qui présente de plus la particularité d'être fortement chargé en humidité au moment de la récolte. : il s'effectue sur des claies disposées dans une armoire ou dans des caissons en vrac.

Le séchage en claies de 0,2 à 1,2 m² est adapté à des petites quantités (produit inférieur à 20 cm de long, 30 kg de produit frais par armoire - environ dix à quinze claies), pour des produits fragiles ou de forte valeur ajoutée.

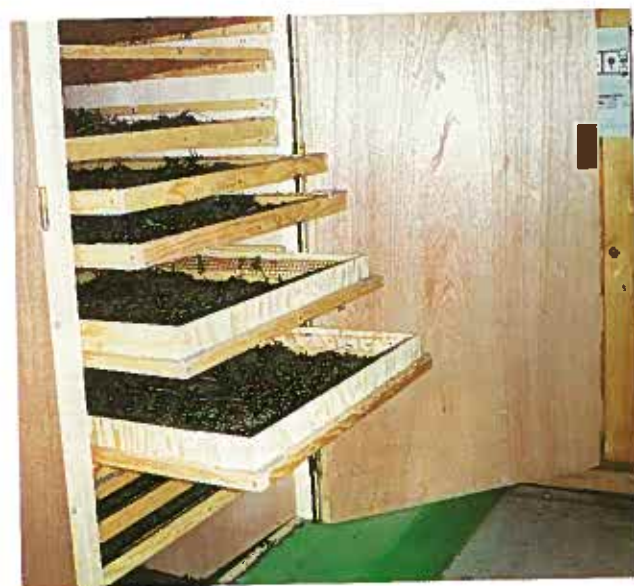


Photo 6 : Les claies, disposées dans une armoire, permettent de déposer des petites quantités de produits.

La gestion du séchage et des différents produits est ainsi très souple, la seule précaution à prendre étant les incompatibilités entre plantes dans une même armoire.

Le séchage en caisson de 2 à 100 m² est adapté aux grandes quantités de produits peu fragiles ou volumineux et lourds. Le séchage s'effectue en couche épaisse de 20 à

150 cm selon les produits. L'efficacité du séchage est meilleure que pour le séchage en claies car la zone de contact entre l'air et le produit est plus grande.

PRATIQUES DU SÉCHAGE DES PLANTES AROMATIQUES ET MÉDICINALES

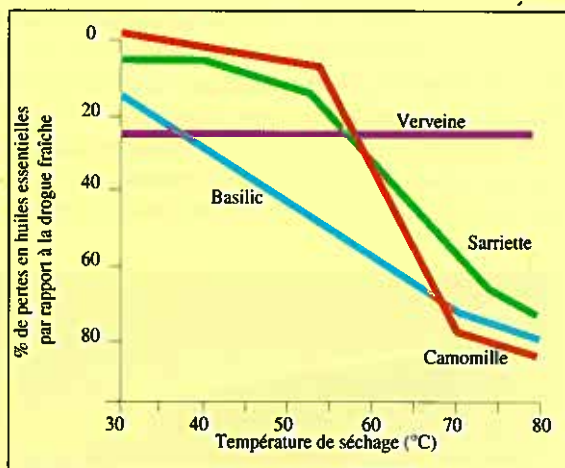
Plusieurs points importants doivent être respectés pour une qualité optimale :

- réduire la durée qui sépare la cueillette du séchage (surtout pour les plantes très humides);
- bien s'assurer que le séchage a été mené jusqu'au bout pour éviter le développement de moisissures lors du stockage ;
- ne jamais utiliser de brûleur au fioul non muni d'échangeurs pour éviter que les gaz de combustion ne polluent les plantes ;
- stocker les plantes dans un local propre à l'abri de la poussière, d'une humidité trop importante et de la lumière.

C'est au cours du séchage que le produit risque le maximum de dégradation. Dès qu'il est récolté, il s'altère rapidement s'il n'est pas séché aussitôt. Un chargement de plantes fraîches, lors de belles journées d'été, peut au bout de quelques heures entrer en fermentation.

Une plante peut perdre la totalité de ses principes actifs si le séchage est trop lent, mais aussi si la température est trop élevée. Les conditions optimales de dessiccation dépendent de la nature du principe actif recherché : huile essentielle, alcaloïde, hétéroside...

Le séchage des plantes à huiles essentielles doit en général s'effectuer à basse température, généralement entre 30 et 45°C. Il doit être suffisamment rapide pour conserver à la fois un taux élevé en huiles, une bonne coloration et un faible développement bactérien.



Les enzymes peuvent agir lors de la dessiccation en modifiant le contenu cellulaire par oxydation ou hydrolyse, jusqu'à atteindre les principes actifs. Deux paramètres conditionnent la durée d'action de ces enzymes : la durée de la dessiccation et la température. De 40 à 60 °C, les enzymes sont activées et peuvent agir en un laps de temps très court. Au dessus de 70 °C, elles

sont généralement détruites. Lors d'un séchage à 20 ou 30 °C, qui est bien sûr plus long, les pertes peuvent être plus lentes du fait de la faible activité des enzymes, malgré une durée d'activité plus longue.

Mais les conditions précises de dessiccation sont mal connues. De plus certaines modifications sont recherchées, telles que l'apparition de principes odorants (rose, ail, iris, patchouli, ...). Ainsi la complexité de modifications et la spécificité des espèces ou de leur utilisation interdisent de généraliser des conditions uniques de séchage.

Les techniques solaires :

Les capteurs solaires utilisés sont de tous types en fonction des quantités et des espèces de plantes à sécher : capteurs-toiture, serre de fabrication industrielle, ...

Les séchoirs peuvent être auto-construits à partir de matériaux locaux et disponibles et utiliser des bâtiments existants ou de fabrication industrielle avec le séchoir-serre solaire (type 7).

Le dimensionnement du séchoir, c'est-à-dire sa capacité de séchage, doit prendre en compte à la fois les besoins de séchage de pointe et les besoins totaux, en fonction des caractéristiques climatiques locales et des caractéristiques des plantes à sécher. Il nécessite une réflexion approfondie sur les plantes à sécher, l'organisation du travail, la commercialisation des produits, et plus globalement sur l'exploitation. Cette réflexion entraîne une optimisation des moyens de production et permet une maîtrise des coûts de production.

État du développement et perspectives

Actuellement, la plupart des séchoirs à plantes aromatiques et médicinales fonctionnent avec des énergies fossiles (gaz, fioul) ou de l'électricité.

Par ailleurs, l'on ne dispose pas de recensement précis sur le nombre de séchoirs solaires qui sont aujourd'hui en fonctionnement en Europe.

Toutefois les perspectives de développement sont importantes, pour plusieurs raisons :

- La très bonne adéquation entre la période de séchage (avril - octobre) et l'ensoleillement relativement important des régions productrices.
- La nécessité de réduire le déficit de nos échanges extérieurs avec les pays hors Union Européenne, en particulier pour les plantes dont la culture est possible dans la Communauté.
- L'accroissement "prévisible" de la consommation.
- La demande croissante de plantes de qualité.
- La recherche d'une sécurité d'approvisionnement.

Il existe également, une demande spécifique de plantes de haute qualité, produites en agriculture biologique pour les marchés de la Suisse, l'Allemagne et la Belgique.

Le séchage solaire des plantes aromatiques et médicinales peut donc se développer dans l'Union Européenne. De plus les technologies mises au point et les connaissances sont transposables dans d'autres pays, en particulier les pays en voie de développement.

Cependant, le marché des plantes aromatiques et médicinales est international, et la concurrence avec les pays producteurs à plus faible coût met les exploitants européens en situation difficile.

Le séchage solaire peut contribuer à la nécessaire diminution de leur coût de production, en diminuant à la fois les consommations énergétiques et les investissements liés au séchoir. L'adaptabilité des séchoirs solaires à la taille de l'exploitation est un atout à faire connaître auprès des producteurs. De plus, ils doivent réussir à faire reconnaître la qualité des produits séchés, ce qui nécessite acquisition de compétence et savoir-faire dans le séchage.

