



INSTITUT TECHNOLOGIQUE

**ETABLISSEMENT DES REGLES DE BASE
DU SECHAGE DU PIN D'ALEP ET
PREMIERS ELEMENTS
TECHNICO-ECONOMIQUES**





INSTITUT TECHNOLOGIQUE

ETABLISSEMENT DES REGLES DE BASE DU SECHAGE DU PIN D'ALEP ET PREMIERS ELEMENTS TECHNICO-ECONOMIQUES

Rapport final

Projet B01248

Chef de projet : Gabriel ROBERT
Équipe projet : Damien LOZACH
Jean-Denis LANVIN

16 Juin 2016

Siège social

10, rue Galilée
77420 Champs-sur-Marne
Tél +33 (0)1 72 84 97 84

Délégation Territoriale Sud-Est

CS 90251
38044 Grenoble cedex 9
Tél +33 (0)4 76 15 40 70
Fax +33 (0)4 76 15 40 98

www.fcba.fr

Sret 775 680 903 00132
APE 7219Z1
Code TVA CEE : FR 14 775 680 903

Institut technologique FCBA : Forêt, Cellulose, Bois - construction, Ameublement

SOMMAIRE

1. Contexte et objectifs	5
1.1 Etat de la ressource en Provence-Alpes-Côte d'Azur	5
1.2 Objectifs	5
2. Essais	6
2.1 Description du matériel.....	6
2.2 Méthodologie.....	7
2.3 Essai 1	9
2.3.1 Choix de la première table	9
2.3.2 Description du lot 1	10
2.3.3 Description de l'essai 1	11
2.3.4 Résultats.....	12
2.3.5 Conclusions de l'essai 1.....	12
2.4 Essai 2	13
2.4.1 Description du lot 2	13
2.4.2 Description de l'essai 2	14
2.4.3 Résultats.....	14
2.4.4 Conclusions de l'essai 2.....	15
2.5 Essai 3	15
2.5.1 Description du lot 3	15
2.5.2 Description de l'essai 3	16
2.5.3 Résultats.....	17
2.5.4 Conclusion de l'essai 3	17
2.6 Conclusions et préconisations	18
3. Première approche économique	20
3.1 Scénario de travail.....	20
3.2 Hypothèses de calcul	20
3.3 Calcul du coût de revient du séchage	22
4. Conclusion	23
Glossaire	24

Cette étude a bénéficié d'une aide financière de la DRAAF PACA



1. Contexte et objectifs

1.1 Etat de la ressource en Provence-Alpes-Côte d'Azur

Essence emblématique de la région, le pin d'Alep est également la 1^{ère} ressource résineuse en terme de disponibilité en Provence-Alpes-Côte d'Azur (source : Etude de ressource, FCBA, 2005). Il fait, depuis plus de 10 ans, l'objet de travaux de R&D pour mieux dynamiser la gestion du massif et la transformation des produits récoltés.

Une première série d'études avait été engagée sur des aspects relatifs à la sylviculture, l'exploitation forestière et le fonctionnement et le renouvellement des peuplements¹. Une deuxième vague a ensuite été initiée dans le prolongement d'une étude réalisée en 2011 par FIBRESUD, alors association interprofessionnelle régionale de PACA². Ce travail concluait sur la nécessité d'approfondir plusieurs axes techniques de façon à positionner cette essence sur les marchés des produits pour la construction ou pour les aménagements extérieurs.

C'est dans ce cadre qu'ont été lancées plusieurs initiatives, citons notamment :

- La caractérisation mécanique des avivés de pin d'Alep pour un usage en structure (étude en cours, portée par France Forêt PACA),
- L'analyse de sa durabilité naturelle et de son imprégnabilité en vue de l'application de traitements de préservation (étude portée par FCBA).

La présente étude – Etablissement des règles de base du séchage du pin d'Alep et premiers éléments technico-économiques – vise à optimiser une étape importante et incontournable dans les process de production d'éléments finis ou semi-finis, en pièces massives ou en produits d'ingénierie, qu'ils soient utilisés ensuite en charpente ou ossature, en revêtement intérieur ou extérieur (lambris et bardage), ou pour des produits d'agencement ou d'ameublement.

