

SOLUSEC GUIDES DES SOLUTIONS DE SÉCHAGE DU BOIS BUCHE

Solutions technologiques pour le
séchage du bois de chauffage

RAPPORT FINAL



EXPERTISES

Déc.
2020

En partenariat avec :



REMERCIEMENTS

Les auteurs de ce guide tiennent à remercier Alice Fautrad de l'ADEME pour son aide et ses réflexions sur la rédaction. Les auteurs remercient les producteurs de bois de chauffage et entreprises ayant mis en place des solutions de séchage : la société Eberl, BBKA, BBSA, Kiko Energie, Pinto bois de chauffage.

CITATION DE CE RAPPORT

Clément L'HOSTIS, Institut technologique FCBA, Myriam CHABAGNO-LAPIE et Pilar FUENTE, ONF, Olivier SILBERBERG, FBR. 2020. SOLUSEC, Guide des solutions de séchage du bois bûche. 38 pages

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1903C0020

Étude réalisée par Myriam Chabagno-Lapie, Pilar Fuente, ONF

Olivier Silberberg, FBR, Clément L'Hostis, FCBA, pour ce projet cofinancé par l'ADEME cofinancé par l'ADEME

Coordination technique - ADEME : Alice Fautrad
Direction Bioéconomie, Energies Renouvelables
Service Forêt, Alimentation et Bioéconomie

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	5
ABSTRACT	6
1. INTRODUCTION.....	7
2. LA TENEUR EN HUMIDITE DES BOIS.....	8
2.1. Humidité sur base sèche :.....	8
2.2. Humidité sur base brute :.....	8
2.3. Impacts sur le pouvoir calorifique.....	9
2.4. Contrôle de la teneur en humidité des bois	10
2.4.1. Méthode par pesée et dessiccation : Étuve.....	10
2.4.2. Méthode de mesure résistive : Humidimètre à pointes.....	11
3. TECHNOLOGIES DE SECHAGE.....	12
3.1. Principaux éléments technico-économiques à prendre en compte	12
3.1.1. Site d'implantation de la solution de séchage.....	13
3.1.2. Volume séché annuellement.....	13
3.1.3. Caractéristiques à prendre en compte concernant le séchoir	13
3.1.4. Diagramme d'aide à la décision pour le choix d'une solution de séchage artificiel	16
3.1.5. Éléments à intégrer au cahier des charges ?.....	17
3.2. Méthodologie de calcul des coûts de revient.....	17
3.2.1. Volume séché.....	17
3.2.2. Investissements	18
3.2.3. Frais financiers.....	18
3.2.4. Frais d'assurance.....	18
3.2.5. Frais d'entretien	18
3.2.6. Charges de personnel	18
3.2.7. Consommation énergétique	19
3.2.8. Subventions	19
3.2.9. Calcul du coût de revient du séchage	19
3.3. Séchage « naturel »	19
3.3.1. Contexte général d'utilisation.....	19
3.3.2. Aspects techniques généraux	20
3.3.3. Etude de cas : Séchage naturel.....	22
3.4. Séchoirs Air Chaud Climatisé.....	23
3.4.1. Contexte général d'utilisation.....	23
3.4.2. Aspects techniques.....	23
3.4.3. Etude de cas : Séchoir Air Chaud Climatisé.....	25
3.5. Caissons de séchage.....	27
3.5.1. Contexte général d'utilisation.....	27
3.5.2. Aspects techniques.....	27
3.5.3. Etude de cas : CAISSONS DE SECHAGE.....	28
3.6. Synergie avec d'autres activités – valorisation de chaleur fatale.....	29
3.6.1. Aspects techniques.....	30
3.6.2. Etude de cas : Chaleur fatale de méthanisation.....	31
3.7. Séchoirs solaires	32

3.7.1.	Aspects techniques.....	32
3.7.2.	Etude de cas : Séchoir solaire.....	33
3.8.	Récapitulatif des technologies existantes, critères de choix	34
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....		35
SIGLES ET ACRONYMES		36

RÉSUMÉ

Les politiques publiques menées en faveur du développement des énergies renouvelables (crédit d'impôt, programmes de R&D, etc.) ont entraîné une forte évolution du parc d'appareils de chauffage indépendant au bois (normalisation des appareils, meilleurs rendements énergétiques, baisse des émissions de particules).

Ces nouveaux appareils très performants nécessitent pour bien fonctionner, l'utilisation d'un produit bois de chauffage de haute qualité (produit sec à 20% d'humidité). Or, les progrès constatés sur la partie équipement de chauffage ne se retrouvent pas au niveau de la filière combustible bois. La consommation de bois de chauffage en France est estimée à près de 27.2 Mm³ dont seulement 4.8 Mm³ passent par le circuit professionnel (2 900 entreprises de toute taille, des TPE, PME et ETI) et seulement 0.2 Mm³ de bois est sec garanti à moins de 20% d'humidité.

Le présent guide a pour objectif de permettre aux producteurs de mieux prendre en compte l'importance de la teneur en humidité caractérisant un bois de chauffage de qualité, en étant capable de mieux la caractériser, et pouvoir s'orienter vers de solutions de séchage à même de garantir l'obtention de bois secs à moins de 20% d'humidité sur brut.

Plusieurs solutions technologiques sont ici considérées, et leur pertinence jugée en fonction de la typologie des entreprises de production de bois de chauffage.

ABSTRACT

Public policies in favour of the development of renewable energies (tax credit, R&D programs, etc.) have led to a sharp change in the stock of independent wood-fired heating appliances (standardization of appliances, better yields, lower emissions particles).

These new high-performance devices require the use of a high-quality firewood product (dry product less than 20% humidity) to function properly. However, the progress observed on the equipment part is not found in the fuel sector. The consumption of firewood in France is estimated at nearly 27.2 Mm³ of which only 4.8 M goes through the professional circuit (2,900 companies of all sizes (VSEs, SMEs and mid-caps)) and only 250,000 cubic meters of wood is dry guaranteed at 20% humidity.

The objective of this guide is to allow producers to better take into account the importance of the moisture content characterizing a quality firewood, by being able to better characterize it, and to be able to move towards drying solutions to allow guaranteeing the obtaining of dry wood, with less than 20% humidity on wet basis.

Several technological solutions are considered here, and their relevance judged according to the typology of the firewood production companies.

1. Introduction

Sécher du bois bûche, qui par définition va être brûlé, peut apparaître comme une démarche sans intérêt. A quoi bon perdre du temps, et consommer de l'énergie pour produire un combustible ?

En regardant de plus près les propriétés et les attentes concernant le bois bûche, le séchage apparaît pourtant comme une étape importante de la production de bois bûche, qui va améliorer la qualité du combustible et permettre la réduction des durées de stockage.

Comme nous le verrons, plus le bois est sec, meilleure sera sa combustion, permettant l'obtention d'un produit de meilleure qualité, plus homogène, moins polluant, notamment lors de son utilisation dans des appareils anciens, et plébiscité par les clients.

De plus, le séchage artificiel, permet de limiter les durées de séchage et les surfaces de stockage, et donc d'améliorer la trésorerie des entreprises de production de bois bûche.

Il faut toutefois étudier les possibilités techniques de séchage, qui sont variées, et dont la viabilité économique dépend de la structure propre de chaque unité de production de bois bûche. L'objet de ce guide est donc d'orienter les entreprises vers des solutions de séchage adaptées permettant ainsi une amélioration des pratiques de la filière bois de chauffage.

Cette démarche s'inscrit dans la politique nationale de réduction des émissions polluantes et de CO₂ portée par l'ADEME, qui tend à mettre en avant l'utilisation d'un combustible plus performant. Par ailleurs, l'ADEME encourage également le fait que les prélèvements de bois bûches soient réalisés au sein de forêts gérées durablement et certifiées PEFC ou FSC. De plus l'amélioration de la qualité du bois bûche est mis en avant par les labels certification NF Bois Bûche et la charte ONF énergie bois.

Le stockage de bûches relève de la réglementation ICPE 1530, qui impose une déclaration pour des volumes stockés compris entre 1 000 m³ et 20 000 m³, et pour des volumes supérieurs nécessite une autorisation et enquête publique. Le séchage artificiel, et donc plus rapide du bois bûche permet de diminuer le volume des stocks sur site industriel, et peut permettre de rendre plus simple la gestion administrative de ces stocks.

Dans le cas de la mise en place d'une chaudière biomasse, pour des installations de puissance supérieure à ou égale à 1 MW (et inférieure à 50 MW), une déclaration ou un enregistrement dans le cadre de la réglementation ICPE 2910-A ou 2910-B est nécessaire. La mise en place de chaudières biomasses, ou de solutions solaires thermiques peuvent être éligibles, selon critères spécifiques, à une aide de l'ADEME, via le Fonds Chaleur.

2. La teneur en humidité des bois

Le séchage consiste à faire baisser la teneur en humidité du matériau. Afin de pouvoir se fier à une grandeur précise, il est important de définir correctement cette teneur en humidité. Cette définition est d'autant plus importante que plusieurs teneurs en humidité du bois peuvent être considérées. Les deux expressions de cette grandeur sont l'humidité sur **base sèche** et l'humidité sur **base brute**, dont les principes de calcul sont proches, mais les valeurs peuvent être très différentes.

2.1. Humidité sur base sèche :

Il s'agit de la masse d'eau contenue dans le matériau par rapport à la masse de bois anhydre, c'est-à-dire ne contenant plus du tout d'eau.

$$H_{sec}\% = \frac{m_{eau}}{m_{bois\ anhydre}} \times 100$$

2.2. Humidité sur base brute :

Il s'agit de la masse d'eau contenue dans le matériau par rapport à la masse du bois à l'humidité à laquelle est faite la mesure, c'est-à-dire, à la masse de bois anhydre plus la masse d'eau contenue dans le bois l'humidité considérée.

$$H_{brut}\% = \frac{m_{eau}}{m_{bois\ humide}} \times 100$$

Dans les deux cas, la masse d'eau peut être obtenue par la simple soustraction suivante :

$$m_{eau} = \text{masse bois humide} - \text{masse bois anhydre}$$

Il est également possible de convertir une teneur en humidité sur base sèche en base brute. Cette opération est particulièrement utile dans le cas, par exemple, de la conversion d'une valeur donnée par humidimètre à pointes : cet appareil donne généralement une valeur sur base sèche, et il convient de la convertir sur base brute pour les mesures sur le bois bûche.

Les équations de conversion sont données ci-après :

$$H_{brut}\% = \frac{H_{sec}\%}{100 + H_{sec}\%} \times 100$$

et

$$H_{sec}\% = \frac{H_{brut}\%}{100 - H_{brut}\%} \times 100$$

Le tableau suivant donne la correspondance entre humidité sur sec et humidité sur brut :

Humidité sur base sèche [%]	Humidité sur base brute [%]
1	1
3	3
5	5
7	7
9	8
11	10
13	12
15	13
17	15
19	16
21	17
23	19
25	20
27	21
29	22
31	24
33	25
35	26
37	27
39	28
41	29
43	30
45	31
47	32
49	33
51	34
53	35
55	35
57	36
59	37
61	38

Tableau 1 : Correspondance des valeurs courantes de teneur en humidité sur base sèche et sur base brute. En vert, les valeurs permettant de considérer les bûches comme sèches.

2.3.Impacts sur le pouvoir calorifique

La destination du bois bûche étant la production d'énergie pour le chauffage, il est important de prendre en compte l'effet de la teneur en humidité sur la combustion. Deux éléments sont ici à considérer, le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du bois, et les émissions liées à la combustion.

En premier lieu, le PCI dépend fortement de la teneur en humidité du bois (Figure 1). Un bois plus sec fournira plus d'énergie pour une masse ou un volume donné. Ainsi, un volume donné de bûche correspondra à une quantité d'énergie supérieure pour un bois sec que pour un bois plus humide. Cela justifie un prix de vente plus élevé du bois sec par rapport au bois humide.