5.4 Le séchage solaire des fruits

La localisation des bassins de production des fruits, l'organisation des marchés sont à l'origine d'un contexte très contrasté caractérisé par :

- une production de fruits secs centrée sur les pays du Sud de l'Europe (Portugal, Espagne, France, Italie, Grèce);
- des importations beaucoup plus importantes que les productions nationales sauf pour des produits bien particuliers tels que les raisins secs en Grèce (80 % de la production mondiale de raisins secs blonds de Corinthe) ou les pruneaux d'Agen en France;
- des importations de produits concurrents à ceux de l'Union Européenne provenant soit de pays candidats à l'entrée dans l'Union Européenne (Turquie) ou de pays en voie de développement avec des niveaux de prix très bas (Chili, Égypte);
- l'émergence possible de produits séchés de haute qualité contrôlés sur la totalité du processus de production par des cahiers des charges (agriculture biologique par exemple).

Les fruits à sécher : que d'eau !

Si l'on exclut les produits importés frais (fruits tropicaux) séchés industriellement en Europe pour les besoins de l'agro-alimentaire (pâtisserie...), les produits à sécher sont certes peu nombreux mais ils ont comme point commun d'être très chargés en humidité au moment de la récolte.

Produits	Pays concerné	Humidité initiale	Humidité finale
Raisins	Grèce/Italie/Espagne	80%	15-20%
Abricots	Espagne/Portugal/France	85%	7-8%
Figues	Italie/Portugal	70%	9-10%
Prunes	France	80%	23%
Noix	France/Italie/Espagne	50%	20%
Pommes	France	85%	10-12%

Tableau 8 : indications d'humidité de récolte et d'humidité finale à atteindre pour quelques fruits.

Pour un séchage de qualité

La conduite du séchage doit permettre de garder les qualités désirées : aspect, arômes, humidité de stabilisation. En effet, un produit biologique en contact avec une température élevée durant un certain temps subit des dégradations (perte nutritionnelle). Le produit peut également subir des modifications physiques, mécaniques et chimiques (perte d'arôme...).

De plus, les fruits commercialisés en grande quantité doivent être homogènes.

Deux principaux procédés de séchage des fruits et légumes existent et se différencient par leur capacité : le séchage de petites quantités, effectué sur l'exploitation proprement dite, et le séchage de quantités plus importantes, sur l'exploitation ou en coopérative.

Pour les petites quantités : des séchoirs-serres

Les procédés traditionnels (séchage au soleil) sans recours à des équipements spécifiques sont très fréquemment employés. Les contraintes de main d'oeuvre (familiale le plus souvent ou saisonnière à bas coût) constituent le point sensible du séchage : les fruits doivent être mis à l'abri à chaque pluie. De plus les pertes occasionnées par les insectes, les champignons ou moisissures sont importantes. Les séchoirs solaires proposés utilisent le principe du séchoir-serre.

Les serres sont adossées à un mur (du bâtiment existant ou construit spécifiquement) et constituées d'une couverture plastique tendue sur une armature en bois. Ces séchoirs sont auto-construits, simples d'emploi, peu coûteux et polyvalents. L'air entre par la partie basse à l'opposé du mur, passe à travers le produit posé sur des claies en bois, et est évacué en partie haute. La ventilation naturelle (effet de cheminée) ou la ventilation forcée (par un ventilateur) sont utilisées. L'équipement en ventilation forcée permet une meilleure régularité du débit d'air et contribue à augmenter la capacité de séchage de l'installation et sa régularité.

Leurs principaux intérêts sont la réduction de la main d'oeuvre et de sa pénibilité, la forte limitation des pertes de produits par dégradations diverses, et l'amélioration de la qualité des fruits secs. Le coût du séchage représente environ 5% du coût de production.

Quelques dizaines de ce type de séchoir existent au Portugal et satisfont pleinement les utilisateurs. Ils peuvent être développés à plus grande échelle dans les pays du Sud de l'Europe comme dans les pays en voie de développement, mais le principal facteur limitant est la capacité d'investissement des utilisateurs potentiels, bien que le coût d'un séchoir solaire soit relativement faible.



Photo 7 : Séchage solaire de fruits au Portugal

Des séchoirs conçus pour les pays en voie de développement ont aussi été testés par des équipes européennes. Ils pourraient convenir aux besoins de certains producteurs européens.

D'autres équipes ont expérimenté des séchoirs solaires pour les fruits comme à Majorque (séchoir expérimental pour abricot), en Grèce (séchage du raisin de Corinthe), ... Mais les procédés mis en place correspondent à des quantités relativement importantes regroupées au niveau de structures collectives. Ils n'ont pas pour l'instant connu de développement et de dissémination dans leurs zones. Un des facteurs explicatifs peut être la faible rentabilité de l'investissement au vu du nombre de jours d'utilisation. Cela montre toute la difficulté de structurer une production et des producteurs dans un contexte de forte concurrence internationale, pour créer une dynamique de développement de produits séchés au solaire d'une part et de séchoirs solaires d'autre part.

Pour les grandes quantités, le soleil est encore trop cher.

Pour des produits "simples" à sécher (raisin) ou complexes (pruneaux) on recourt à des séchoirs parfois entièrement automatisés pour limiter les coûts de main d'oeuvre et avec une conduite de séchage imposée. Les équipements annexes au séchoir permettent la présentation de produits finis adaptés aux besoins des industries agro-alimentaires (mise en poudre, sélection des couleurs du produit sec, prétraitement, calibrage...).

Si les séchoirs anciens à combustible (tunnel de séchage) ont été peu améliorés sur le plan de leur performance énergétique, des séchoirs plus récents de taille industrielle (de 3 t/j à 10 t/j) permettent des économies d'énergie thermique de 20 à 30 % avec la récupération de chaleur. Des systèmes avec pompe à chaleur permettent de diviser les consommations énergétiques par 2,5 (en terme d'énergie finale), mais sont peu développés car l'investissement reste élevé.

L'énergie solaire pourrait intervenir en substitution partielle d'énergie fossile et ne peut en aucun cas constituer la seule source d'énergie. La rentabilité d'un capteur solaire s'évalue alors par rapport au coût des énergies fossiles, et leur faible coût actuel ne permet pas une forte rentabilité.

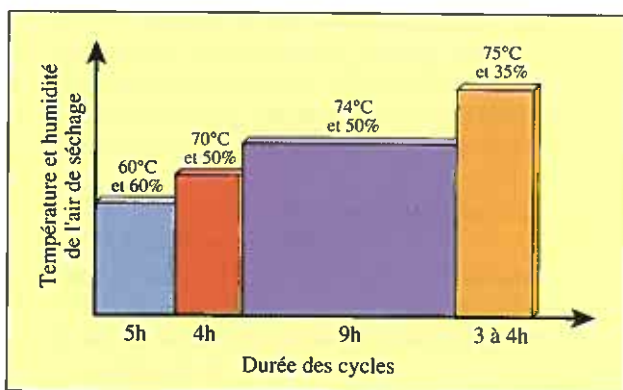


Figure 18 : Conduite imposée du séchage du pruneau d'Agen avec 4 cycles définis qui visent à obtenir un produit homogène en fin de séchage.

Un développement conditionné par les lois du marché et la concurrence internationale

Comme pour les plantes aromatiques et médicinales, le coût de séchage (main d'oeuvre et énergie) représente une part importante du coût de production qui peut atteindre 20 % du coût total.

Ce coût est valorisable quand il s'agit de produits spécifiques non soumis à la concurrence de produits venant de pays en voie de développement tels que les pruneaux, les pommes, ...