Essence peu travaillée ces dernières décennies, le pin d'Alep n'a pas bénéficié d'étude visant à optimiser son séchage. Or on sait que chaque essence requiert des programmes spécifiques qui, bien appliqués, apportent des gains non négligeables sur les coûts (moins de défauts sur les sciages en sortie de séchoir, moins d'intrants énergétiques...).

1.2 Objectifs

C'est donc pour ces raisons que FCBA a proposé de déterminer une table de séchage pour le pin d'Alep, en mesure de donner satisfaction aux acteurs de la filière bois. En 2005, le CIRAD avait proposé un début de réponse, avec une table obtenue après quelques essais. Il avait été ainsi proposé un ressuyage à l'air, suivi d'un séchage d'une semaine, avec une température inférieure à 65°C, permettant d'amener le bois de 51 % d'humidité (après ressuyage) à 9 %. Il est à noter cependant que la littérature conseille un séchage à 70°C et plus, qui permettrait de diminuer la quantité de résine dans le bois, en facilitant d'autant l'usinage.

Le but est ici de proposer une table de séchage pour séchoir à air chaud climatisé, les plus courants dans l'industrie, permettant d'amener de l'état vert à 18 % d'humidité un lot d'avivés de pin d'Alep de section 50 x 140 mm. Cette section est très couramment utilisée pour les montants d'ossature en construction bois, avec une humidité de 18 %.

¹ Les principaux résultats de ces travaux sont repris dans l'ouvrage collectif "Le pin d'Alep en France" (2013, coordination IRSTEA, éditions Quae)

² Voir http://www.fcba.fr/sites/default/files/fcbainfo_26_2013_pfenart_valorisation_pins_paca.pdf

L'étude propose également une première approche du coût de revient de l'opération de séchage établi sur la base des résultats de consommation d'énergie et de durée de cycle obtenus lors des essais en laboratoire.

2. Essais

2.1 Description du matériel

Tous les essais de séchage ont été réalisés dans un séchoir air chaud climatisé de laboratoire. Ce séchoir a des dimensions semi-industrielles, permettant le séchage d'une charge d'environ 2 m³ sous la forme d'une pile unique. La ventilation est réversible, et l'humidification peut se faire soit avec de la vapeur chaude, soit avec de l'eau froide pulvérisée par de l'air comprimé. L'ensemble des batteries de chauffe électriques permet une température de fonctionnement maximale de 150°C.

Parmi les équipements de mesure, on dispose de deux psychromètres pour mesurer l'humidité relative, 24 sondes d'humidité pour le bois, deux tubes de Pitot pour mesurer la vitesse de l'air dans la pile, et des compteurs électriques pour déterminer la quantité d'énergie employée par le processus.

Autres Matériels de mesure :

- Humidimètre à pointes GANN HT 65
- Balance à portée de 60 kg (20 g de précision)
- Réglet



Photo 1 : Séchoir de laboratoire et charge de pin d'Alep

2.2 Méthodologie

Pour évaluer la qualité du séchage et pouvoir quantifier les consommations d'énergie spécifique, des mesures sont réalisées avant, pendant et après séchage.

Les mesures réalisées avant séchage sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau 1. Grandeurs mesurées avant séchage

Grandeur mesurée	Méthode
Masse initiale (kg)	Pesée
Humidité initiale (%)	Mesure à l'humidimètre à pointes
Largeur moyenne de cernes (mm)	Comptage sur 50 mm, moyenne
Débit (quartier, faux-quartier, dosse, présence de cœur)	Lecture
Flèche de face initiale (mm)	Mesure sur 2m avec guide
Flèche de chant initiale (mm)	Mesure sur 2m avec guide
Tuilage initial (mm)	Mesure avec un comparateur
Repérage des fentes pré-séchage	Marquage à la craie grasse