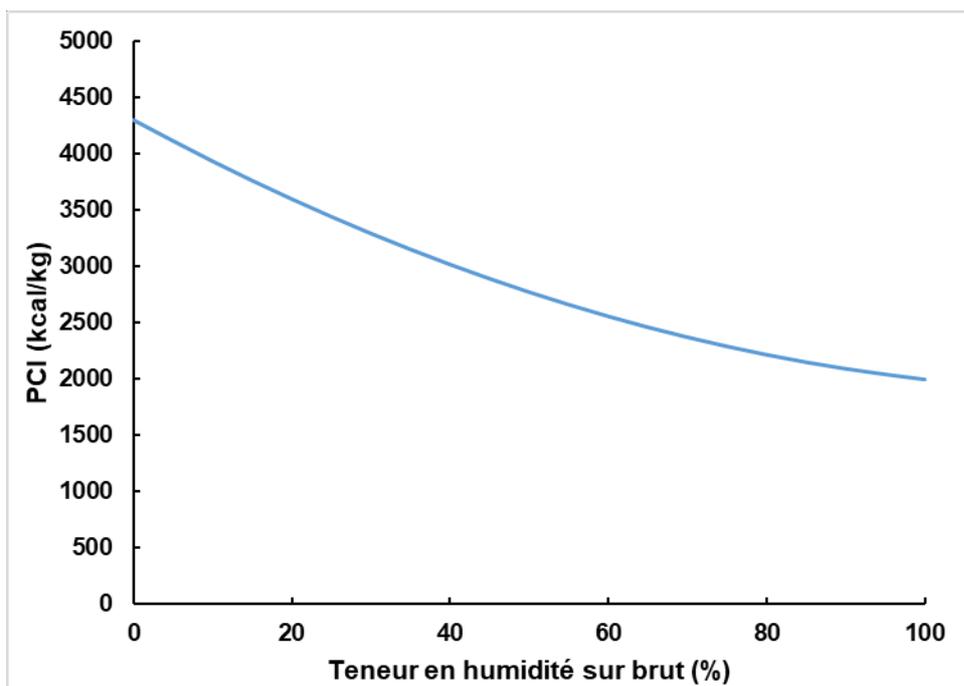


Figure 1 : Evolution du PCI du bois en fonction de la teneur en humidité

De plus, le bois sec a d'autres avantages pour la combustion : les émissions de particules sont d'autant plus faibles que le bois brûlé est sec, notamment avec l'utilisation d'appareils anciens avec un taux de rejet beaucoup plus important que les appareils récemment renouvelés ou installés. Sécher le bois limite donc l'émission de particules dont l'impact sur la santé est particulièrement décrié en milieu urbain ou dans des situations géographiques spécifiques telles des vallées encaissées. Une meilleure combustion permet également de limiter l'encrassement des appareils. Les appareils de chauffage les plus récents sont, en outre, conçus pour fonctionner avec du bois sec, et ne peuvent atteindre le rendement optimal que dans ce cas.

2.4. Contrôle de la teneur en humidité des bois

La teneur en humidité des bois est un paramètre majeur pour caractériser la qualité du bois bûche, il est alors indispensable de pouvoir déterminer du mieux possible cette teneur en humidité en appliquant les bonnes méthodes et en utilisant un matériel adapté.

2.4.1. Méthode par pesée et dessiccation : Étuve

Cette méthode se révèle précise pour déterminer la teneur en humidité moyenne d'une pièce de bois. Elle consiste à prélever un échantillon dont on souhaite connaître l'humidité et à le peser. Pour cela, on prendra soin d'avoir une balance correctement étalonnée, et d'une précision suffisante par rapport à la masse totale de l'échantillon. La masse humide de l'échantillon est alors connue.

On place ensuite l'échantillon dans une étuve ventilée à 103°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) jusqu'à stabilisation de sa masse. La stabilisation de la masse signifie que l'échantillon ne perd plus d'eau, et ainsi que l'état anhydre est atteint. Cette étape dure classiquement plusieurs jours. On mesure alors sa masse anhydre. On prendra toujours soin de protéger la balance lorsque la bûche chaude est posée dessus. Un support isolant devra être placé sur le plateau avant le tarage et la pesée de la bûche afin d'éviter que la chaleur n'impacte la mesure.

En application des formules présentées dans le paragraphe « la teneur en humidité des bois », il suffit alors de remplacer les m_{anhydre} et $m_{\text{(bois humide)}}$ par les valeurs mesurées.

Si la méthode est précise à condition de disposer du matériel adapté, elle reste néanmoins longue, et ne permet donc pas l'obtention d'une valeur instantanée de la teneur en humidité du bois bûche. Elle se révèle en revanche utile pour caractériser l'évolution de l'humidité d'un stock de bûches dans la durée.

2.4.2. Méthode de mesure résistive : Humidimètre à pointes

Cette méthode, permettant une mesure rapide la teneur en humidité du bois (sur base brute si le bois n'a pas été séché complètement) doit être menée avec précaution. En effet, une méconnaissance du matériel et des paramètres influençant la mesure peut conduire à des erreurs de mesure importantes et ainsi indiquer des valeurs pouvant être très éloignées de la réalité.

Il faut tout d'abord avoir conscience du principe de la mesure : deux électrodes métalliques, les « pointes » sont enfoncées dans le matériau. Un courant électrique traverse le bois entre les deux pointes et sa résistance est mesurée. Cette résistance est d'autant plus faible que le bois est humide. On peut alors remonter à la teneur en humidité du matériau. Plusieurs types de pointes existent, mais il faudra préférer des pointes isolées, qui permettent de conduire le courant seulement à leur extrémité. On s'assure alors que la mesure est bien effectuée entre les deux pointes à la profondeur d'enfoncement.

De plus, pour obtenir une valeur moyenne de teneur en humidité, il faudra enfoncer les pointes au tiers, environ de l'épaisseur de la bûche (Figure 2). On prendra également soin de garder un intervalle entre la pièce de bois et la tête de la pointe, surtout en cas de bois humide en surface, comme cela peut être le cas après une aspersion par la pluie : dans le cas contraire, le risque est de mesurer une humidité correspondant au film d'eau en surface, qui serait alors très élevée.

Dans les faits, d'autres paramètres influencent également la mesure, comme l'essence de bois et la température. Il faudra alors prendre soin de sélectionner le bon type de bois et régler la température de mesure sur l'appareil. Les constructeurs d'appareils fournissent généralement un répertoire permettant d'associer l'essence du bois au paramétrage correspondant de l'appareil.

Dans le cas où la température n'est pas un paramètre réglable pour l'appareil utilisé, il faudra garder à l'esprit que la mesure comporte certainement une erreur, et si possible estimer cette erreur liée à la température. Il faudra considérer que la température de la mesure est celle du bois, et non celle de l'air environnant. De fortes différences peuvent exister, en cas de variations climatiques importantes, ou encore en sortie de séchoir lorsque les bois sont encore chauds.

Exemples de fabricants : Gann, Brookhuis, ...

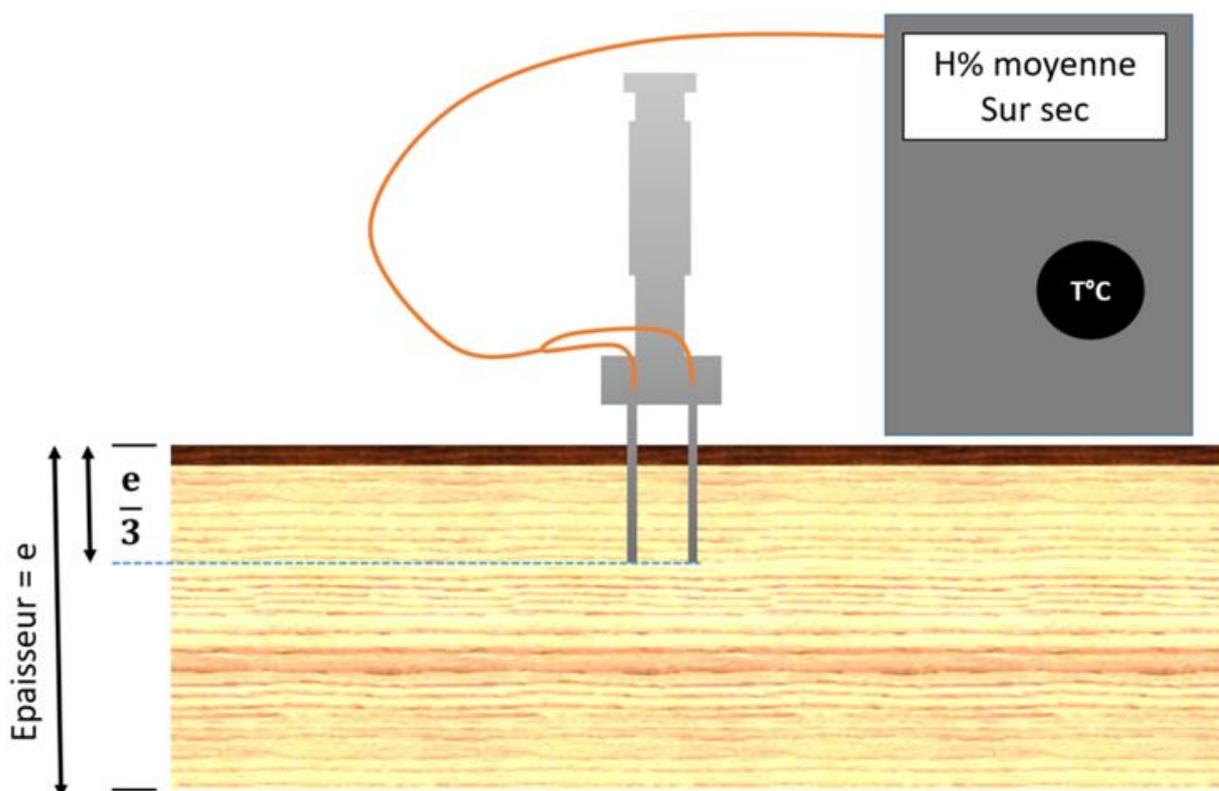


Figure 2: mesure de la teneur en humidité des bois

3. Technologies de séchage

Le séchage « naturel », c'est-à-dire à l'air libre, est la méthode employée très majoritairement pour le séchage du bois bûche. Il existe cependant des méthodes et des technologies beaucoup plus rapides pour sécher le bois. Ces méthodes sont diverses, et s'adaptent à tous les types d'entreprises de production de bois bûche.

L'ensemble des méthodes présentées par la suite suivent toutes des principes généraux qu'il convient de prendre en compte pour assurer l'efficacité du séchage

Les bois ronds non-écorcés séchent très mal, l'écorce ralentissant les transferts d'eau et le séchage étant d'autant plus rapide que les pièces à sécher sont de dimensions limitées. **En conséquence, plus les bois sont fendus rapidement, plus ils séchent vite.** On ne peut pas considérer comme temps de séchage, le délai entre l'abattage de l'arbre et la commercialisation de la bûche. Le temps de stockage de bois ronds et encore plus s'ils sont restés en forêt n'est pas un indicateur pertinent.

Les bûches ne peuvent sécher correctement que s'ils sont soumis à une bonne ventilation. Leur conditionnement doit permettre à l'air de circuler du mieux possible.

Les bûches séchent d'autant plus vite que la température est élevée. On comprend ainsi que la cinétique de séchage sera bien plus élevée par des temps chauds qu'en hiver dans le cas d'un séchage à l'air libre, et à une température de fonctionnement élevée pour les systèmes de séchage artificiel.

Enfin, l'humidification par de l'eau liquide (pluie, aspersion) est le point principal à limiter. Il convient donc de prendre les mesures sur les équipements de séchage et dans les zones de stockage pour l'éviter.

En prenant en compte l'ensemble de ces principes et en les mettant en phase avec les possibilités propres à chaque unité de production, il est possible de déterminer la meilleure solution de séchage dans chacun des cas.

3.1. Principaux éléments technico-économiques à prendre en compte

Les éléments présentés dans cette partie sont ceux à considérer à la fois pour choisir la technologie de séchage préférentielle à employer, et à intégrer au cahier des charges qui permettra de définir précisément les équipements et méthodes de séchage à mettre en place.

La prise en compte des éléments détaillés dans cette partie est essentielle pour la mise en œuvre d'une solution technologique de séchage qui soit pertinente, mais ne peut garantir à elle seule le succès de l'opération. En effet, le séchage artificiel du bois bûche connaît aujourd'hui un développement limité et les retours d'expériences des technologies présentée ici restent limitées.

Dans tous les cas la mise en place d'une solution de séchage doit être considéré comme une opération technique complexe et devra être conduite avec l'aide d'experts pour limiter les risques d'échecs. Ainsi, il est fortement recommandé à l'entreprise souhaitant conduire un tel investissement de se faire conseiller par un bureau d'étude, ou organisme assimilé, pour la définition précise du besoin en séchage, la rédaction du cahier des charges et le choix selon les offres des différents fabricants. Les Centre Techniques Industriels (FCBA), interprofessions (CIBE), France Bois Buche ou encore ONF énergie peuvent assister les industriels pour mettre en place cette démarche.

Des exemples de fabricants d'équipements pour chaque typologie de séchage artificiel sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Typologie de séchoir	Fabricant
Air Chaud Climatise	Cathild, Nardi, Secal, etc.
Caisson de séchage	Eberl
Solaire	Base Innovation
Chaleur Fatale	Prototype au cas par cas

3.1.1. Site d'implantation de la solution de séchage

Le premier point à prendre en compte est le site d'implantation de la solution de séchage, tant pour le choix de la solution retenue que pour la mise en place technique de cette solution.

Il doit être considéré selon sa proximité avec des sites permettant de valoriser une chaleur fatale (méthanisation, cogénération, etc...). Si tel est le cas, la piste de valorisation de la chaleur fatale doit être considérée prioritairement, car le coût de l'énergie, qui, nous le verrons, représente une part généralement importante du séchage artificiel sera ici très faible.