Par contre, si les produits secs sont soumis à la concurrence internationale, comme par exemple les raisins, les figues, les abricots, ... seule la vente locale (sur les marchés ouverts) et la reconnaissance de la qualité peuvent permettre de valoriser ces produits secs. Ceci correspond à deux modes de commercialisation : le premier basé sur une agriculture familiale locale, et le second - dont les marchés restent à évaluer - sur une valorisation en circuit long des produits secs de haute qualité reconnue par le circuit de commercialisation (grandes surfaces, magasins diététiques ou labellisés - "produit biologique" par exemple, et consommateurs).

La bonne adéquation entre la période de séchage (juin à octobre pour la plupart des produits) et le bon ensoleillement des régions productrices est une condition satisfaite le plus souvent pour mettre en oeuvre un séchage solaire. Mais elle est insuffisante : le circuit de commercialisation - et la plus value qu'il permet - prime, hélas, sur les techniques de séchage choisies. L'élaboration d'un label "séché à l'énergie solaire" est une piste à étudier pour un développement de ces produits secs à grande échelle.

6. Pour le développement du séchage solaire en Europe

Le séchage solaire des produits agricoles est aujourd'hui une technique mature qui présente un réel intérêt pour l'agriculture européenne. Les principaux facteurs susceptibles d'inciter les agriculteurs à adopter cette technique sont :

- la simplicité de mise en oeuvre et la fiabilité des capteurs solaires
- les bonnes performances énergétiques des capteurs
- la qualité des produits séchés
- le coût de fonctionnement en énergie thermique nul (ou faible) ainsi que les économies d'électricité.

De plus, la longue durée de vie des installations permet d'inscrire l'investissement dans une perspective de long terme.

Fourrages : quadrupler le nombre de séchoirs solaires

Le séchage solaire des fourrages est une réalité démontrée dans plusieurs pays : Norvège, Suède, Allemagne, Suisse, France et Italie. Le développement potentiel dans ces pays

est encore important : on peut estimer possible d'atteindre plus de 1000 séchoirs solaires supplémentaires dans chacun d'eux, ce qui représenterait non seulement une économie d'énergie de 3 à 5 000 tep par pays et par an, mais aussi un réel gain qualitatif et quantitatif des productions fourragères et des produits laitiers dérivés. Ce niveau de développement peut être atteint par l'équipement en capteurs solaires de séchoirs existants et par la réalisation systématique de capteurs solaires sur les nouvelles installations de séchage en grange.

La mobilisation des acteurs locaux du développement agricole (agriculteurs et structures de développement), l'élargissement des zones de développement actuelle, et la structuration des acteurs de la filière permettent d'envisager une dissémination à grande échelle. Les besoins d'accompagnement de ce développement sont relatifs à l'information et la formation, ainsi qu'à l'aide incitative à l'investissement. Le développement peut être rapide et important car plusieurs facteurs positifs sont déjà réunis : nombreuses installations de références, compétences, besoins de séchage, structures de développement, ...

Pour d'autres pays où les réalisations sont quasi-inexistantes - Grande-Bretagne, Écosse, Irlande, Belgique, Hollande, Danemark, Autriche, ... - il convient d'informer les agriculteurs et les acteurs locaux sur les atouts du séchage solaire et d'accompagner les réalisations par des transferts de compétences vers des structures locales.

Grains : de la démonstration à la dissémination

Excepté dans les pays scandinaves où il est bien développé, le séchage solaire des grains est à l'état de démonstration ou d'expérimentation. Les principaux obstacles sont relatifs d'une part à la faible sensibilité des agriculteurs due à un faible prix des énergies, et d'autre part à l'absence de reconnaissance de la qualité des produits séchés par les marchés.

Les actions prioritaires doivent permettre d'informer les utilisateurs potentiels (agriculteurs, petites coopératives, ...) des atouts du séchage solaire. Toutefois, un développement de capteurs solaires peut s'envisager sur les exploitations agricoles pratiquant déjà le stockage de leur céréales et maîtrisant ainsi leur commercialisation.

Plantes Aromatiques et Médicinales (PAM) et fruits : identifier des marchés

Le séchage solaire des plantes aromatiques et médicinales et celui des fruits est peu développé en dehors du Portugal où un premier développement existe. Des besoins de séchage sont pourtant présents, mais les produits secs sont soumis à la concurrence internationale.

Le séchage solaire est un atout pour les exploitations souhaitant commercialiser en circuit court des produits secs. En revanche, la commercialisation en circuit long nécessite une reconnaissance de la qualité des produits séchés. La création d'un label "produit séché à l'énergie solaire" peut y contribuer.

Garantir les performances

Quelque soit le produit séché, la progression vers la notion de "garantie de performance" est un atout pour le développement à grande échelle. Elle est souhaitable pour inciter les acteurs locaux à s'approprier la technologie. Elle peut inciter des constructeurs à fabriquer certains types de séchoirs solaires comme cela existe déjà pour le séchage des plantes ou des fruits.

Échanger, transférer

Des échanges nationaux ou internationaux devraient aussi être proposés aux agriculteurs et aux acteurs locaux afin de les sensibiliser au séchage solaire de leur production. Ils inciteraient les équipes à mieux se connaître et à échanger leurs expériences. Cela permettrait également d'envisager un développement international concerté.

En effet, et bien que le contexte soit légèrement différent d'un pays à l'autre, les équipes proposent des technologies plus ou moins sophistiquées et adaptées. Connaître d'autres réalisations doit permettre à chacun de mieux percevoir les possibilités techniques de mise en oeuvre de l'énergie solaire, et ainsi de mieux répondre aux demandes des agriculteurs.

Enfin, comme toute innovation, le développement du séchage solaire passe par l'analyse et l'élaboration de stratégies qui doivent obligatoirement intégrer les conditions sociales du développement. Transformer le séchage solaire en "technologie appropriée" donnera toutes les chances à un transfert réussi du séchage solaire en Europe mais aussi vers les pays en voie de développement, où la bonne conservation des denrées alimentaires constitue un enjeu fondamental pour un développement durable.

2. ÉTUDES DE CAS

1. Séchage solaire de fourrages en France



M. PROVENT Christian à Puygros (Savoie)

L'exploitation d'une surface agricole de 50 ha en prairie est spécialisée dans la production laitière (40 vaches Tarines). La totalité du lait, commercialisé à une coopérative, est transformée en Tomme de Savoie et en Emmental (fromages d'Appellation d'Origine Contrôlée interdisant l'usage de l'ensilage). En réalisant en 1994 un capteur solaire, M. PROVENT a cherché à accroître son rythme de récolte et à améliorer la qualité de son foin.

Description de l'installation

L'installation de séchage solaire utilise un capteur toiture de type 1 de 472 m². La toiture - fibrociment noir teinté dans la masse, orienté à 60° sud-est et incliné à 30 % - de l'étable entravée est équipée d'une sous-face isolante en polystyrène extrudé de 40 mm d'épaisseur, clouée sous panne à 22 cm.

Un ventilateur de 15 kW débitant 50 000 m³/h aspire l'air chaud du capteur en bout d'étable et le pulse dans une gaine de distribution située entre les deux cellules de séchage. Capacité de stockage : 1800 m³ de foin dans 2 cellules de 150 m² chacune.

Résultats techniques

- Élévation de la température de l'air jusqu'à 12 degrés C° selon l'intensité du rayonnement.
- Séchage de 2 à 4 tonnes de foin sec par jour.
- Consommation moyenne : 12 500 kWh d'électricité par an.
- Énergie récupéré : de 40 000 à 50 000 kWh par an.
- Coût de fonctionnement : 25 Francs par tonne de foin sec.

Depuis la mise en service de l'installation solaire, M. PROVENT enregistre :

- une réduction de ses dépenses en concentrés de 10 % (8 000 F), en engrais de 15 % (1 500 F), en désherbants de 40 % (4 000 F), en produits vétérinaires de 15 % et en électricité de 20 %,
- une réduction de son temps de travail de 20 % (50 % par coupe mais il fait 3 à 4 coupes au lieu de 2),
- une amélioration de la qualité du lait qui engendre une

augmentation de son prix de vente de 5 centimes par litre (10 000 F/an).