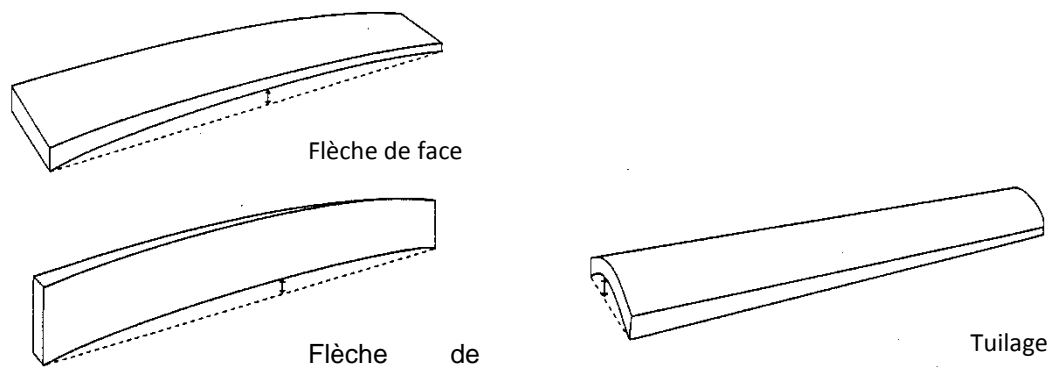


Figure 1 Déformations

Pendant le séchage, l'humidité des sciages est mesurée et suivie sur 24 points. Les conditions réelles de séchage ; température et humidité relative de l'air ainsi que les consommations d'énergie sont enregistrées tout au long du cycle.

On distingue dans les consommations d'énergie, l'énergie électrique utilisée pour l'apport thermique, appelée « énergie thermique », de l'énergie électrique utilisée pour le brassage de l'air dans le séchoir grâce aux ventilateurs.

Les mesures réalisées après le séchage sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau 2. Grandeurs mesurées après séchage

Grandeur mesurée	Méthode	Limite de conformité
Masse	Pesée	
Humidité en surface, au 1/3 et à cœur	Humidimètre à pointes	[12,6% ; 23,4%]
Flèche de face	Mesure sur 2m avec guide	10mm
Flèche de chant	Mesure sur 2m avec guide	8mm
Tuilage	Comparateur	5mm
Fentes	Appréciation visuelle de l'apparition de nouvelles fentes	

Les limites de conformité en termes de flèches proviennent de la norme EN 14-081 sur le marquage CE, qui exige des flèches de face inférieures à 10mm sur 2m et des flèches de chant inférieures à 8mm sur 2m.

Les limites en termes d'homogénéité de séchage sont définies par la norme NF EN 14298 sur l'estimation de la qualité du séchage. Cette norme fixe la conformité d'un lot de sciages séchés via la proportion comprise dans un intervalle donné d'humidité : 93,5 % des sciages doivent se situer dans l'intervalle $[0,7 \times H\%_{\text{cible}} ; 1,3 \times H\%_{\text{cible}}]$. $H\%_{\text{cible}}$ est fixé à 18 % dans cette étude, l'intervalle d'humidité est donc de [12,6 % ; 23,4 %].

L'étude porte sur des lots de sciages de pin d'Alep, de section 140x50 mm, et de longueur 2,3m.

Description des lots lors des essais :

	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Nombre de sciages	78	72	78

Les lots sont constitués de la même façon : 6 sciages par lit, chaque lit reposant sur 4 baguettes de 20mm d'épaisseur, séparées par un entraxe de 750mm.



Photo 2: Pile de pin d'Alep avec baguettes (entraxe 750 mm)

2.3 Essai 1

2.3.1 Choix de la première table

Il a été décidé de choisir comme première table de séchage une table utilisée industriellement, et proposée par FCBA. Séchage du bois - Guide pratique (CTBA – 1994) contient ainsi toute une série de tables de séchage aux conditions différant selon les essences. Trois de celles-ci sont notamment utilisées habituellement pour les résineux, il s'agit des tables 10, 11 et 12, et il nous a semblé pertinent de chercher laquelle correspondait le mieux à une essence aux propriétés mécaniques proches de celles du pin d'Alep. Il a donc été décidé de réaliser un profil d'« essence-type » pour chaque table, en comparant les moyennes de densité, de retrait tangentiel et de retrait radial, de chacune des essences pour laquelle la table est préconisée. Ces valeurs proviennent toutes des données du CIRAD, de même que celles pour le pin d'Alep.