Le positionnement du site par rapport à l'ensoleillement doit également permettre d'inclure la possibilité de séchage par énergie solaire, ou de l'exclure si l'irradiance solaire annuelle est inférieure à 1300kWh/m³.

Si aucune des solutions présentées précédemment ne peut être mise en place, il convient alors de se positionner vers un séchage soit en séchoir Air Chaud Climatisé, soit vers des caissons de séchage.

L'emprise au sol du séchoir est également un point à ne pas négliger. Ainsi les dimensions du séchoir devront pouvoir être contenu sur le site, mais il faudra y ajouter une zone de manutention permettant le chargement du séchoir et la manœuvre des engins. Une zone suffisamment grande permettra un chargement rapide et limitera les temps d'arrêt de l'équipement.

De plus, dans le cas des séchoirs Air Chaud climatisés, l'ouverture des portes, selon la solution retenue, nécessitera potentiellement un espace libre conséquent pouvant correspondre à la longueur de la porte. Pour les caissons de séchage, en cas de chargement sur des wagonnets, un rail de chargement de même longueur que le séchoir devra pouvoir être mis en place, et il faut ainsi doubler l'emprise au sol par rapport au caisson en lui-même.

Si le site, en l'état actuel, ne permet pas d'accueillir la solution de séchage envisagées, il faudra prendre en compte la diminution de la surface nécessaire au stockage et évaluer en conséquence la possibilité d'installation du séchoir. Si cela n'est pas suffisant, un autre site devra être mobilisé pour l'installation du séchoir.

3.1.2. Volume séché annuellement

Le volume séché annuellement permet de déterminer la solution de séchage à retenir. On cherchera à limiter l'investissement en ajustant la capacité des équipements à ce volume. Un séchoir surdimensionné présentera un amortissement bien supérieur par stère séché qu'un séchoir dimensionné au plus juste. Les séchoirs devront être en fonctionnement en permanence pour permettre un amortissement optimal de l'équipement, hors périodes de chargement/déchargement du séchoir (de l'ordre d'une minute par stère) et d'entretien (de l'ordre de 1% du temps de fonctionnement du séchoir).

Ce volume doit être déterminé par rapport au marché attendu en bois secs et dépendra donc de chaque entreprise.

3.1.3. Caractéristiques à prendre en compte concernant le séchoir

3.1.3.1. Capacité du/des séchoir(s)

La capacité du séchoir ne correspond pas au volume total de l'enceinte, mais bien au volume de bûches que peut contenir le séchoir. Le volume de bûche dépend du volume total de l'enceinte, mais également du mode de conditionnement des bûches lors du séchage. Pour calculer la capacité utile nécessaire, nous devons intégrer le volume devant être séché annuellement ainsi que le temps de séchage et le temps d'arrêt du séchoir. Pour calculer cette capacité nous pouvons utiliser l'équation suivante :

$$\text{Capacité utile} = \frac{\text{Volume séché annuellement}}{\text{nombre de cycles par an}}$$

Ici le volume séché annuellement est un objectif, tel qu'énoncé précédemment.

Le nombre de cycles par an dépend de la durée d'un cycle et de la durée de fonctionnement du séchoir sur l'année. Il est donc fonction de la solution technique retenue et devra être déterminé en fonction des spécificités de l'équipement énoncées par le fabricant. Le nombre de cycle est calculé de la façon suivante :

$$\text{nombre de cycles par an} = \frac{\text{durée de fonctionnement du séchoir}}{\text{durée d'un cycle}}$$

3.1.3.2. Mode de chargement :

Ce point essentiel en ce qui concerne les opérations de manutention, mais impacte également la performance du séchage.

Le mode de chargement dépend des capacités de l'entreprise en moyens de manutention, de stockage et de livraison.

3.1.3.3. Parois du séchoir

La fabrication des parois du séchoir est essentielle dans le cas du séchage artificiel, et ce pour deux raisons. D'abord, l'isolation thermique en dépend, et permet de donc de valoriser l'énergie pour le séchage du bois en limitant les déperditions.

Pour les séchoirs Air Chaud Climatisé et les caissons de séchage, il conviendra de vérifier la température maximale de fonctionnement pour éviter de détériorer ces parois. En effet, certains matériaux employés pour la fabrication de l'enveloppe des séchoirs ne sont pas conçus pour résister à des températures élevées. Dans le cas où l'on souhaite travailler à une température de séchage supérieure à 70°C en particulier, ce qui permet d'obtenir des temps de séchage courts, il faudra s'assurer que les équipements sont aptes à les supporter. Dans le cas de l'acquisition d'un séchoir d'occasion, associé à une chaudière puissante, permettant des montées en température importantes, on prendra particulièrement garde à ces éléments.

3.1.3.4. Ventilation

La ventilation est un élément important du séchage du bois qu'il soit naturel ou artificiel. Dans le cas d'un séchoir artificiel, la ventilation est forcée grâce à la mise en œuvre de ventilateurs actionnés par des moteurs électriques. Il faudra s'assurer, dans le cahier des charges de l'équipement de permettre une vitesse d'air suffisante, qui ne doit pas être inférieure à 1m/s en sortie de pile.

Au fur et à mesure de l'avancée dans le séchage, la quantité d'eau à extraire diminue par unité de temps, et la mise en place de variateurs de fréquence permettant de diminuer la vitesse de rotation des moteurs, et donc la consommation énergétique est bénéfique. La mise en place de variateurs limite également les pics de consommation électrique au démarrage, et ils doivent préférentiellement être installés lors du montage du séchoir.

Certains fabricants proposent une modulation de la vitesse d'air par l'arrêt d'une partie des ventilateurs lorsque ceux-ci ne sont pas équipés de variateurs. L'intérêt annoncé de ce dispositif est de permettre d'ajuster la vitesse d'air sans mettre en place de variateurs et donc en limitant l'investissement. Cette solution ne doit pas être envisagée, car elle implique une perturbation des flux d'air, laissant des zones du séchoir non-ventilées. En conséquence, certaines zones ne sèchent pas, ce qui induit une grande inhomogénéité du séchage. Les résultats attendus ne pourront donc pas être atteints. On préférera un fonctionnement de la ventilation à 100% de sa capacité à l'arrêt total d'une partie des ventilateurs.

Le sens de ventilation doit être adapté au mode de chargement et au conditionnement des bois pour s'assurer que l'air traverse l'ensemble des chargements de la manière la plus homogène possible.

Idéalement, une inversion du sens de ventilation doit être possible pour permettre d'obtenir un séchage homogène. En effet, l'air se charge en humidité au fur et à mesure qu'il traverse le chargement de bois, et en conséquence, son humidité augmente et son pouvoir séchant diminue. En inversant le sens de circulation de l'air, les mêmes bois ne sont pas systématiquement en contact de l'air le plus humide, ce qui permet l'homogénéisation du volume global. Cette inversion est facile à obtenir pour des séchoirs Air Chaud Climatisé, généralement conçus pour l'intégrer, mais dans d'autres cas cela nécessitera une adaptation. Dans le cas de systèmes sur mesure, il faudra soit concevoir le système pour intégrer cette inversion, soit se baser sur l'humidité des bois les plus humides, ce qui risque de sur-sécher les bois en entrée de chargement.

3.1.3.5. Régulation/contrôle

La régulation du séchage du bois d'œuvre intègre un nombre important de paramètres et permet de garantir la qualité du bois sur des aspects très différents du bois énergie. Pour le séchage de bûches, la qualité dépend de la teneur en humidité, et les stratégies de séchage sont donc très différentes. La régulation n'a donc pas nécessité d'être aussi complexe.

Elle devra permettre de garantir la température de fonctionnement du séchoir qui restera constante au maximum de la capacité, ce qui permet de garantir des durées de cycle aussi basses que possible.

De même, la régulation doit commander l'extraction pour garantir un air suffisamment sec pour absorber l'eau contenue dans le bois.

La régulation doit permettre de moduler la ventilation en fonction de la quantité d'eau à extraire, et donc de l'humidité des bois, et éventuellement en fonction des tarifs de l'électricité. On pourra commander un fonctionnement à pleine puissance en heures creuses et un fonctionnement ralenti en heures pleines pour effectuer des économies sur la facture énergétique.

De plus, la régulation doit intégrer des sondes de mesure de la teneur en humidité des bois pour déterminer la fin du séchage. Le nombre de sondes doit être suffisant pour pouvoir donner une image représentative de l'ensemble du chargement, et ne pourra pas être inférieur à quatre sondes. Ces sondes doivent être réparties au mieux dans le chargement.

3.1.3.6. Extraction/récupération de chaleur

Le séchage devant être conduit avec un air sec pour être efficace, l'extraction doit être dimensionnée en conséquence, et dépendra du volume de bois à sécher, de la température de fonctionnement du séchoir et de la puissance de la ventilation.

Dans tous les cas, une quantité importante d'eau est à extraire, cet organe du séchoir aura donc une quantité importante d'air à renouveler. Pour limiter les déperditions thermiques, qui sont majoritaire par ce biais, la mise en place d'échangeurs thermiques est recommandée. Les échangeurs thermiques peuvent diminuer d'environ 20% les déperditions thermiques à ce niveau, et son donc très bénéfiques d'un point de vue énergétique.

3.1.3.7. Conditionnement des bois lors du séchage

Les contenants utilisés pour le conditionnement des bûches doivent permettre la circulation de l'air au maximum lors du séchage. Des caisses grillagées sont donc de bonnes solutions de conditionnement.

De plus, ces contenants doivent pouvoir être manipulés grâce aux engins dont dispose l'entreprise. Par exemple, le support inférieur des caisses doit permettre le chargement par un chariot élévateur si l'entreprise en dispose (respect de l'entraxe entre les fourches, masse maximale, etc...), et pouvoir se superposer si les dimensions du contenant ne sont très inférieures à la hauteur du séchoir.

Une solution retenue peut être d'utiliser directement des bennes adaptées au chargement par camion, ce qui peut permettre une livraison directe en sortie de séchoir, et limiter le nombre d'opérations de conditionnement qui engendreront une augmentation des coûts d'exploitation. Il faudra alors que les bennes soient grillagées sur les faces pour permettre la circulation de l'air et le séchage. Des solutions sur mesure doivent être réalisées.

3.1.3.8. Alimentation énergétique thermique

Le choix de l'alimentation énergétique thermique est essentiel pour le séchage, car ce poste constitue l'un des principaux coûts du séchage, et a un impact environnemental majeur.

Il est donc préférable, en premier lieu, de chercher une thermie peu onéreuse et vertueuse d'un point de vue environnemental. C'est pourquoi on privilégiera, autant que faire se peut, la valorisation de chaleur fatale. Les sources de chaleurs fatale sont nombreuses et l'on peut citer par exemple la chaleur fatale issue des centrales à cogénération. Le double avantage de ces unités est que le prix de rachat de l'électricité produite en cogénération dépend du rendement énergétique global de l'installation, et ainsi que la valorisation de la thermie, point le plus complexe, est très bénéfique pour ces unités. Ainsi, une entreprise séchant du bois de chauffage pourra négocier des prix de l'énergie thermique extrêmement bas, car l'installation permettra l'augmentation du prix de vente de l'électricité pour le fournisseur. Une étude et une négociation au cas par cas doivent être conduits.

Concernant l'énergie solaire, la pertinence de cette solution dépend de la localisation géographique. L'implantation de l'unité de séchage conditionne en effet la quantité d'énergie solaire qui pourra être produite, et donc la capacité du système. Schématiquement une moitié sud de la France présente des ensoleillements importants, et seront privilégiés pour ces installations. On chercha des zones où l'irradiance solaire moyenne est supérieure à 1300 kWh/m², et des durées d'ensoleillement important. Il faut également considérer le fait que l'énergie solaire est une énergie intermittente et que le séchage pourra donc être mis en suspens pendant les périodes peu ensoleillées, en hiver par exemple, et revêt un certain caractère aléatoire de ce point de vue.

Enfin, pour les séchoirs Air Chaud Climatisés, et les caissons de séchage, plusieurs options sont possibles. Les chaudières biomasse sont intéressantes, surtout pour les grandes unités, car elles permettent de valoriser les connexes sous forme d'énergie. Pour les connexes dont la valorisation est complexe, le séchage représente donc un débouché intéressant, car elles seront finalement intégrées au prix de vente supérieur du bois « sec séchoir ». Il faudra toutefois s'assurer de la quantité de connexes disponibles sur site pour satisfaire la consommation énergétique de la chaudière. Des subventions peuvent être apportées à l'acquisition de ces chaudières.