Soit des plus-values indirectes de 25 000 F/an environ. Pour un troupeau de 40 vaches laitières dans cette région, elles varient entre 20 000 et 80 000 F/an.

Résumé

Localisation :	Puygros en Savoie (France)
Date de réalisation du capteur solaire :	1994
Surface de capteur :	472 m ²
Montant de l'investissement :	40 000 Francs
Rendement moyen du capteur :	30 à 45 %
Quantité séchée par an :	160 tonnes
Nb de jours d'utilisation annuel :	50 jours
Énergie annuelle récupérée :	40 000 à 50 000 kWh par an

2. Séchage solaire de fourrages en Italie



M. MORANDUZZO Edoardo à Pieve Tesino (Province Autonome de TRENTE - Italie du Nord)

L'exploitation d'une surface agricole de 60 ha - pour l'essentiel en prairies naturelles - est spécialisée dans la production laitière (35 vaches). Pendant les trois mois de l'été, les animaux sont en pâturage d'altitude. En 1992, M. MORANDUZZO décide d'équiper d'un capteur solaire son installation de séchage en grange (réalisée en 1989) afin d'améliorer la qualité de son fourrage et d'accroître son débit de séchage.

Description de l'installation

- Un capteur toiture de type 1 de 230 m² : toiture en bac acier de couleur noire (surface absorbante), sous-face isolante posée à 15 cm réalisée sur l'étable des vaches ainsi isolée.
- Récupération de l'air chaud en bout de toiture.
- Circulation de l'air entre pannes.
- Un ventilateur centrifuge de 11 kW et de débit 30 000 m³/h.
- Capacité de stockage : 1890 m³ de foin (2 cellules de 135 m² chacune).
- Régulation de la ventilation : sonde thermohygro-métrique pour contrôler l'humidité de l'air de ventilation et celle à la sortie du séchage.

Résultats techniques

- L'installation fonctionne généralement 8 heures par jour (entre 10 heures et 18 heures) au mois de juin, juillet et août.

- Élévation de la température de l'air de 10 à 12 °C en moyenne (sur 8 heures) et diminution de l'humidité relative de près de 50 %.
- Séchage de 150 à 200 tonnes de foin sec par an en 40 à 60 jours de fonctionnement (presque uniquement le jour)
- Énergie récupérée : 35 000 à 50 000 kWh par an.

L'exploitant estime que le séchage solaire permet :

- une amélioration quantitative et qualitative du fourrage produit sur l'exploitation,
- le séchage du fourrage quand les conditions climatiques ne sont pas optimales,
- une réduction importante du temps de séchage (par rapport à une ventilation ambiante).

Résumé

Localisation :	Pieve Tesino (Nord de l'Italie)
Date de réalisation du capteur solaire :	1992
Surface de capteur :	230 m ²
Montant de l'investissement :	80 000 Francs Français
Rendement moyen du capteur :	40 à 50 %
Quantité séchée par an :	150 à 200 tonnes
Nb de jours d'utilisation annuel :	40 à 60 jours
Énergie annuelle récupérée :	35 000 à 50 000 kWh

3. Séchage solaire de fourrages en Suisse



M. HOFER Rolf à Leimbach (près du lac de Constance)

L'exploitation d'une surface agricole de 13,5 ha est spécialisée dans la production laitière (18 vaches). M. HOFER prend aussi quelques chevaux en pension sur son exploitation. Le contingent laitier de l'exploitation s'élève à 82 500 kg. Tout le lait produit est transformé, par une coopérative, en Gruyère. L'ensilage est une technique formellement interdite sur la zone où se situe l'exploitation. Les prairies occupent 85 % de la surface agricole. En 1991, M. HOFER a équipé son installation de séchage d'un capteur solaire pour accroître son rythme de récolte et améliorer la qualité de son fourrage.

Description de l'installation

L'installation de séchage solaire utilise un capteur toiture de type 1 de 275 m². Le pan de toiture exposé au sud-est (couvert en Eternit brun et incliné à 40 %) du bâtiment de séchage de 27,5 m constitue le capteur solaire. L'aire de séchage d'une surface de 153 m² se situe au dessus de

l'étable des vaches et des boxes à chevaux. L'aspiration de l'air dans le capteur se fait aux deux extrémités de la toiture sur une largeur de 10 m. La récupération de l'air chaud du capteur a lieu en position quasi centrale du toit (une longueur d'aspiration de 12,5 m équipée d'une sous-face à 16 cm et une autre de 15 m équipée d'une sous-face à 18 cm). Cette zone de récupération débouche directement sur le caisson du ventilateur. Celui ci, assurant un débit de 60 000 m³/h, ventile l'aire de séchage. La vitesse de l'air dans le capteur est de l'ordre de 5 m/s. L'installation permet de sécher et de stocker les 70 tonnes de foin nécessaires à l'alimentation du troupeau.

Résultats techniques

Le capteur solaire permet d'élever la température de l'air de 3 à 6 °C selon l'énergie incidente du rayonnement. Le rendement moyen du capteur varie entre 40 et 50 %. L'installation solaire fonctionne 30 à 35 jours par an et permet de récupérer entre 20 000 et 30 000 kWh.

Résumé

Localisation :	Leimbach (Suisse orientale)
Date de réalisation du capteur solaire :	1991
Surface de capteur :	275 m ²
Montant de l'investissement :	14 000 Francs suisse
Rendement moyen du capteur :	40 à 50 %
Quantité séchée par an :	70 tonnes
Nb de jours d'utilisation annuel :	30 à 35 jours
Énergie annuelle récupérée :	20 000 à 30 000 kWh

4. Séchage solaire de fourrages en France



M. BAZERQUE André à Castelnau- Durban (Ariège, près des Pyrénées)

L'exploitation d'une surface agricole de 40 ha - pour l'essentiel en prairies naturelles - est spécialisée dans la production laitière (18 vaches). Tout le lait est transformé sur l'exploitation en fromage fermier. En 1983, M. BAZERQUE décide de construire une installation de séchage en grange : "l'ensilage ne m'est pas interdit mais fortement déconseillé, le foin de qualité est pour moi un

passage obligé ". De plus, la mécanisation de la chaîne de récolte et de la distribution hivernale des fourrages était aussi son objectif. Son exploitation étant située au pied des Pyrénées, dans une région fortement ensoleillée, il opte pour l'énergie solaire et devient du même coup un des pionniers du séchage solaire en France. En 1990, une modification du bâtiment d'élevage a engendré une transformation du capteur.

Description de l'installation

Un capteur toiture de type 1 de 100 m² orienté au sud et incliné à 25 % : toiture en bac acier de couleur rouge et panneaux isolants en mousse de polyuréthane. 125 m² supplémentaires seront ajoutés en 1996.

Vitesse de circulation de l'air dans le capteur : 4 m/s.

Récupération de l'air chaud au centre du toit.

Un ventilateur hélicoïde de 5,5 kW : débit 32 000 m³/h.

Capacité de stockage : 1000 m³ de foin (2 cellules de 100 m² chacune).

Pré-séchage au champ de 24 à 30 heures.

Résultats techniques

Élévation de la température de l'air de 2 à 3 °C en moyenne.

Rythme de récolte en adéquation avec le débit de séchage : 2 à 3 jours de séchage pour chaque récolte, avec ventilation uniquement le jour.

Séchage de 70 à 80 tonnes de foin sec/an en 30 à 40 jours de fonctionnement

Énergie récupérée : 5 000 à 6 000 kWh par an.

L'exploitant estime que le séchage solaire permet :

- l'obtention d'un foin toujours d'excellente qualité,
 - de récolter précocement la première coupe favorisant ainsi les repousses,
 - une mécanisation de la récolte du fourrage et de sa distribution pour partie vu la disposition des bâtiments.
- Par ailleurs, la taille des bâtiments peut limiter l'agrandissement du cheptel, qui est actuellement adapté au volume de stockage.