Tableau 3. Présentation des caractéristiques physiques des "essence-type" de chaque table étudiée, et caractéristiques physiques du pin d'Alep. Données provenant des documents du CIRAD.

Essences concernées	Douglas, Pin laricio, Pin sylvestre	Epicéa, Sapin Pin maritime	Mélèze	Pin d'Alep
Densité	0,54	0,50	0,6	0,55
Retrait tangentiel (%)	7,6	8,6	8,2	7,3
Retrait radial (%)	4,95	4,1	4,2	4,1
Table	10	11	12	

Tableau 4. Variations entre l'essence-type de chaque table et les caractéristiques du pin d'Alep

	Table 10	Table 11	Table 12
Densité	- 2%	- 9%	+ 9%
Retrait tangentiel (%)	+ 4%	+ 18%	+12 %
Retrait radial (%)	+ 21%	+0 %	+ 2 %

Les différences cumulées entre l'« essence-type » de chaque table et le pin d'Alep sur les critères densité, retrait tangentiel et retrait radial sont comparables. Il a donc été décidé de réaliser le premier essai de séchage en suivant la table de séchage numéro 10 car c'est celle qui présente les conditions de séchage les plus douces avec un gradient de séchage limité à 3,3 au plus fort, contre 4.2 et 4 pour les tables 11 et 12.

Le tableau suivant présente les conditions de séchage de la table 10

Tableau 5. Table 10 du « séchage du bois- guide pratique » (CTBA)

Humidité du bois H (%)	Température		Humidité relative de l'air HR (%)	Equilibre hygroscopique du bois EH (%)	Gradient de séchage G
	sèche Ts (°C)	humide Th (°C)			
Vert	70	66,5	85	14,4	
35	70	66	83	13,6	
32	70	65	80	12,6	
30	70	62,5	70	10	3
28	75	66	65	8,7	3,2
25	75	64	60	7,8	3,2
20	75	59	47	6,1	3,3
15	80	58	35	4,5	3,3

2.3.2 Description du lot 1

Les caractéristiques du lot pour le premier cycle de séchage sont les suivantes :

Tableau 6. Mesures initiales de l'essai 1 : mesures sur les sciages

	Masse (kg)	Humidité (%) (selon mesure)	Flèche de face (mm)	Flèche de chant (mm)	Largeur de cernes (mm)
Moyenne	12,5	42,0	2,8	1,2	2,3
Ecart-type	1,0	10,4	1,8	1,3	0,9
Coeff. de variation	8%	17%	64%	108%	39%
Minimum	10,02	27	0	0	1,2
Maximum	15,08	53	7	8	5,6

Humidité mesurée avec les capteurs du séchoir : 75,3 % en moyenne (écart-type de 3,9 %)

Les bois du premier lot sont assez homogènes en masse, mais bien moins en humidité, ce qui représente une difficulté pour l'obtention d'un séchage homogène. Si les sciages présentent des déformations initiales, celles-ci restent minimales et sans conséquence.

Il est à prendre en compte cependant, qu'entre les mesures d'humidité à la réception des bois et le lancement de l'essai, les bois ont été mis sous arrosage pendant 4 semaines. L'humidité moyenne retenue est donc celle mesurée lors du lancement de l'essai de séchage soit 75,3 %.

Répartition des débits

Tableau 7. Mesures initiales de l'essai 1 : types de débit

Débit	Dosse	Faux-quartier	Quartier
Proportion du lot (%)	22	56	22
Présence de cœur (%)	0	27	100

Plus d'un tiers (37 %) des sciages ont du cœur inclus ce qui risque de favoriser l'apparition de gauchissement sur ces sciages.