S'il est impossible de mettre en œuvre une chaudière biomasse, des solutions gaz sont également disponibles, mais doivent être considérées seulement dans le cas où la mise en place de chaudière biomasse est impossible. Le coût de l'énergie sera en effet plus important, car le gaz entre comme un coût supplémentaire dans le procédé. De plus, d'un point de vue environnemental, l'utilisation de ressources fossiles est discutable, notamment au regard du caractère renouvelable du bois-bûche. Elle génèrera plus d'émissions de CO₂. Cette solution est à proscrire du point de vue de l'ADEME

Si l'implantation d'une chaudière biomasse ou gaz est impossible, les caissons de séchage peuvent intégrer des résistances électriques pour générer l'apport thermique nécessaire au séchage. Cette solution ne doit être mise en œuvre que pour répondre à un besoin très ponctuel en bois sec, car le coût de l'énergie électrique est supérieur aux autres énergies thermiques énoncées ici. Une solution électrique par pompe-à-chaleur, elle-même alimentée par une source électrique est également envisageable, ce qui permettra de réduire la consommation énergétique mais allongera les temps de cycle.

3.1.4. Diagramme d'aide à la décision pour le choix d'une solution de séchage artificiel

Le diagramme suivant (Figure 3), permet d'orienter la décision d'acquisition d'une solution de séchage artificiel, et a été construit en intégrant les éléments décrits précédemment (ACC = Séchoirs Air Chaud Climatisé) :

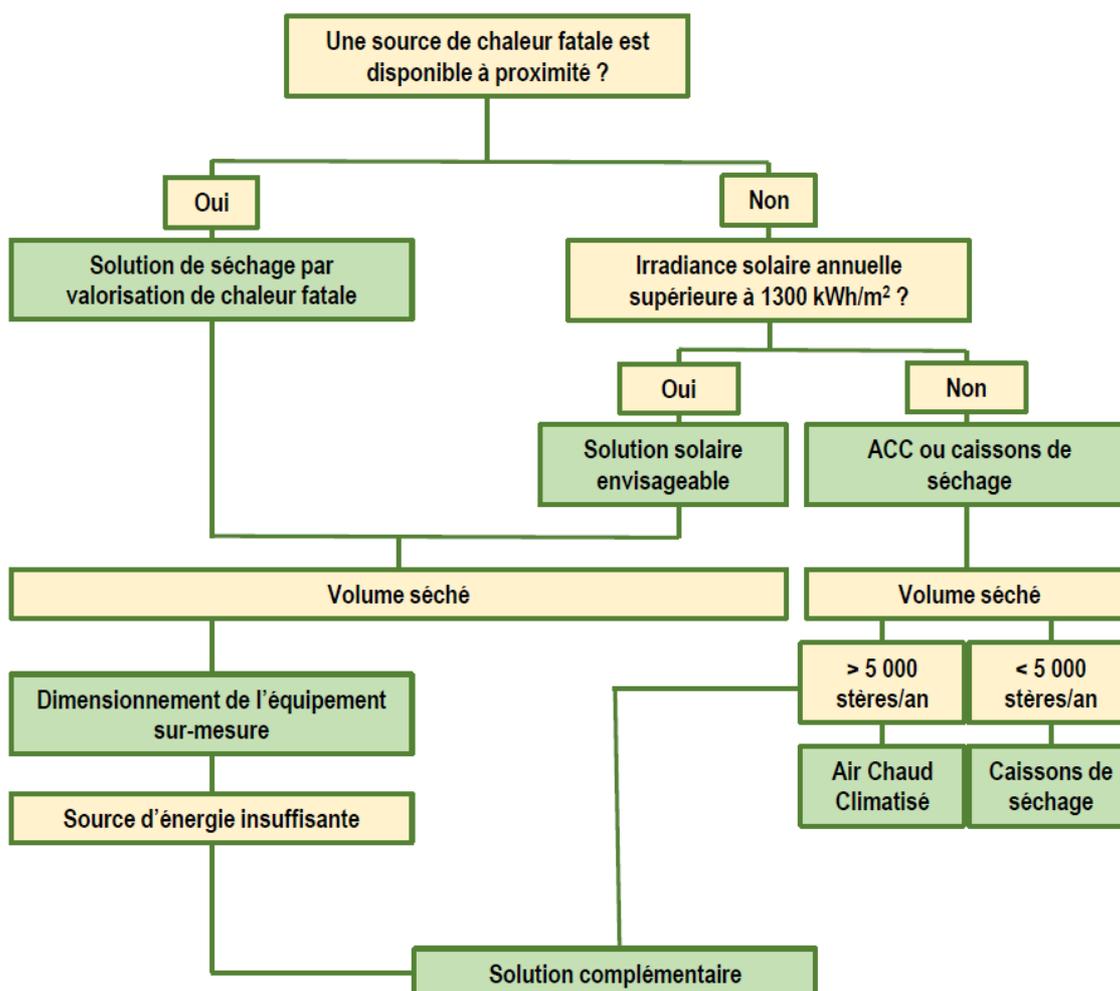


Figure 3 : diagramme d'orientation vers la solution de séchage artificiel la plus pertinente

3.1.5. Eléments à intégrer au cahier des charges ?

Une fois la typologie de séchoir à implanter déterminée, il est nécessaire de rédiger un cahier des charges permettant de consulter les différents fabricants de façon rationnelle et optimale.

Il s'agit d'intégrer les éléments du point 3.1.3. Par exemple, pour un séchoir ACC, nous spécifierons les éléments suivants :

- Fonction : Sécher des buches de l'état vert à une humidité sur brut de 20%
- Dimensions : Dimensions générales du séchoir pour l'intégrer sur le site, maximum de longueur, largeur, hauteur. On précisera ici le volume utile du séchoir.
- Batterie de chauffe : Raccordement à un certain type de chaudière, puissance de chauffe nécessaire (en fonction du volume utile). Exemple : Batteries de chauffe alimentées en eau chaude, permettant une montée en température de 80°C dans l'enceinte.
- Ventilation : ventilateurs assurant une vitesse d'air de X m/s (exemple 2 m/s) dans des conditions de chargement normal. Accès aux moteurs pour entretien, possibilité d'inversion du sens de rotation et mise en place de variateurs de fréquence permettant un fonctionnement de 50% à 100% de la vitesse de rotation maximale, etc.
- Bennes de conditionnement : Possibilité d'être transportées par camion ou engin de manutention. Ouvertures (grillages...) permettant une circulation de l'air au sein des piles, dimensions, etc.
- Isolation thermique du séchoir : Coefficient maximum de transfert thermique, température de fonctionnement, etc.
- Régulation : Régulation de la température et contrôle du séchage par sondes exprimant une teneur en humidité sur brut, etc.
- Assistance/entretien : contrat d'assistance, ou d'entretien. Possibilité d'intervention à distance.
- Prix : Maximum et minimum.

Des ajouts peuvent être réalisés dans le cahier des charges en fonction des spécificités propres à chaque entreprise.

Chaque critère sera évalué en fonction de la qualité de la réponse apportée et du prix selon une pondération dépendant des possibilités de l'entreprise.

3.2. Méthodologie de calcul des coûts de revient

Pour déterminer le coût de revient du séchage, nous devons disposer de tous les éléments entrant dans le procédé de séchage, pour les intégrer au calcul du coût. Ces calculs permettent de déterminer quelle solution peut ou doit être développée préférentiellement, mais restent théoriques et ne doivent être considérés que comme des ordres de grandeur. En fonction du fonctionnement de chaque entreprise, des équipements retenus, des aléas, et des éléments non quantifiables, des variations dans les coûts de revient peuvent exister.

Il convient néanmoins de mettre en œuvre des simulations comme outil d'aide à la décision, et permettront d'affiner le projet, et de comparer les offres des fournisseurs.

L'ensemble des éléments dont nous devons disposer sont les suivants :

- Volume séché annuellement
- Montant des investissements et durée d'amortissement
- Mode de financement de l'investissement, pour les emprunts, la durée et le taux du prêt sont à considérer
- Frais d'assurance
- Frais d'entretien
- Coût de personnel : temps passé sur les opérations de séchage
- Consommation énergétique

Par la suite, nous verrons les éléments à prendre en compte indépendamment.

3.2.1. Volume séché

Le volume séché est déterminé en fonction des capacités en séchage si l'équipement est déjà installé, ou s'il s'agit d'un calcul de coût en amont de l'investissement, il s'agit de l'objectif visé.

Nous devons prendre en compte un volume séché annuellement afin qu'il soit comparable aux charges associées.

Il faudra prendre garde à exprimer le volume selon l'unité adéquate. Nous exprimons ici les volumes finaux en stères, mais pour les calculs, il sera souvent plus commode d'utiliser les mètres cubes, afin d'exprimer les données dans les unités du système international, en particulier en ce qui concerne les dimensions des séchoirs.

3.2.2. Investissements

Les investissements doivent prendre en compte l'ensemble des coûts liés à l'investissement sur le matériel nécessaire au séchage : séchoirs, chaudières, conditionnement pour le séchage, abris pour le conditionnement des bois secs, etc...

En revanche, nous ne prendrons pas en compte l'investissement liés à des matériels qui ne sont pas en lien avec le séchage (fendeuses, camions pour les livraisons...) ni ceux préexistant (centrale à cogénération, méthaniseur, hangar utilisé pour un autre usage et reconverti pour le séchage, etc.).

Là encore, le coût total de l'investissement est divisé par le nombre d'années sur lequel il est amorti, pour être ramené à une somme annuelle. Pour cela, nous prendrons la même durée que celle retenue dans les écritures comptables. Nous avons ici choisi un amortissement linéaire.

A titre d'exemple nous considérerons des coûts pour un séchoir Air Chaud Climatisé de l'ordre de 1500€ par m³ utile, et de 225€ par kW de puissance installée pour une chaudière à biomasse humide (écorces, délignures, etc.).

En ce qui concerne les hangars, un coût situé entre 80€ et 100€ par m² a été retenu ici et correspond aux valeurs que nous avons pu constater.

Pour les solutions prototypes, les coûts d'investissement sont beaucoup plus complexes à estimer et doivent l'être au cas par cas, selon les devis des fabricants.

3.2.3. Frais financiers

Les frais financiers sont ceux liés aux emprunts permettant l'acquisition de l'équipement. Nous prendrons en compte les frais annuels liés au taux d'intérêts des prêts.

Nous avons pris en compte des prêts à hauteur de 80% de l'emprunt, soit un autofinancement de 20% à hauteur de 3% par an et à annuités fixes.

En fonction de chaque situation financières ces données doivent être réévaluées.

3.2.4. Frais d'assurance

Les assurances couvrent les dommages aux biens liés au séchoirs et aux chaudières. Nous avons ici retenu annuellement des frais à hauteur de 4‰ de la valeur totale des équipements.

3.2.5. Frais d'entretien

L'entretien des équipements n'est pas à négliger sur les installations de séchage, et seul un parfait état peut garantir la performance du séchage. Nous avons retenu des frais d'entretien à hauteur de 1% et 3% par an respectivement pour le séchoir et la chaudière.

Ce prix correspond au remplacement de pièces défectueuses, aux visites d'entretien annuelles, et à la main d'œuvre associée.

3.2.6. Charges de personnel

Les charges de personnel correspondent au temps nécessaire à la manutention et à la surveillance des cycles de séchage.

Concernant la surveillance des cycles, nous comptons 15 minutes par jour, temps nécessaire au contrôle de la régulation et à la vérification rapide de l'absence de panne sur les séchoirs.

Pour le chargement du séchoir, nous comptons 1 minute par stère. Il va de soi, que de tels temps de manutention ne sont obtenus qu'avec un système de chargement et de conditionnement adéquat. Pour un séchoir de 100 m³, cela correspond à un temps de chargement d'environ deux heures et demi.

3.2.7. Consommation énergétique

La consommation énergétique thermique retenue est de 1kWh par kg d'eau évaporée. Cela correspond à une valeur moyenne de consommation relevée sur des séchoirs. En cas de mauvais usage ou de mauvaise conception cette valeur peut être plus élevée. En intégrant la quantité totale d'eau évaporée, entre la teneur en humidité initiale et la teneur en humidité finale, que nous prendrons respectivement à 40% et 20% sur brut, et dépendant du volume total de bois séché, nous avons la quantité totale d'énergie nécessaire au séchoir pour évaporer la quantité d'eau suffisante. On intégrera ensuite le rendement de la chaudière pour permettre de connaître la consommation énergétique totale.

Ensuite, en fonction du prix de l'énergie au kWh, nous pouvons déterminer le coût total de la facture énergétique thermique.

Pour l'électricité et la ventilation, nous prendrons la puissance installée, et par mesure de prudence, nous considérerons qu'elle fonctionne au maximum de sa capacité tout au long du séchage. Nous avons considéré une puissance de 0,15 kWh par mètre cube de capacité utile de séchoir.

3.2.8. Subventions

Nous n'avons pas intégré de subventions au calcul des coûts de revient du séchage. Les coûts annoncés seront donc moins élevés si une partie de l'investissement fait l'objet de subventions. Il faudra alors diminuer d'autant de coût d'investissement dans le calcul.