Résumé

Localisation :	Castelnau-Durban Ariège (France)
Date de réalisation du capteur solaire :	1983 puis 1990
Surface de capteur :	100 m ²
Montant de l'investissement :	12 000 FF en 1990
Rendement moyen du capteur :	30 à 40 %
Quantité séchée par an :	70 à 80 tonnes
Nb de jours d'utilisation annuel :	30 à 40 jours
Énergie annuelle récupérée :	5 000 à 6 000 kWh

5. Séchage solaire de fourrages en balles rondes en Allemagne



M. Florian HÄUSER à Eggenfelden (Bavière)

Située dans l'Est de la Bavière, cette exploitation d'une surface agricole de 50 ha est orientée essentiellement vers la production de céréales (40 ha d'orge, avoine, colza) et dispose également d'un petit troupeau de 10 vaches allaitantes. Un centre équestre est présent sur l'exploitation (30 chevaux de selle).

En 1985, M. HÄUSER a mis en place une installation de séchage solaire de balles rondes afin d'améliorer la qualité des fourrages. Elle permet de sécher une partie du fourrage nécessaire à l'alimentation du cheptel.

Description de l'installation

Un capteur serre de type 6 de 90 m², sur le toit de l'installation - une moitié orientée à l'Est et l'autre à l'Ouest. La tente en ossature bois est couverte d'un tissu noir poreux et indéchirable (tissu de Nicolon). La base de la serre est recouverte d'une bâche noire en polyéthylène.

Deux ventilateurs hélicoïdes identiques : 1,6 kW chacun, débit 7200 m³/h.

Deux canaux en contreplaqué de 0,36 m² de section prolongés par des tuyaux flexibles en PVC assurent la distribution de l'air jusqu'aux balles rondes.

Les balles, entourées d'une gaine en polyéthylène maintenue par 2 sangles élastiques sont ventilées par le haut et l'air chargé en eau s'évacue par le bas.

Séchage de 15 ou 30 balles en même temps.

85 heures consacrées à l'auto-construction.

Résultats techniques

- Élévation de la température de l'air de 4 à 10 °C
- 30 balles séchées en 3 à 4 jours (ventilation de 9 heures à 20 heures)
- Annuellement, l'installation fonctionne en moyenne entre 2 et 3 semaines et sèche de 50 à 100 balles.

M. HAÜSER souligne surtout une amélioration de la

qualité des fourrages. Il précise : "Depuis que je sèche mes balles, j'ai un fourrage sans poussières, je ne jette plus de foin et mes chevaux ne toussent plus".

Résumé

Localisation :	Eggenfelden (Allemagne)
Date de réalisation du capteur solaire :	1985
Surface de capteur :	90 m ²
Montant de l'investissement :	5 600 DM pour les matériaux
Rendement moyen du capteur :	30 à 60 %
Quantité séchée par an :	10 à 20 tonnes
Nb de jours d'utilisation annuel :	15 à 20 jours
Énergie annuelle récupérée :	3 000 à 5 000 kWh

6. Séchage solaire de fourrages en balles rondes en Allemagne

M. BRAUN à Freising (près de Munich)

L'exploitation - 45 ha de surface agricole - produit des semences biologiques de céréales (30 ha) et du lait (22 vaches). En 1995, M. BRAUN met en place une installation de séchage de balles rondes. Soucieux d'économiser les ressources fossiles, il décide de joindre un capteur solaire à l'installation de séchage. L'objectif recherché est une amélioration de la qualité du fourrage destiné à son cheptel et du lait vendu à la ferme.

Description de l'installation

Un capteur toiture de 720 m² (50 m x 14,5 m) incliné à 25 % : une moitié orientée à l'Est, l'autre moitié à l'Ouest. Hauteur du canal de circulation de l'air : 12 cm.

Une gaine d'acheminement de l'air en contreplaqué vers deux ventilateurs.

Un ventilateur centrifuge de 9,2 kW et de débit 9,4 m³/s

Un autre ventilateur centrifuge de 15 kW et de débit 18,5 m³/s

Des bouches de soufflage : 1 m de diamètre.

Capacité de séchage : 30 balles rondes (1,2 m de diamètre) de 250 kg de matière sèche.

Un réchauffeur d'appoint de 200 kW.

Résultats techniques

Élévation moyenne de la température de l'air de 2 à 4 °C.

Capacité de séchage : 30 balles rondes en 12 à 20 heures.

En 1995, 270 balles séchées au total.

Consommation : 2 à 3 litres de fioul par balle en moyenne (8000 kWh d'énergie fossile par an).

Énergie récupérée : 15 000 à 20 000 kWh.

Depuis la mise en place du séchage solaire, M. BRAUN observe surtout :

- l'amélioration de la qualité des fourrages,
- l'augmentation de la production de son troupeau et le développement de sa clientèle,
- la réduction de ses achats d'aliment.

Pour accroître le pouvoir évaporatoire de l'air à l'automne, M. BRAUN envisage de mettre en place un chauffage au bois afin de réduire l'utilisation du fioul.

Résumé

Localisation :	Freising (Allemagne)
Date de réalisation du capteur solaire :	1995
Surface de capteur :	720 m ²
Montant de l'investissement :	20 000 DM
Rendement moyen du capteur :	30 à 40 %
Quantité séchée par an :	70 à 100 tonnes
Nb de jours d'utilisation annuel :	10 à 15 jours
Énergie annuelle récupérée :	15 000 à 20 000 kWh

7. Séchage solaire de fourrages et de grains en Norvège



M. RANDY Hans à Klofta (près d'Oslo)

L'exploitation d'une surface agricole de 20 ha est basée sur un élevage de vaches laitières et sur une production de céréales (blé, orge et avoine). Toutes les terres de l'exploitation sont en fermage.

En 1989, M. RANDY, souhaitant exploiter l'énergie solaire gratuite pour sécher plus vite le foin et les grains, a modifié son installation de séchage et l'a équipée d'un capteur solaire. Les principales raisons de la création du capteur solaire sont le coût modéré d'un capteur de ce type, l'augmentation de la capacité de séchage et la réduction des risques d'altération de la qualité des produits à sécher (risque toujours présent avec une ventilation à air ambiant).

L'installation est utilisée pour sécher :

- du foin en juin, juillet et parfois en septembre,
- des grains en août et septembre.

Description de l'installation

L'installation de séchage solaire utilise un capteur toiture de type 1 de 290 m². La toiture en tôle ondulée noire équipée d'une sous-face posée à 10 cm (panneau en bois) constitue le capteur solaire. La vitesse de l'air dans le capteur est de l'ordre de 5 m/s.

L'installation dispose de deux ventilateurs hélicoïdes d'une puissance de 11 kW débitant 50 000 m³/h chacun. Le grain et le foin sont séchés dans la même cellule de 160 m² de surface.

Le foin, après avoir été préséché au champ, est séché en 2 à 3 jours. Puis il est pressé et stocké dans un hangar à proximité laissant ainsi l'aire de séchage libre pour les

céréales. Celles ci, une fois sèches, sont stockées dans un silo. Le tracteur équipé d'un chargeur frontal permet le chargement et le déchargement du foin et des céréales de l'aire de séchage.

En 1989, le capteur solaire a coûté 1000 Ecus.

Résultats techniques

Avec cette installation solaire, M. RANDY sèche 40 à 50 tonnes de foin et 100 tonnes de céréales par an. Le capteur solaire permet d'élever la température de l'air de 2,5 °C en moyenne. Le rendement moyen du capteur se situe entre 50 et 60 %.

L'installation :

- fonctionne 30 à 40 jours par an,
- permet de récupérer 20 000 à 30 000 kWh par an.
- consomme en moyenne 5400 kWh d'électricité par an.

Résumé

Localisation :	Klofta près d'Oslo (Norvège)
Date de réalisation du capteur solaire :	1989
Surface de capteur :	290 m ²
Montant de l'investissement :	1 000 Ecus
Rendement moyen du capteur :	50 à 60 %
Quantité séchée par an :	40 à 50 tonnes de foin 100 tonnes de céréales
Nb de jours d'utilisation annuel :	30 à 40 jours
Énergie annuelle récupérée :	20 000 à 30 000 kWh

8. Séchage solaire de riz au Portugal



M. Manuel RAMOS SIMOES à Lourçal

L'exploitation d'une surface agricole de 126 ha est spécialisée dans la production du riz.

En 1993, M. Manuel RAMOS SIMOES décide de construire une installation de séchage solaire afin de pouvoir sécher le riz produit sur l'exploitation. En effectuant ce choix, l'agriculteur a cherché à améliorer la qualité de son riz (le séchage à basse température assure une meilleure qualité des grains de riz séchés réduisant ainsi le pourcentage de pertes dues aux températures élevées qui rendent le riz cassant) tout en

limitant les consommations d'énergie fossile, donc le coût de fonctionnement de son installation de séchage. L'installation est dimensionnée pour pouvoir sécher 800 tonnes de riz par an. Le séchage du riz se déroule en octobre et novembre. A cette époque dans cette région, la température moyenne de l'air est de 17 °C, l'hygrométrie de 83% et le rayonnement solaire de 4,5 kWh/m²/jour.

Description de l'installation

Un capteur toiture de type 1 de 670 m² exposé au Sud, incliné à 30 % : toiture (bâtiment de stockage et de séchage du riz) en tôle galvanisée peinte en noir équipée d'une sous-face posée à 20 cm (panneau en contreplaqué de 40 mm d'épaisseur).

Aspiration de l'air aux deux extrémités. Récupération de l'air chaud au centre de la toiture.

Le séchage est réalisé dans quatre silos métalliques, à structure renforcée, de 5,2 m de diamètre et de 5,78 m de hauteur. Pour chacune des 4 cellules de séchage, on a :

- un faux-fond métallique (à 80 cm du bas) permettant le passage de l'air,
- un ventilateur de 14,7 kW,
- deux vis sans-fin permettent le remplissage et l'extraction du riz
- sur la partie supérieure, un système de répartition du riz pendant le remplissage.

Le stockage du riz sec est effectué dans un grand silo et dans les 4 cellules de séchage, ce qui leur donne une double fonction.

Le séchage est contrôlé par :

- la mesure des températures de l'air et des grains au travers de sondes thermocouples,
- par la mesure de l'humidité des grains au travers d'un hygromètre
- ou par un temps de fonctionnement des ventilateurs.

Résultats techniques (campagne de séchage 1993)

L'installation a :

- fonctionné pendant 15,5 jours (soit au total 125 heures),
- séché 350 tonnes de riz,
- évaporé 24 tonnes d'eau (de 23 % à 14,5 % d'humidité),
- a consommé 3 900 kWh d'électricité, soit 0,163 kWh d'électricité par kg d'eau évaporée,
- récupéré 13 500 kWh, soit 0,56 kWh d'énergie récupérée par kg d'eau évaporée.

Au vu de ces résultats, l'installation permet :

- d'évaporer en moyenne 190 kg d'eau par heure,
- de sécher en moyenne 23,5 tonnes de riz par jour,
- un coût de fonctionnement 4 fois plus faible que celui d'une installation classique (séchoir type "Kongskilde" fonctionnant au gaz).

Le capteur solaire a permis un échauffement moyen de l'air de 7,5 °C.

Résumé

Localisation :	Louriçal (Portugal)
Date de réalisation du capteur solaire :	1993
Surface de capteur :	670 m ²
Montant de l'investissement :	1 000 000 d'escudos (surcoût du solaire par rapport à une installation de séchage classique au gaz)
Rendement moyen du capteur :	30 %
Quantité séchée par an :	350 tonnes
Nb de jours d'utilisation annuel :	15 jours
Énergie annuelle récupérée :	13 500 kWh

9. Séchage solaire de grains en Norvège



Mme KOLLSGARD Bergliot à As (près d'Oslo)

L'exploitation, d'une surface agricole de 30 ha, est spécialisée dans la production de céréales (blé, orge et avoine). En 1986, les parents de Mme KOLLSGARD ont dû refaire la toiture de la vieille grange. La partie exposée au Sud a été transformée en capteur solaire (pose d'une sur-toiture en tôles noires) afin de pouvoir sécher les céréales produites sur l'exploitation. Le chauffage au fioul étant très cher et soumis à de fortes fluctuations de prix, l'exploitation a préféré opter pour le séchage solaire dont l'énergie est gratuite et non polluante. De plus le séchage solaire permet d'accroître le débit de séchage et de limiter considérablement le risque d'altération de la qualité des grains. L'installation fonctionne en août et septembre.

Description de l'installation

Un capteur toiture de type I de 430 m² (8,6 m x 50 m) incliné à 34 ° : un seul pan orienté au Sud.

Hauteur du canal de circulation de l'air : 19 cm.

Au faitage une gaine récupère l'air réchauffé et permet de le canaliser jusqu'au ventilateur.

La vitesse de l'air dans le capteur est de l'ordre de 1 m/s.

Un ventilateur centrifuge de 11 kW : débit 30 000 m³/h.

Deux cellules de séchage de 125 m² de surface chacune.

Résultats techniques

- Élévation moyenne de la température de l'air : 6 à 8 °C, dont la moitié environ proviennent de l'aspiration au Sud.
- Séchage de 120 à 160 tonnes de céréales par an en 25 à 40 jours.
- Rendement moyen du capteur : 15 %. Ce rendement assez faible viendrait d'une circulation irrégulière et d'une vitesse trop faible de l'air dans le capteur.

Résumé

Localisation :	As près d'Oslo (Norvège)
Date de réalisation du capteur solaire :	1986
Surface de capteur :	430 m ²
Montant de l'investissement :	1 300 Ecus
Rendement moyen du capteur :	15 %
Quantité séchée par an :	140 à 160 tonnes
Nb de jours d'utilisation annuel :	20 à 30 jours
Énergie annuelle récupérée :	6 500 à 9 500 kWh

10. Séchage solaire de grains en France



M. BARADAT Paul à Saint Clar (Gers, près de Auch; Sud-Ouest)

L'exploitation d'une surface agricole de 120 ha est spécialisée dans la production de céréales biologiques. En 1991, M. BARADAT, soucieux de protéger l'environnement et d'économiser les énergies fossiles s'équipe d'une unité de stockage des grains de 700 tonnes en même temps que d'un système de séchage solaire. Le solaire est une suite logique des orientations prises sur l'exploitation. Depuis, M. BARADAT est devenu stockeur officiel de céréales biologiques dans le département du Gers pour la Coopérative Agribio de Midi-Pyrénées et Aquitaine.

Description de l'installation

Un capteur toiture de type I de 260 m² : pan Sud de la toiture du hangar inclinée à 35 %, isolée sous pannes (polystyrène extrudé 30 mm, à 10 cm),

Un ventilateur centrifuge de 15 kW muni d'un inclineur et de 2 vitesses de rotation, assure un débit constant de 4 m³/s (réglages en fonction de la nature et de la hauteur des grains),

Vitesse de passage de l'air dans les grains : 13 cm/s

Une cellule de séchage : volume utile de 152 m³ (diamètre de 6,23 m).

Cette cellule est équipée :

- d'une vis permettant l'extraction de couches régulières de grain sec par le bas de la cellule et leur acheminement vers les cellules de stockage,
- d'un faux fond perforé assurant le passage de l'air chaud,
- d'une vis permettant le remplissage de la cellule.

Un générateur d'air chaud de 350 kW, à puissance modulante, de type veine d'air, fonctionnant au gaz, placé avant le ventilateur, permet un réchauffage complémentaire de l'air. Un automate permet de programmer le soutirage du produit sec et le chargement de produit humide en fonction de la température de séchage ou celle du produit.

M. BARADAT associe le réchauffeur au solaire pour accroître son débit de séchage et donc répondre aux flux importants de grains à sécher.