3.2.9. Calcul du coût de revient du séchage

Le calcul du coût de revient du séchage se calcule selon la formule suivante :

$$\text{Coût de revient par stère} = \frac{\sum \text{Coût annualisés}}{\text{volume séché annuellement}}$$

Une fois ce coût calculé, il faudra le prendre en compte pour pouvoir le répercuter sur le prix de vente du bois, sachant qu'un bois sec se valorisera mieux qu'un bois dont la teneur en humidité n'est pas correctement maîtrisée.

On pourra également rapporter chaque poste de charge au coût total afin de déterminer la part de chaque poste dans le séchage et mettre en avant les points sur lesquels travailler en priorité afin de réduire le coût du séchage.

L'amortissement des investissements et le coût énergétique, surtout thermique, représentent généralement les postes de dépense le plus importants, pour cela on pourra chercher à les limiter par les moyens suivants :

- Investissements : subventions, achat de matériel d'occasion
- Energie : cycles adaptés, utilisation de chaleur fatale, valorisation de connexes, énergie solaire.

Nous voyons ainsi la synergie entre les aspects environnementaux et économiques quant à la valorisation n'énergies peu émettrices de CO₂ qui permettront de réduire le coût du séchage. Les subventions pouvant être associées confortent cette observation.

3.3. Séchage « naturel »

3.3.1. Contexte général d'utilisation

Le séchage à l'air libre est la méthode la plus communément employée actuellement, cependant de grandes disparités existent sur les modes de contrôle de la teneur en humidité, sur les modes de conditionnement et de stockage. Ces paramètres ont une grande influence sur la teneur en humidité finale, et il apparaît donc nécessaire de mettre en avant les bonnes pratiques en la matière.

3.3.2. Aspects techniques généraux

Dans ce cas du séchage naturel, aucune régulation n'est possible. Il faut donc concevoir les installations de séchage en amont afin de favoriser des conditions « séchantes » ou « déshumidifiantes ».

Dans le cas du séchage naturel, il s'agit de choisir le lieu d'implantation du stock afin de permettre à celui-ci de sécher dans les meilleures conditions.

La ventilation des stocks de bois est le premier élément à prendre en compte pour leur implantation. En effet, l'air en contact avec les bûches ne peut capter que quelques grammes d'eau par m³ avant d'être saturé. Il est donc aisément compréhensible que pour permettre un séchage efficace d'un volume de bois contenant plusieurs tonnes d'eau, une ventilation importante est impérative. On cherchera donc toujours à favoriser la circulation de l'air dans les piles de bûches. Le conditionnement sous forme de racks, de dimensions limitées (2 mètres selon la direction perpendiculaire au sens de circulation de l'air au maximum) permet de favoriser cette circulation de l'air. De plus, dans le cas du stockage, et du séchage naturel, on cherchera à favoriser la pénétration des piles de bûches par les vents dominants, c'est-à-dire selon un lieu donné, dans la direction par laquelle les vents soufflent le plus fréquemment.

Il faut ensuite s'assurer de minimiser l'humidité dans l'environnement de la pile. Il faudra s'éloigner de toute source d'humidité locale pour implanter les piles de bois : ruisseau, étang, cuvette mal drainée, etc.

De plus, le revêtement du sol permettra également de limiter l'apport d'humidité à proximité des bois. On privilégiera un sol maçonné permettant un bon drainage. Par rapport à un sol non-revêtu, typiquement en terre, plusieurs avantages apparaissent : l'humidité est mieux gérée car on peut éviter la formation de flaques, les risques de développement fongiques et donc de perte de qualité des bois sont moins importants sur un sol propre, et les opérations de manutention sont simplifiées.

Enfin, il est primordial de limiter l'humidification des bois par la pluie. Sans aspersion des bois, et même avec une hygrométrie très élevée, les bois ne reprendront pas d'humidité. En revanche, s'ils ne sont pas protégés de la pluie, l'eau liquide peut leur faire reprendre de l'humidité, et donc inverser le phénomène de séchage. Le fait de couvrir les piles de bois va empêcher ce phénomène et accélèrera grandement le séchage par rapport à un bois non couvert.

En revanche, tout type de couverture n'est pas approprié. Le bâchage des bois doit être proscrit car il ne permet pas la ventilation de la pile, et produit donc un effet inverse à celui recherché. La couverture doit laisser circuler l'air sur les couches supérieures de la pile. Ainsi, une toiture surplombant les piles est la seule hypothèse à considérer. De plus, elle devra être conçue pour protéger l'ensemble de la pile des intempéries, et un débord suffisant devra donc être mis en œuvre.

Les bonnes pratiques à mettre en œuvre, dans le cas du séchage, naturel sont récapitulées sur les schémas de la Figure 4 . Pour favoriser le séchage, on évitera les piles de bois de dimensions très importantes, en particulier en largeur, et on préférera un conditionnement sous forme de racks qui permettent une bonne circulation de l'air entre les bûches.

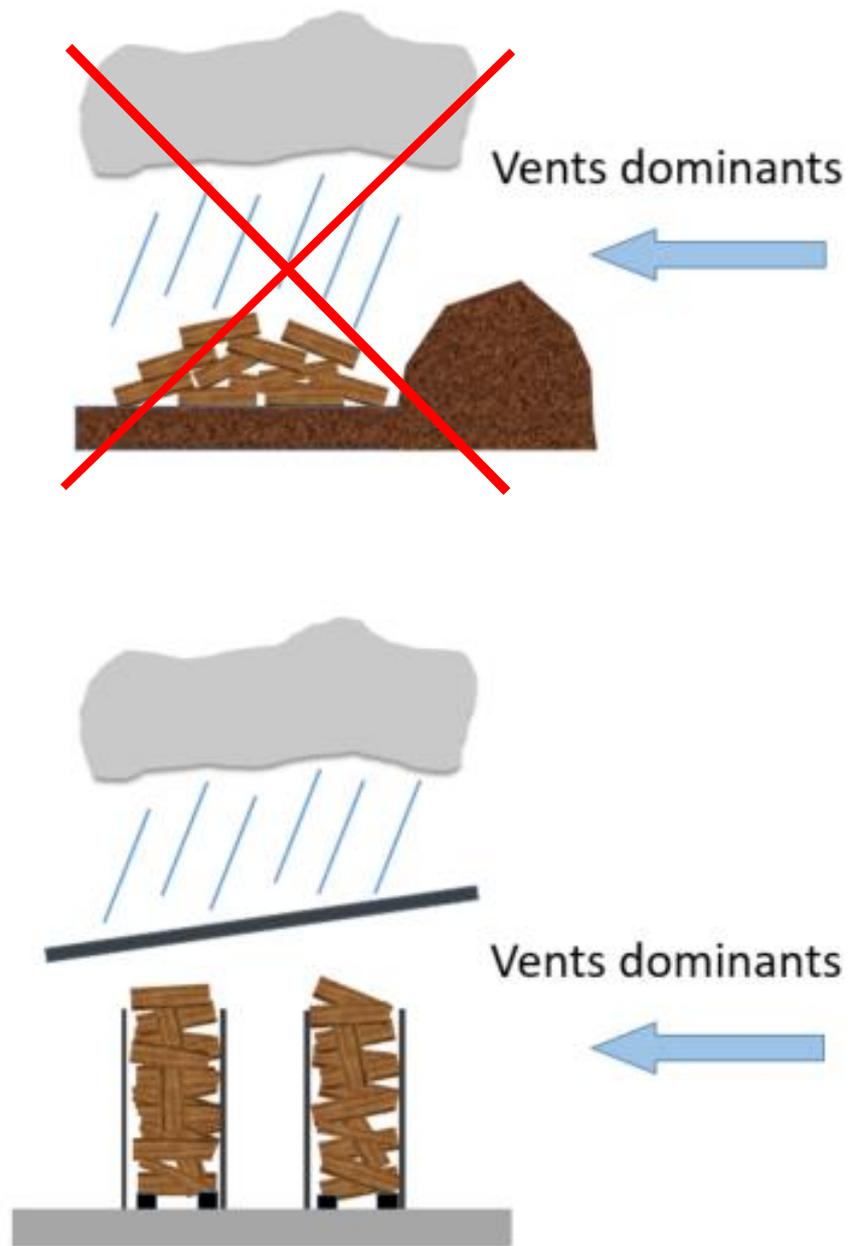


Figure 4 : modes de séchage à l'air libre, déficient lorsque les bois ne sont pas ventilés et soumis aux intempéries, ou satisfaisant lorsque les bois sont couverts et bien ventilés.

Récapitulatif des variables à analyser	
Ventilation des stocks	Implantation, cf données météo sur les vents dominants, conditionnement sous forme de racks
Humidité dans l'environnement de la pile	
Revêtement du sol	
Limitation l'humidification des bois par la pluie	Hangar/couverture

Tableau 2 : Récapitulatif des variables à analyser dans le séchage naturel

3.3.3. Etude de cas : Séchage naturel

Nous étudions ici le cas d'une unité produisant 5000 stères par an. Le séchage est réalisé à l'air libre sous abri. Pour cela un hangar de stockage est construit et permet de protéger les bûches des intempéries. Ce hangar présente une surface au sol de 600 m², pour un coût d'investissement de 122 k€ prenant en compte les racks de stockage des bûches. Cet investissement est financé par un prêt à 3% portant sur 80% du montant de l'investissement.

Le calcul du coût du séchage prend en compte l'utilisation d'un chariot de manutention et les coûts de personnels associés. L'immobilisation du stock est également considérée étant donné le volume important stocké durant le processus de séchage qui est long dans ce cas (240 jours). Le prix des bûches retenu est de 58€/stère, qui correspond au prix de vente moyen de la production.

Les résultats du calcul des coûts et les hypothèses sont synthétisés dans le tableau suivant :

Air libre	
Critères retenus	
Volume de production annuel	5000 stères
Source d'énergie	Aucune
Montant des investissements	122 k€
Teneur en humidité initiale (sur brut)	40%
Teneur en humidité finale (sur brut)	20%
Surface hangar de stockage	600 m ²
Température de séchage	variable

Résultats	
Coût de revient du séchage / stère	3,20 €
Part charges variables	25%
Dont : énergie	0%
Part charges fixes	75%
Dont : amortissement équipement	40%
Dont : immobilisation du stock	25%

Il faut noter ici que le coût de revient du séchage n'est pas négligeable même dans le cas d'un séchage dit naturel. Le coût du séchage est en effet estimé à environ 3 € par stère.

S'il est vrai que l'amortissement du bâtiment de séchage représente un tiers du coût de revient, la part des stocks immobilisés contribue aux coûts dans les mêmes proportions. Le fait de placer les stocks sous abri et de les conditionner correctement permet de diminuer la durée de séchage, d'améliorer la qualité des produits et de diminuer les besoins de trésorerie.

Les difficultés principales concernant la mise en œuvre de cette solution correspondent à trouver la surface nécessaire à l'implantation du hangar à proximité de la production des bûches (pas de ruptures de charges), et permettant une bonne ventilation des piles, ainsi que de réaliser l'investissement après démarches pour l'obtention du permis de construire qui ne peut être considéré comme négligeable.

Une synergie entre un tel stockage et la production d'électricité par des panneaux solaires photovoltaïques peut être imaginée et permettrait de partager les coûts liés à l'amortissement du hangar avec une activité supplémentaire.

3.4. Séchoirs Air Chaud Climatisé



3.4.1. Contexte général d'utilisation

Les séchoirs à Air Chaud Climatisé (ACC) sont, à l'origine, utilisés pour le séchage du bois d'œuvre. Le volume d'un tel équipement est généralement de quelques dizaines de m³, et leur mise en œuvre concerne donc des unités de tailles importantes, produisant plus de 5 000 stères par an.

Ces séchoirs sont équipés d'une ventilation puissante, permettant de renouveler rapidement l'air au travers des chargements. Cet air est chauffé et son hygrométrie est contrôlée. Le schéma de principe des séchoirs ACC est présenté sur la Figure 5.

Le séchage est rapide par cette méthode, de l'ordre de 7 jours, mais la durée peut varier en fonction des températures employées, de la teneur en eau initiale des bois, et de la configuration du chargement.

3.4.2. Aspects techniques

Le premier paramètre à prendre en compte concernant la mise en place d'un séchoir ACC est la source d'énergie thermique utilisée. Cette énergie est apportée par une chaudière pour fonctionner avec différents combustibles : connexes bois (biomasse sèche ou humide), gaz naturel ou encore fioul. Les énergies fossiles ici mentionnées restent non-pertinentes d'un point de vue environnemental, et présentent un risque financier dans le cas d'une augmentation du prix de ces énergies. Une autre solution est l'emploi d'un brûleur direct au gaz dans le séchoir qui remplace alors les batteries de chauffe. Ce choix est conditionné par l'implantation de l'unité de séchage (tous les sites ne peuvent être approvisionnés de la même manière), les capacités d'investissements, etc... La plus grande partie des séchoirs ACC utilisent actuellement des connexes bois directement produits sur site. L'ordre de grandeur à prendre en compte est de 4 kW/m³ utile.