Résultats techniques (résultats de la campagne de séchage 1995)

- Élévation de la température de l'air jusqu'à 20 °C selon l'intensité du rayonnement.
- Fonctionnement : 15 jours en solaire seulement et 10 jours en solaire plus réchauffage au gaz.
- Avec le solaire (seul) la consommation énergétique totale est de 0,5 kWh/kg d'eau évaporée, dont seulement 0,15 kWh/kg en énergie payante (électricité).
- Énergie récupérée : 12 000 à 15 000 kWh.
- Quantités séchées : 320 tonnes de tournesol, 200 tonnes de céréales d'été et 30 tonnes de maïs.

Résumé

Localisation :	Cadeilhan dans le Gers (France)
Date de réalisation du capteur solaire :	1991
Surface de capteur :	260 m ²
Montant de l'investissement :	75 000 de surcoût dû au capteur solaire
Rendement moyen du capteur :	30 à 40 %
Quantité séchée par an :	550 tonnes
Nb de jours d'utilisation annuel :	25 jours dont 15 en solaire seul
Énergie annuelle récupérée :	12 000 à 15 000 kWh

11. Séchage solaire de plantes aromatiques en Allemagne



M. REINHARD à Bombastus Hof (Weilburg-Gaudernbach)

M. REINHARD, producteur de plantes aromatiques et médicinales, a construit en 1991 une installation de séchage solaire de plantes aromatiques. Les deux objectifs recherchés étaient l'amélioration de la qualité des produits et la réduction du coût de production. L'aspect écologique de l'installation est aussi une motivation supplémentaire.

Description de l'installation

L'installation de séchage solaire utilise un capteur serre de type 7. Le capteur se compose de 9 modules indépendants. Chaque module est constitué :

- d'une couverture plastique de 30 m² servant de toiture et de capteur solaire,
- d'un ventilateur hélicoïde de 0,5 kW débitant 4 000 à 6 000 m³/h,
- d'une surface de séchage de 12 m²,

- d'un volume de séchage de 8 m³ (environ 300 kg de sauge officinale).

La couverture plastique est doublée et délimite un passage de l'air de 70 mm.

Résultats techniques

Le capteur solaire permet d'élever en moyenne la température de l'air de 15 °C et est utilisé 60 à 80 jours par an aux mois de mai, juillet et septembre.

Le rendement moyen du capteur est de 40 %.

L'installation utilise 2 500 kWh d'électricité par an et permet de récupérer environ 35 000 à 45 000 kWh par an. Le coût du séchage s'élève à 1,2 à 1,3 DM par kg de produits séchés.

Résumé

Localisation :	Weilburg (Allemagne)
Date de réalisation du capteur solaire :	1991
Surface de capteur :	270 m ²
Montant de l'investissement :	120 000 DM
Rendement moyen du capteur :	40 %
Quantité séchée par an :	180 tonnes de plantes fraîches
Nb de jours d'utilisation annuel :	60 à 80 jours
Énergie annuelle récupérée :	35 000 à 45 000 kWh

12. Séchage solaire de plantes aromatiques en France



M. RASCLARD Yves à Poët-Laval (Drôme)

L'exploitation d'une surface agricole de 30 ha est spécialisée dans la production de plantes aromatiques et médicinales (thym, origan, sauge officinale, romarin, plantes médicinales diverses, ...).

En 1989, M. RASCLARD, désireux de sécher économiquement sa production de plantes aromatiques, décide de construire une installation de séchage solaire.

Description de l'installation

L'installation de séchage solaire utilise un capteur toiture de type 1 de 406 m². L'installation solaire est constituée d'une toiture en tôle bac-acier noire (surface absorbante) et d'une couche d'isolant (panneaux en mousse de polyuréthane posés à 18 cm des tôles) entre lesquelles circule l'air de ventilation. La longueur du capteur est de 20 m et sa largeur de 20 m.

L'installation dispose d'un ventilateur hélicoïde à deux vitesses de rotation. La petite vitesse assure un débit de 25 000 m³/h, alors que la seconde assure un débit deux fois plus important. Les plantes sont séchées dans des caissons.

L'installation en comporte 3 de surfaces identiques de 33 m² (surface de séchage totale de 100 m²).

L'installation est équipée d'une chaudière à bois d'appoint d'une puissance de 116 kW.

Résultats techniques

Avec cette installation solaire, M. RASCLARD sèche en moyenne annuellement :

- 0,8 à 1 tonnes de thym (produit sec),
- 2 tonnes de plantes médicinales,
- 1 tonnes d'origan,
- 0,3 à 0,5 tonne de romarin,
- 0,7 à 0,8 tonne de sauge officinale.

En moyenne, l'installation permet de sécher 30 à 40 m³ de thym frais en 32 à 36 heures (soit 130 à 150 kg de produit fini par jour). Depuis la création de l'installation solaire, la chaudière à bois n'a jamais été utilisée.

Le rendement moyen du capteur se situe entre 30 et 40 %. La consommation spécifique de l'installation de séchage est voisine de 3,5 kWh par kg d'eau évaporée.

Le capteur solaire est utilisé entre 35 et 45 jours par an (entre le 15 mai et le 1er novembre).

Les difficultés conjoncturelles du marché des plantes aromatiques font que le séchoir n'est pas utilisé à son maximum. En effet, lors de sa réalisation en 1989, M. RASCLARD prévoyait de sécher jusqu'à 20 tonnes de produit fini par an.

Actuellement, l'installation solaire récupère 25 000 à 35 000 kWh par an et consomme en moyenne 7 500 à 8 000 kWh d'électricité par an.

Résumé

Localisation :	Poët-Laval - Drôme (France)
Date de réalisation du capteur solaire :	1989
Surface de capteur :	406 m ²
Montant de l'investissement :	83 500 Francs français
Rendement moyen du capteur :	30 à 40 %
Quantité séchée par an :	5 à 6 tonnes de produit fini
Nb de jours d'utilisation annuel :	35 à 45 jours
Énergie annuelle récupérée :	25 000 à 35 000 kWh

13. Séchage solaire de fruits en France



M. MATHIEU Philippe à Montaulieu (Drôme)

L'exploitation agricole est spécialisée dans la production de fruits (abricots, prunes Reine Claude, ...). Une société anonyme à responsabilité limitée (SARL) assure la vente des fruits.

En 1995, face aux difficultés croissantes du marché, M. MATHIEU, décide de construire un séchoir solaire afin de pouvoir conserver les fruits invendus de la journée.

Description de l'installation

L'installation de séchage solaire utilise un capteur toiture de type 1 de 100 m². Deux pans de toiture d'un bâtiment de 12 m de long (couvert en éternit brun et incliné à 25%), exposés au Sud-Est et Nord-Ouest, équipés d'une sous-face posée à 11 cm (panneau en polystyrène de 50 mm d'épaisseur) constituent le capteur solaire.

L'air, aspiré par une extrémité, traverse le pan Sud-Est. Puis il est collecté dans une gaine qui permet d'assurer son transfert vers le pan Nord-Ouest où il circule avant d'être récupéré dans la seconde gaine collectrice reliée au ventilateur hélicoïde (puissance : 0,55 kW; débit : 2 000 m³/h).

L'aire de séchage est composée de 10 claies superposées - surface unitaire égale à 2,76 m² (1,15 m x 2,4 m) - dans un caisson situé à l'extérieur du bâtiment capteur. Chaque claie peut contenir 12 kg d'abricots frais.

Résultats techniques

En 1995 - première année de fonctionnement - M. MATHIEU n'a pas beaucoup séché d'abricots et de prunes (50 kg d'abricots secs et 20 kg de prunes sèches). Cette première année a servi à la mise au point du séchoir. Le capteur solaire doit permettre d'élever la température de l'air de 15 à 17 °C en moyenne.

Il est prévu que le séchoir solaire :

- puisse sécher jusqu'à 120 kg d'abricots frais par jour,
- fonctionne uniquement pour sécher les quantités de fruits invendus pendant 1 à 2 mois par an.