Une alimentation électrique puissante (0,15 kW/m³ utile environ) est indispensable dans tous les cas. Il est alors important de dimensionner la ventilation avec autant de soin que la puissance thermique de l'installation. Des variateurs de fréquence permettent notamment de diminuer la consommation électrique en permettant d'adapter la vitesse de ventilation au nécessaire, ainsi que de limiter les pics de consommation au démarrage des cycles. Dans le cas du séchage de bois bûche, les cycles sont courts, et les phases de lancement de cycle sont donc très fréquentes, ce qui montre l'importance de mettre

en place de tels dispositifs au moment de l'installation du séchoir (des surcoûts de l'ordre de plusieurs milliers d'euros sont à attendre dans le cas d'une installation de variateurs après la mise en fonctionnement du séchoir).

En outre, le séchage ne peut être efficace que dans le cas où le brassage d'air est important, et les flux d'air doivent traverser les chargements de manière aussi homogène que possible (Figure 6 et Figure 7).

L'implantation sur site du séchoir doit également longuement réfléchi pour ne pas entraîner des pertes de thermie d'une part et gêner les opérations de manutention d'autre part. Les flux bois frais - séchoir - entreposage bûches sèches doivent être facilités pour limiter au minimum les temps d'arrêt du séchoir.

La diminution de volume (entre 8-10%, selon retrait volumique de chaque essence) lors du séchage devra être pris en compte au moment de fixer le prix du bois sec.

Récapitulatif des variables à analyser	
Volume de production annuel	
Source d'énergie thermique	Chaudière : Puissance thermique, source d'énergie pour le séchoir Bruleur au gaz
Alimentation électrique	Disponibilité sur site
Consommation électrique	Variateurs de fréquence
Séchoir	dimensionnement (nombre de modules), distribution des bois, implantation sur site
Bennes de conditionnement	Volume suffisant, aération permettant la bonne circulation de l'air, robustesse
Teneur en humidité	initiale (sur brut) et finale (sur brut)
Régulation du séchoir	Conversion de la teneur en humidité mesurée (sur base sèche) en teneur en humidité sur base brute dans la régulation du séchoir

Tableau 3 : Récapitulatif des variables à analyser dans le séchage à air chaud climatisé

Fabricants de séchoirs ACC : Cathild Industrie, Nardi, Secal, ...

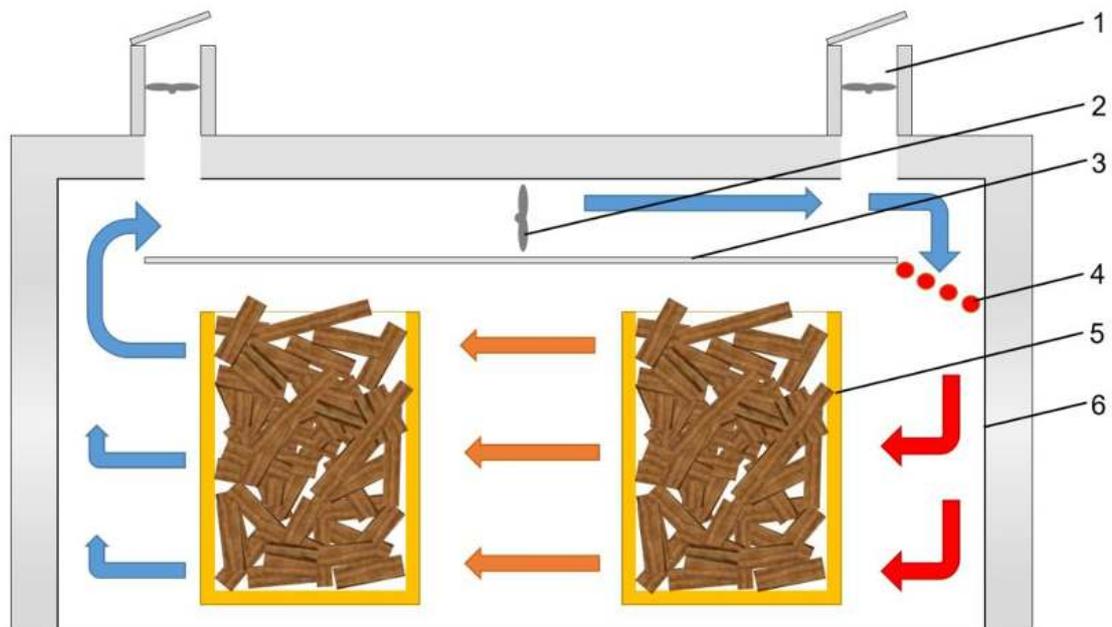


Figure 5 : Vue de côté, Séchoir air chaud climatisé : 1 : Extracteur, 2 : ventilateur, 3 : paroi de guidage de l'air, 4 : batteries de chauffe, 5 : benne de conditionnement du bois, 6 : paroi du séchoir thermiquement isolée

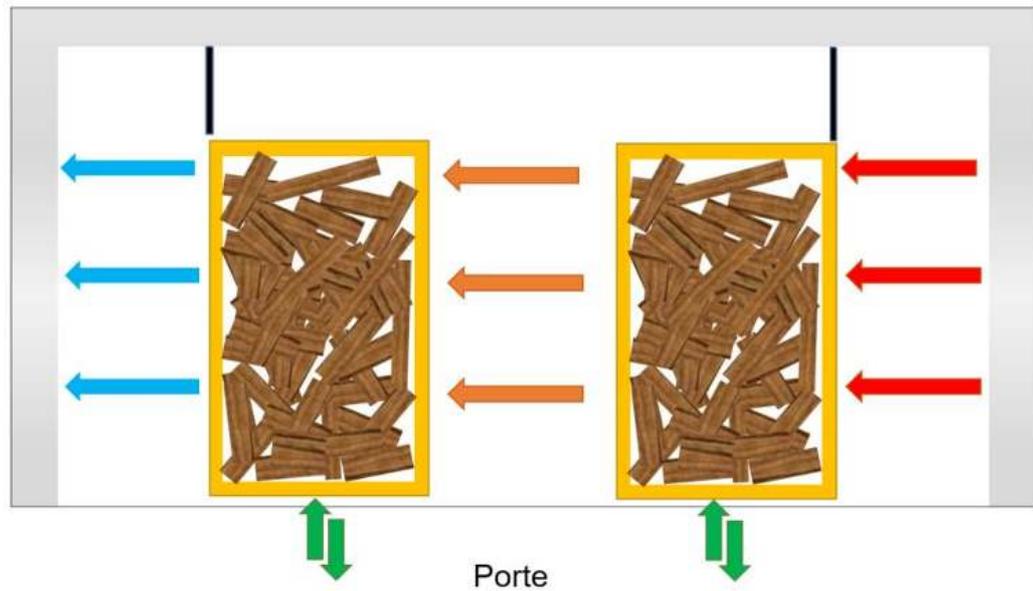


Figure 6 : Vue de dessus, chargement correct d'un séchoir air chaud climatisé permettant un passage de l'air au travers des chargements de bois. Les containers sont placés à l'aplomb de la porte, et des déflecteurs permettent d'éviter un écoulement de l'air en dehors des chargements

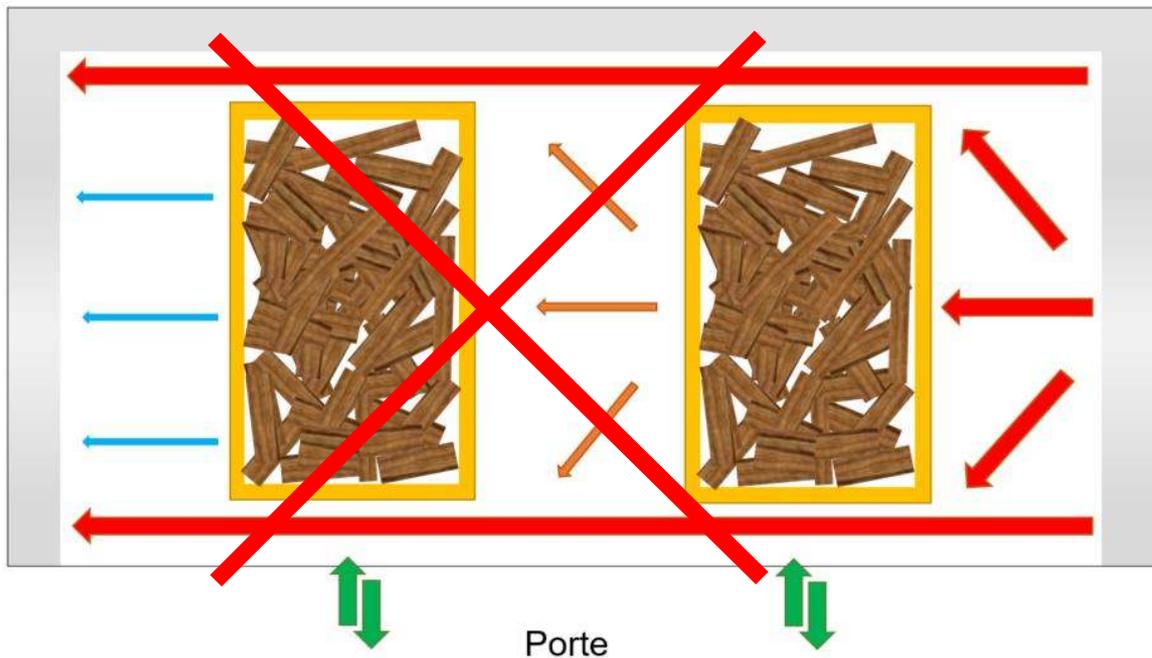


Figure 7 : vue de dessus, mauvais chargement d'un séchoir air chaud climatisé engendrant une circulation de l'air en dehors des chargements de bois : les racks de bûches laissent un passage trop important à l'air contre les parois du séchoir. L'air circule majoritairement en dehors des racks de bûches ce qui ne permet un séchage satisfaisant.

3.4.3. Etude de cas : Séchoir Air Chaud Climatise

Le cas étudié correspond à une unité de production de bois bûche de taille relativement importante. Comme cela a déjà été mentionné, le séchage en séchoirs ACC n'est pas pertinent pour sécher des volumes restreints du fait du fort investissement initial nécessaire. Dans le cas présent, nous avons retenu un montant d'investissement de 950 000 € prenant en compte le séchoir, la chaudière, les bennes et un

bâtiment de stockage pour les bûches sèches. Il serait en effet fort dommageable de voir des bois séchés reprendre de l'humidité en raison de problèmes de conditionnement ultérieurs au séchage.

L'investissement est ici financé par un prêt à 3% à hauteur de 80% du montant total. Aucune subvention n'est ici prise en compte, mais dans ce cas précis, une subvention a été octroyée par l'ADEME au projet de production thermique à partir de biomasse.

Nous nous plaçons donc dans le cas d'une production de 20000 stères par an. Pour sécher ce volume annuel total, nous considérons un temps de séchage de 7 jours en séchoir par cycle, intégrant les temps de manutention (chargement et déchargement du séchoir, mise en route des cycles de séchage).

Les variateurs de fréquence sont absents du système de ventilation. Ces équipements permettent de limiter la vitesse de rotation des ventilateurs au nécessaire et permettent de limiter la consommation électrique au nécessaire pendant le cycle de séchage. De plus, au moment du lancement du cycle, ces variateurs permettent de limiter les pics de consommations. Il est donc dommageable de constater l'absence de ces variateurs sachant que de nombreux cycles sont réalisés chaque année (un cycle dure 7 jours en moyenne, ce qui est très inférieur à une durée classique de séchoir bois d'œuvre).

Des bennes grillagées d'une contenance de 90 m³, adaptées au chargement en direct sortie fendeuse et nettoyeur, puis reprise par camions servent au conditionnement lors du séchage et permettent de limiter les opérations de manutention.

AAC	
Critères retenus	
Volume de production annuel	20000 stères
Source d'énergie	Chaudière biomasse 2 MW
Montant des investissements	950 k€
Teneur en humidité initiale (sur brut)	40%
Teneur en humidité finale (sur brut)	20%
Volume utile des séchoirs	470 stères
Nombre de cycles par an	43
Jours de séchage par an	301
Température de séchage	70°C
Résultats	
Coût de revient du séchage / stère	9.80 €
Part charges variables	45%
Dont : énergie	30%
Part charges fixes	55%
Dont : amortissement équipement	45%

Les résultats du calcul du coût de revient montrent en effet que les postes de dépenses majoritaires dans le coût du séchage sont respectivement les amortissements des équipements et les dépenses énergétiques.

Pour ce dernier point, la part d'énergie électrique consommée est importante, du fait de la forte ventilation nécessaire au procédé. Au moment de la conception du séchoir, il sera donc pertinent de mettre en place des variateurs sur les moteurs des ventilateurs pour limiter ces consommations. Le renforcement de la puissance du compteur électrique et le type d'abonnement sont à prendre en compte.