Dans l'état actuel des choses, M. MATHIEU souligne qu'il est difficile :

- d'éviter le brunissement et le flétrissement de ses fruits,
- de sécher rapidement les fruits.

Résumé

Localisation :	Montaulieu (sud-est de la France)
Date de réalisation du capteur solaire :	1995
Surface de capteur :	100 m ²
Montant de l'investissement :	22 300 Francs Français
Rendement moyen du capteur :	25 % (prévisions)
Quantité séchée par an :	3 à 7 t de fruits frais (prévisions)
Nb de jours d'utilisation annuel :	30 à 50 jours (prévisions)
Énergie annuelle récupérée :	4 500 à 7 000 kWh (prévisions)

3. LISTE D'ORGANISMES DE DÉVELOPPEMENT DU SÉCHAGE SOLAIRE

ALLEMAGNE :

- IST Anlagenbau GmbH, U. LUBOSCHIK
Ritterweg 1,
D-79400 KANDERN WOLLBACH
Tel : (49) 7626-91 54 17 Fax : (49) 7626-91 54 30
- Fachinformationszentrum Karlsruhe - M. NOLTE
Gesellschaft für wissenschaftliche technische
Information GmbH
Büro Bonn, Mechen Str. 57,
D-53129 BONN
Tel : (49) 0228-23 20 86 - Fax : (49) 0228-23 20 89
- Universität Hohenheim (495) - W. MÜHLBAUER &
T. CONRAD
Institut für Agrartechnik in den Tropen und Subtropen
D-70593 STUTTGART
Tel : (49) 0711-459 31 12 - Fax : (49) 0711-459 32 98
- Landtechnik Weißenstephan - M. BECK
Vottinger Str. 36,
D-85354 FREISING
Tel : (49) 8161-71 44 85 - Fax : (49) 8161-71 40 48

BELGIQUE :

- Faculté Agronomique de Gembloux - M. DEHON
2 passage des déportés
B-5030 GEMBLoux
Tel : (32) 81 62 21 76

FRANCE :

- Association Savoyarde pour le Développement des
Energies Renouvelables, G. SAVATIER
299, rue du Granier - BP 45
F-73230 SAINT-ALBAN-LEYSSE
Tel : (33) 79 85 88 50 - Fax : (33) 79 33 24 64
- Centre d'Études Drômois sur les Energies Renouvelables
2 place de l'ancienne mairie,
F-26110 NYONS
Tel : (33) 75 26 22 53 - Fax : (33) 75 26 19 02
- Association Énergies et Environnement - E. MASSON
9, avenue du Pont de Tasset
F-74960 ANNECY - MEYTHET
Tel : (33) 50 67 17 54 - Fax : (33) 50 57 79 84
- Chambre d'Agriculture (EDE) de Haute-Savoie
J. BOVAGNE
52, avenue des Îles
F-74010 ANNECY CEDEX
Tel : (33) 50 88 18 01 - Fax : (33) 50 57 46 65
- GERES - A. GUINEBAULT
73 avenue Corot,
F-13013 MARSEILLE
Tel : (33) 91 70 92 93 - Fax : (33) 91 06 19 46
- Association SOLAGRO - J.L. BOCHU
219 avenue de Muret,
F-31300 TOULOUSE
Tel : (33) 61 59 56 16 - Fax : (33) 61 59 98 41

GRÈCE :

- University of Athens, Department of Physics,
Panepistimiopolis,
G- ATHENS
Tel : (30) 01-72 43 211

ITALIE :

- Institute of Physics - Prof. FACCHINI
Via celorua, 16
I-20133 MILANO
Tel : Fax : (39) 223 63 776
- Ente per le Nuove Technologie, l'Energia e l'Ambiente
(ENEA)
Via E. Fermi
I-21020 ISPRA
• Provincia Autonoma di Trento, Servizio Energia -
J. CARLINO
Loc Centochiavi, 114
I-38400 TRENTO
Tel : (39) 461 49 56 86 - Fax : (39) 461 49 57 12

PORTUGAL :

- Estação Nacional de Tecnologia dos Productos
Agriarios (ENTPA) - M. CANDEIAS
Quinta do marques
P-2780 OEIRAS
Tel : (351) 1 442 21 99

ROYAUME-UNI :

- Scottish Center of Agricultural Engineering
Bush Estate, Penicuik,
SC- MIDLOTHIAN
Tel : (44) 031-445 21 47

SUÈDE :

- Sveriges Lantbruksuniversitet,
Inst. för lantbrukets byggnadsteknik
Swedish University of Agricultural Sciences -
G. GUSTAFSSON,
Department of farm buildings (LBT),
P.O. Box 945
S-220 09 LUND
Tel : (46) 11 75 10 - Fax : (46) 11 31 45

Hors U.E. :

NORVÈGE :

- Agricultural University of Norway - G. TENGESDAL
Department of Agricultural Engineering, PO Box 5065
N-1432 AS
Tel : (47) 64 94 87 18 - Fax : (47) 64 94 88 10

SUISSE :

- Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft
und Landtechnik (FAT) - F. NYDEGGER
CH-8356 TÄNIKON B. AADORF
Tel : (41) 052-368 31 31 - Fax : (41) 052-365 11 90
- Institut de Grangeneuve, J.P. ROLLE
Canton de ZURICK
Tel : (41) 37 25 25 00

4. RÉFÉRENCES SÉLECTIONNÉES

ARCHIMED, GEFOSAT, SOLAGRO (1989). Le séchage solaire des plantes aromatiques et médicinales, guide de conception et d'utilisation d'un séchoir. 50 pages.

Association SOLAGRO - CEE-DG XVII et ADEME (1992).- Le séchage solaire des produits agricoles en Europe : état des lieux et perspectives de développement sur la Communauté Européenne. 222 pages.

BINE PROJEKT INFO SERVICE (1994).
Solar trocknungsanlagen für landwirtschaftliche produkte. 4 pages.

COMMISSION DES COMMUNAUTÉS
EUROPÉENNES (1984). Atlas européen du rayonnement solaire - Volume I : Surfaces horizontales. 295 pages.

GUSTAFSSON G. (1986). Practical applications of using solar collectors for drying purposes in agriculture
- Drying Technology - pages 513-533

Institut Technique de la Récolte et la Conservation des Fourrages, BCMEA, EDE Haute-Savoie (1985). Le foin séché par ventilation "Comprendre, calculer, conseiller". 79 pages.

Institut Technique de la récolte et la Conservation des Fourrages, BCMEA, EDE Haute-Savoie (1985). Le foin séché par ventilation "Choisir, construire, conduire". 46 pages.

MÜLLER J ET AL (1989). Development of a greenhouse-type solar dryer for medicinal and herbs
- Solar and wind technology Vol 6, n° 5 pp 523-530.

NYDEGGER F. (1987). La construction de capteurs solaires pour la ventilation du foin. Rapport FAT n° 326. 9 pages.

PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO, Servizio energia (1994). L'esperienza maturata in Trentino relativa all'essiccazione dei foraggi attraverso i collettori solari ad aria e con pompa di calore aria-aria abbinata, primi risultati. 97 pages.

TENGESDAL G. (1991). Solar assisted crop drying : a competitive alternative also in cool humid climates
- University of Norway, in ISES Solar World Congress - Denver, Colorado.

TENGESDAL G. (1993). A design tool for solar air collectors without cover - University of Norway. 12 pages

SCHULZ H. (1990). Das Solarzelt : ein neuer, preiswerter und leistungsfähiger Luftkollector aus Kunststoffgewebe - 22 pages

Produit par :

**RARE : Rhônalpénergie Environnement
10, rue des Archers - 69002 - LYON - FRANCE
Tél : (33) 78 37 29 14 - Fax : (33) 78 37 64 91**

**A la demande de :
Commission Européenne
Direction Générale de l'Energie DG XVII
Stratégie-Dissémination-Promotion (D/1)
200, rue de la Loi
B-1049 BRUXELLES - BELGIQUE**

Document réalisé avec le concours de