De plus, il peut paraître surprenant de considérer le coût de l'énergie thermique pour une part aussi importante dans le cas d'une chaudière biomasse qui fonctionnerait avec les connexes de l'unité de production. Il faut pourtant bien considérer le coût du combustible étant donné la possibilité de valoriser ces produits à la revente. Consommer ses propres connexes ne peut donc être considéré comme sans impact sur les coûts du procédé. Un broyage en plaquettes facilite l'amenée du combustible dans le foyer.

Dans le calcul du prix de revient, le producteur devra prendre en compte le rendement matière avec une perte de volume significative entre le bois frais et le bois sec séchoir.

Si le coût de revient peut sembler élevé avec cette technique de séchage, il faut considérer le prix de vente du stère généralement supérieur, et la bonne maîtrise de la teneur en humidité. Le produit ainsi séché a donc une qualité supérieure et une forte valeur ajoutée par rapport à un produit mal ou non séché. De plus, ce coût de revient n'intègre pas le différentiel de trésorerie positif engendré par cette méthode par rapport à un séchage à l'air libre. Le temps de séchage très court est de ce point de vue un fort atout.

3.5.Caissons de séchage

3.5.1. Contexte général d'utilisation

Dans le cas de structures de production moins importantes, ou si le séchage n'est considéré que comme une solution d'appoint permettant de produire une quantité limitée de bois secs pour satisfaire une demande ponctuelle, une solution alternative aux séchoirs ACC, de dimension réduite, existe au travers de caissons de séchage. Il s'agit de containers frigorifiques, c'est-à-dire isolés thermiquement, qui après l'ajout des organes de ventilation, de chauffage et de régulation fonctionnent d'une manière assez similaire à un séchoir ACC. Là encore, différentes sources d'énergies peuvent être utilisées, et, dans le cas où seule une source d'électricité est disponible, un système de pompe à chaleur peut permettre de fonctionner en tout électrique.



Figure 8 : Intérieur d'un caisson de séchage Eberl © Eberl

3.5.2. Aspects techniques

En termes de fonctionnement, ce type de caissons est assez similaire à un séchoir ACC, mais dans des dimensions restreintes. Les volumes vont de 15 à 40 m³ environ.

Par rapport aux séchoirs ACC, il faudra cependant prendre en compte l'aspect chargement de manière primordiale. En effet, le caractère contigu de ces caissons, s'il est mal géré, peut alourdir sensiblement les opérations de manutention, et faire augmenter les coûts de séchage. Il faut garder à l'esprit que pour rentabiliser les investissements de séchoirs, ceux-ci doivent avoir un taux d'utilisation aussi élevé que possible.

Le système de conditionnement des bois doit donc être conçu en amont pour permettre des chargements rapides et une ventilation performante.

Le type d'énergie thermique utilisé aura également un impact important sur le coût et doit être choisi en tenant compte de la ressource disponible (réseaux existants, ressource disponible en biomasse, etc.). De plus, différentes options permettent de limiter les coûts d'exploitation du séchoir. Ainsi, au moment de l'acquisition de cet équipement, le choix de la mise en place d'échangeurs de chaleur au niveau de l'extraction, ainsi que d'un système de régulation automatisé peut s'avérer très pertinent pour limiter les coûts, respectivement, liés à la consommation énergétique et de personnels pour le suivi de cycle. Le renforcement de la puissance du compteur électrique et le type d'abonnement sont à prendre en compte.

Récapitulatif des variables à analyser	
Volume de production annuel	
Source d'énergie thermique	Chaudière : Puissance thermique ¹ , source d'énergie pour le séchoir
Alimentation électrique	Disponibilité sur site
Consommation énergétique	Echangeurs thermiques au niveau de l'extraction
Séchoir	dimensionnement (nombre de modules), distribution des bois, implantation sur site
Bennes de conditionnement	Volume suffisant, aération permettant la bonne circulation de l'air, robustesse, possibilité de manutention par chariot élévateur pour mise en place sur le chariot du séchoir.
Teneur en humidité	initiale (sur brut) et finale (sur brut)
Régulation du séchoir	Conversion de la teneur en humidité mesurée (sur base sèche) en teneur en humidité sur base brute dans la régulation du séchoir

Tableau 4 : Récapitulatif des variables à analyser pour les caissons de séchage

Fabricant de séchoirs caisson : Eberl

3.5.3. Etude de cas : CAISSONS DE SECHAGE

Le cas retenu pour la mise en place de caissons de séchage correspond à une entreprise produisant annuellement 10000 stères et ayant décidé d'en sécher artificiellement 5000 pour pouvoir fournir du bois sec en période de forte demande, et sans augmenter les stocks. Les caissons utilisés sont des containers isothermes modifiés de 40 stères de capacité chacun. Ainsi pour atteindre la capacité de séchage de 5000 stères par an, il faut prévoir 3 caissons de séchage. De plus, la chaudière alimentant les caissons en énergie thermique est une chaudière bois de 300 kW. Le montant total des investissements dans les caissons, est estimé à 240 000 € pour les caissons de séchage, à 80 000€ pour la chaudière et à 10 000 € pour le hangar, financés à 80% par un prêt à 3%.

Un hangar de 70 m² est également installé pour permettre le stockage des bois secs.

¹ Ordres de grandeurs : 4KW/m3 en thermique et 0.15 kWh/m3 en électrique

Caissons de séchage	
Critères retenus	
Volume de production annuel	5000 stères
Source d'énergie	Chaudière bois 300 kW
Montant des investissements	330 k€
Teneur en humidité initiale (sur brut)	40%
Teneur en humidité finale (sur brut)	20%
Durée de cycle	7 jours
Nombre de cycles par an	42
Volume de chargement total	120 stères
Température de séchage	70°C
Résultats	
Coût de revient du séchage / stère	14,90 €
Part charges variables	35%
Dont : énergie	20%
Part charges fixes	65%
Dont : amortissement équipement	55%

Dans ce cas, le poste de contribution majoritaire dans le coût de revient est l'amortissement des équipements, représentant plus de la moitié du coût total à lui seul. Il est donc nécessaire de rentabiliser cet équipement en l'utilisant au maximum de ses capacités. Le coût global de cette solution est élevé, mais s'explique par le fait que de tels équipements sont de dimensions limitées et restent donc chers par rapport à leur volume utile.

Toutefois, ils permettent d'accéder à une solution de séchage rapide, et ainsi de sécher artificiellement avec un investissement initial réduit par rapport à un séchoir ACC.

Les caissons apparaissent donc comme un compromis permettant de proposer une gamme de produits d'humidité et de qualité constante.

3.6.Synergie avec d'autres activités – valorisation de chaleur fatale



Figure 9 : Unité de méthanisation

Réaliser des investissements spécifiques et très onéreux pour le séchage du bois bûche est l'un des freins principaux à son développement. Une autre approche est donc de profiter de la présence de certaines

industries génératrices d'énergie thermique pour récupérer, le cas échéant, de la chaleur fatale² pour sécher les bûches.

Nous ferons ici état de deux types de valorisations possibles, la chaleur fatale issue de la méthanisation et la chaleur fatale issue de la cogénération.

Les installations de méthanisation se sont largement répandues sur le territoire et permettent de produire du biogaz pour alimenter des unités de cogénération. Les chaudières biomasse à cogénération ont également rencontré un fort développement et permettent un fort maillage du territoire.

Dans les deux cas, la production d'électricité ne peut être rentable, ou subventionnée, que si le rendement énergétique est suffisant. Il s'agit alors de valoriser la chaleur produite et qui ne serait pas utilisée autrement. Elle peut être utilisée pour sécher diverses biomasses, notamment des fourrages, mais une part de cette énergie est également perdue. Il s'agit alors de récupérer cette chaleur fatale pour sécher le bois bûche, donc augmenter son pouvoir calorifique, et *in fine*, stocker d'une certaine manière l'énergie qui aurait autrement été perdue.

Le bois bûche permet dans ces cas donc bien un stockage d'énergie, et une amélioration des rendements de ces formes de production d'énergies renouvelables.

3.6.1. Aspects techniques

Pour de telles applications, il faut en premier lieu déterminer avec le porteur de projet méthanisation ou cogénération la capacité de séchage de l'installation en fonction de la capacité de production d'énergie et de la chaleur résiduelle de l'installation.

Il faut ensuite concevoir l'installation de séchage des bûches de façon à maximiser le rendement énergétique. Pour cela, le mode de conditionnement des bûches est essentiel. Plusieurs solutions sont possibles, mais il faut retenir comme principe de base, que l'air chaud doit pouvoir traverser l'ensemble des chargements, de la façon la plus homogène possible.

En termes de logistique, il est possible de concevoir des bennes venant se raccorder à l'arrivée d'air chaud afin de limiter la manutention. Une fois la teneur en humidité souhaitée atteinte, un camion charge directement la benne et peut acheminer les bûches sèches chez le client final ou sur une zone de dépôt suivant la typologie souhaitée.

Une autre solution possible se base sur un plancher percé placé sur une sorte de rails. Les bois sont placés sur le plancher en dessous l'air chaud est insufflé. Ici il faudrait rajouter le coût des opérations de manutention de chargement et déchargement des bois.

Il ne faudrait pas négliger le coût logistique qui s'ajouterait du transport du centre de production de bois bûche à l'unité de méthanisation ou cogénération.

Récapitulatif des variables à analyser	
Volume de production annuel	
Thermique	Quantité de chaleur disponible Puissance disponible
Equipement	Conditionnement des bois : racks/ bennes correctement dimensionnés
Régulation	Intégration d'une régulation dédiée au séchage de bûches – mesure de la teneur en humidité intégrée

Tableau 5 : Récapitulatif des variables à analyser dans le séchage en synergie avec d'autres activités

² Energie thermique indirectement produite par le processus, et qui n'est ni récupérée, ni valorisée.

3.6.2. Etude de cas : Chaleur fatale de méthanisation

Le cas étudié ici correspond à une unité de séchage adossé à une plateforme de méthanisation. La capacité de séchage est estimée à 5000 stères.

L'énergie utilisée pour le séchage est considérée comme une chaleur fatale, c'est-à-dire que si elle n'était pas utilisée pour le séchage des bûches, elle serait perdue. Le coût de l'énergie est donc considéré comme nul³. En revanche, nous intégrons le coût de l'installation : réseau de chaleur, et système de ventilation, pour un total de 50 000€. En plus de cet investissement, 5 bennes de camion adaptée pour pouvoir servir de container de séchage sont nécessaires pour un coût estimé à 20 000 € l'unité, portant l'investissement total à 150 000 €. Cet investissement est financé par un prêt à 3% portant sur 80% de l'investissement total.

La température de séchage retenue est de 50°C, nécessitant une durée de séchage de 12 jours pour ramener la teneur en humidité de 40% à 20% sur brut.

Les données sont récapitulées dans le tableau suivant :

Récupération de chaleur fatale	
Critères retenus	
Volume de production annuel	5000 stères
Source d'énergie	Chaleur fatale de cogénération méthaniseur
Montant des investissements	150 k€
Teneur en humidité initiale (sur brut)	40%
Teneur en humidité finale (sur brut)	20%
Température de séchage	50°C
Volume par bennes	40 stères
Durée de cycle	12 jours
Nombre de cycles par an	42
Résultats	
Coût de revient du séchage / stère	6,40 €
Part charges variables	20%
Dont : énergie électricité	10%
Part charges fixes	80%
Dont : amortissement équipement	65%

Le coût du séchage reste ici globalement très faible étant donné qu'une grande part de l'installation est amortie par son but principal qu'est la production d'électricité. Nous prenons seulement ici en compte l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement des ventilateurs et qui ne pourra pas être reversée sur le réseau.

Sans surprise, les charges fixes représentent la part très majoritaire des coûts, car la consommation énergétique n'est que peu importante. L'intérêt de concevoir l'installation de façon rationnelle est donc prépondérante dans ce cas, en minimisant les coûts de l'investissement. L'intérêt d'associer le séchage de bûches à la valorisation de chaleur fatale est donc ici démontrée, et de nombreuses perspectives peuvent apparaître à une échelle locale, et sur l'ensemble du territoire.

D'autres modes de fonctionnement peuvent exister avec un prix de vente faible de l'énergie utilisée pour le séchage.

Outre une facturation de l'énergie ou de l'emplacement pour le séchage, un prix par stère de bois séché peut être un mode de fonctionnement intéressant.

³ Mais cela pourrait changer en fonction de l'accord avec le propriétaire de l'unité de méthanisation ou cogénération.

3.7. Séchoirs solaires

Les séchoirs dits « solaires » peuvent regrouper des équipements très divers. Du séchoir fonctionnant à l’instar d’une serre (équipements installés en France et donnant des résultats très satisfaisants avec un conditionnement en rack – parfois couplés à une chaudière biomasse de faible puissance intervenant en complément lors d’un ensoleillement faible - mais plus commercialisés, au séchoir intégrant la production d’électricité les différences sont notables.

Nous nous intéresserons dans le cas présent aux séchoirs permettant à la fois la production d’énergie solaire thermique et d’électricité photovoltaïque (Figure 10).

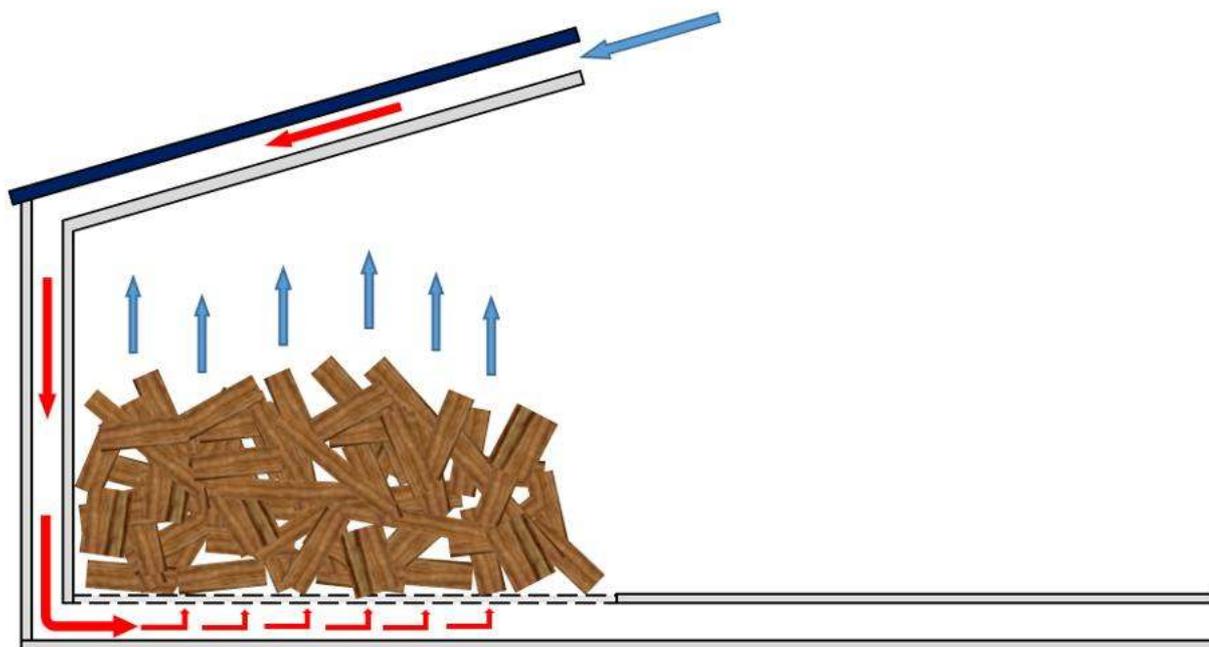


Figure 10: schéma de principe du fonctionnement d'un système de séchage solaire

3.7.1. Aspects techniques

Il ne s’agit pas dans ce cas d’obtenir une production d’eau chaude par des panneaux solaires thermiques classiques, mais de créer une lame d’air entre des panneaux solaires photovoltaïques et le plafond du hangar de séchage. L’air réchauffé sous la toiture est ensuite insufflé dans le stock de bois à sécher. Pour permettre une ventilation correcte de tout le chargement de bois, des ventilateurs alimentés par l’énergie électrique produite par les panneaux sont installés dans les circulations.

L’intérêt est de pouvoir utiliser seulement une partie de l’énergie électrique produite pour rendre le système plus efficace. De plus, les panneaux photovoltaïques sont d’autant plus efficaces qu’ils sont refroidis, et faire circuler un air froid à leur surface permet de diminuer leur température. Comme pour l’exploitation de chaleurs fatales, ce type de séchoir permet donc de rechercher une synergie entre plusieurs sources de production d’énergies renouvelables.

Pour créer la lame d’air, un parement isolant est placé à quelques centimètres des panneaux. Il existe également des solutions commerciales de panneaux intégrant directement ce système de refroidissement. Les panneaux, une fois connectés entre eux, fournissent le flux d’air chaud permettant le séchage.

L’isolation de la lame d’air est également prépondérante pour ne pas créer de pertes de charges et permettre de maximiser le rendement du séchage.

Récapitulatif des variables à analyser	
Volume annuel de production	
Localisation géographique	Pertinence de l'installation solaire en fonction de l'ensoleillement local
Panneaux solaires	Orientation (sud), puissance
Système de ventilation	Grilles au sol pour insuflation d'air, hauteur limitée de la pile de bois.
Manutention	Chariot de manutention avec godet adapté, ou bennes grillagées permettant l'insufflation d'air chaud

Tableau 6 : Récapitulatif des variables à analyser dans le séchage solaire

3.7.2. Etude de cas : Séchoir solaire

Nous nous plaçons dans le cas d'un séchage de 5000 stères par un séchoir solaire configuré selon le schéma de la Figure 10. L'investissement dans le hangar intégrant le système de séchage est de 300 k€ (470 stères de capacité), et est financé par un prêt de 3% couvrant 80% des besoins de l'investissement. Nous considérons une température de séchage de 30°C permettant d'obtenir la teneur en humidité de 20% sur brut au bout de 23 jours.

Nous garderons à l'esprit ici que le séchage dépend de l'énergie solaire disponible à un instant donné et pour un lieu donné. Des variations saisonnières et selon l'implantation sont à attendre. Ainsi, le séchage solaire sera d'autant plus performant que l'ensoleillement est élevé.

Séchage solaire	
Critères retenus	
Volume de production annuel	5000 stères
Source d'énergie	énergie solaire
Montant des investissements	300 k€
Teneur en humidité initiale (sur brut)	40%
Teneur en humidité finale (sur brut)	20%
Température de séchage	30°C
Résultats	
Coût de revient du séchage / stère	12,60€
Part charges variables	20%
Dont : énergie (électrique)	10%
Part charges fixes	80%
Dont : amortissement équipement	70%

Le coût de revient est relativement élevé comparativement à la valorisation de chaleur fatale, étant donné l'investissement important à réaliser pour, à la fois, le bâtiment de séchage (235 m²) et le système solaire. Cependant, la revente d'énergie électrique n'est pas considérée ici et doit permettre de valoriser davantage les coûts d'investissement.

Comme pour la valorisation de la chaleur fatale, la part très majoritaire du coût de revient est composée par l'investissement. Il convient donc de concevoir l'installation avec beaucoup de précautions pour limiter les risques associés. La consommation énergétique est très limitée, et correspond à l'énergie consommée par la ventilation (des petits moteurs électriques permettent la ventilation. C'est de l'autoconsommation sur l'énergie produite. Ici la ventilation est limitée et peut être considérée comme négligeable). Dans l'optique d'une augmentation du coût de l'énergie, ce type de dispositif trouve alors tout son intérêt, car il est celui qui utilise le moins d'énergie « payante » dans le processus de séchage du bois.

3.8. Récapitulatif des technologies existantes, critères de choix

Le tableau suivant récapitule les différentes technologies présentées et la pertinence de chaque technologie selon les caractéristiques de l'entreprise :

	Air libre	Air Chaud Climatisé	Caissons de séchage	Récupération de chaleur fatale	Solaire
Volume séché / an	Tous volumes, en fonction de la surface disponible pour implantation et stockage	>5 000 stères	< 5 000 stères	En fonction de la disponibilité en énergie	En fonction de la surface disponible pour implantation
Temps de séchage	Selon conditions climatiques, > 6 mois	3-10 jours selon essences et cycle de séchage	3-10 jours selon essences et cycle de séchage	3-12 jours selon essences et cycle de séchage	Variable selon ensoleillement, >15 jours
Teneur en humidité finale (sur brut)	20% au mieux, selon les conditions climatiques, et le conditionnement	Toute humidité	Toute humidité	Toute humidité	Toute humidité
Stock nécessaire	Important	Faible	Faible	Faible	Moyen
Investissement nécessaire	Faible	Elevé	Moyen	Moyen	Moyen
Surface nécessaire	Très élevée	Moyenne : dimensions séchoir + circulations + stock bois secs	Faible	Moyenne selon typologie du système retenu	Moyenne-Elevée
Risque de perte énergétique / Mauvais rendement	Importante	Faible si installation en bon état	Faible si installation en bon état	Faible si installation en bon état	Importante
Performance environnementale	Très bonne si séchage satisfaisant (H<20%)	Dépend du type d'énergie utilisé : - Bonne si chaudière biomasse - Mauvaise si gaz - Très mauvaise si fioul	Idem Air Chaud Climatisé	Très bonne, car valorisation de chaleur fatale	Très bonne si pas de prise en compte de la fabrication des panneaux solaires
Ordre de grandeur du coût du séchage par stère	3 €	10 €	15 €	7 €	13 €

Tableau 7 : récapitulatif des forces et des faiblesses de chaque technologie selon la typologie de l'entreprise

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

FIGURES

Figure 1 : Evolution du PCI du bois en fonction de la teneur en humidité.....	10
Figure 2: mesure de la teneur en humidité des bois.....	11
Figure 3 : diagramme d'orientation vers la solution de séchage artificiel la plus pertinente.....	16
Figure 4 : modes de séchage à l'air libre, déficient lorsque les bois ne sont pas ventilés et soumis aux intempéries, ou satisfaisant lorsque les bois sont couverts et bien ventilés.	21
Figure 7 : Vue de côté, Séchoir air chaud climatisé : 1 : Extracteur, 2 : ventilateur, 3 : paroi de guidage de l'air, 4 : batteries de chauffe, 5 : benne de conditionnement du bois, 6 : paroi du séchoir thermiquement isolée.....	24
Figure 8 : Vue de dessus, chargement correct d'un séchoir air chaud climatisé permettant un passage de l'air au travers des chargements de bois. Les containers sont placés à l'aplomb de la porte, et des déflecteurs permettent d'éviter un écoulement de l'air en dehors des chargements.....	25
Figure 9 : vue de dessus, mauvais chargement d'un séchoir air chaud climatisé engendrant une circulation de l'air en dehors des chargements de bois : les racks de bûches laissent un passage trop important à l'air contre les parois du séchoir. L'air circule majoritairement en dehors des racks de bûches ce qui ne permet un séchage satisfaisant.....	25
Figure 10 : Intérieur d'un caisson de séchage Eberl © Eberl.....	27
Figure 11 : Unité de méthanisation.....	29
Figure 12: schéma de principe du fonctionnement d'un système de séchage solaire.....	32

TABLEAUX

Tableau 1 : Correspondance des valeurs courantes de teneur en humidité sur base sèche et sur base brute. En vert, les valeurs permettant de considérer les bûches comme sèches.....	9
Tableau 2 : Récapitulatif des variables à analyser dans le séchage naturel.....	21
Tableau 3 : Récapitulatif des variables à analyser dans le séchage à air chaud climatisé.....	24
Tableau 4 : Récapitulatif des variables à analyser pour les caissons de séchage.....	28
Tableau 5 : Récapitulatif des variables à analyser dans le séchage en synergie avec d'autres activités.....	30
Tableau 6 : Récapitulatif des variables à analyser dans le séchage solaire.....	33
Tableau 7 : récapitulatif des forces et des faiblesses de chaque technologie selon la typologie de l'entreprise.....	34

SIGLES ET ACRONYMES

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AFPIA	Association pour la Formation Professionnelle dans les Industries de l'Ameublement

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

ETUDE SOLUSEC

Les politiques publiques menées en faveur du développement des énergies renouvelables (crédit d'impôt, programmes de R&D, etc.) ont entraîné une forte évolution du parc d'appareils de chauffage indépendant au bois (normalisation des appareils, meilleurs rendements énergétiques, baisse des émissions de particules).

Ces nouveaux appareils très performants nécessitent pour bien fonctionner, l'utilisation d'un produit bois de chauffage de haute qualité (produit sec à 20% d'humidité). Or, les progrès constatés sur la partie équipement de chauffage ne se retrouvent pas au niveau de la filière combustible bois. La consommation de bois de chauffage en France est estimée à près de 27.2 Mm³ dont seulement 4.8 Mm³ passent par le circuit professionnel (2 900 entreprises de toute taille, des TPE, PME et ETI) et seulement 0.2 Mm³ de bois est sec garanti à moins de 20% d'humidité.

Le présent guide a pour objectif de permettre aux producteurs de mieux prendre en compte l'importance de la teneur en humidité caractérisant un bois de chauffage de qualité, en étant capable de mieux la caractériser, et pouvoir s'orienter vers de solutions de séchage à même de garantir l'obtention de bois secs à moins de 20% d'humidité sur brut.

Plusieurs solutions technologiques sont ici considérées, et leur pertinence jugée en fonction de la typologie des entreprises de production de bois de chauffage.