2.3.3 Description de l'essai 1

Les sciages de l'essai 1 ont été séchés suivant la table ci-dessous.

Tableau 8. Table de séchage de l'essai 1

Phase	durée	Humidité du bois H% (%)	Températures (°C)		Humidité relative de l'air HR% (%)	Equilibre hygroscopique du bois EH% (%)	Gradient de séchage G
			sèche	humide			
Préchauffage1			70	66,9	87	15,0	
Préchauffage2	2h		70	67,5	89	16,0	
Séchage		> 50	70	64,7	78	12,0	
		50-40	70	63,9	75	11,2	2,7
		40-35	70	63,2	72	10,6	2,8
		35-30	70	62,5	70	10,0	3,0
		30-27	70	60,4	63	8,7	3,4
		27-24	75	64,1	60	7,9	3,4
		24-21	75	62	54	7,0	3,4
21-18	75	59	46	6,0	3,5		
Equilibrage	6h		70				

Le cycle 1 dispose d'une phase de réchauffage de 2h (Préchauffage 2), pendant laquelle le bois monte progressivement en température pour s'approcher de celle de l'air.

Le séchage se réalise à 70°C jusqu'au point de saturation des fibres (autour de 30 % d'humidité) avant d'être amené à 75°C dans les dernières étapes, lorsque l'eau demande plus d'énergie pour continuer à être extraite à la même vitesse. Le gradient de séchage est amené progressivement jusqu'à atteindre 3,4 au PSF, et reste constant durant le séchage (cette grandeur n'est pertinente qu'une fois le PSF atteint)

Suit une phase d'équilibrage de 6 heures, qui doit permettre d'homogénéiser l'humidité des sciages dans la pile.

2.3.4 Résultats

Durée de l'essai : 112 heures

Tableau 9. Mesures finales de l'essai 1 ; 1/2

	Masse (kg)	Humidité (%)	Flèche de face (mm)	Flèche de chant (mm)	Tuilage (mm)
Moyenne	10,4	17,9	3,0	2,6	0,4
Ecart-type	0,8	1,7	1,6	1,5	0,5
Coeff. de variation	8%	9%	53%	58%	125%
Minimum	9,06	15	0	0	0
Maximum	13,22	22,5	8	6	2

Les sciages sont, en sortie de séchoir, bien homogènes en humidité, ce qui indique un séchage réussi, avec un gradient d'humidité dans l'épaisseur de seulement 2,89 %.

Avec 100 % des sciages ayant une humidité finale comprise dans l'intervalle de tolérance autour de l'humidité cible définie par la norme NF EN 14298, la qualité du séchage est satisfaisante.

Les flèches et le tuilage des sciages ont des valeurs acceptables conformément à la norme sur le marquage CE.

Tableau 10. Mesures finales de l'essai 1 ; 2/2

	Fentes de surface	Collapses	Fentes internes	Gauchissement
Pourcentage du lot touché	96%	0%	0%	26%

Les bois apparaissent fendus en surface, ce qui n'est pas gênant pour leur mise en œuvre. On notera l'absence de collapses et de fentes internes.

Un quart des sciages présente du gauchissement. Le pin d'Alep semble être un bois assez nerveux.

Consommation énergétique :

- Thermique : 604,2 kWh, soit 1,59 kWh par kg d'eau extraite,
- Electrique : 174 kWh.
- "Electrique" : préciser ce que cela englobe (car le thermique est apporté par des générateurs électrique dans notre séchoir pilote et cela peut prêter à confusion...)

2.3.5 Conclusions de l'essai 1

Si ce séchage est satisfaisant d'un point de vue qualitatif, il est surement possible de réduire la durée totale du cycle afin de diminuer le coût associé à l'utilisation du matériel.

Les bons résultats en termes d'humidité et de déformations indiquent que l'on a une marge pour « durcir » les conditions de séchage, par une augmentation soit de la température soit du gradient du séchage.

Nous allons donc pour l'essai 2 augmenter la température, pour tenter de réduire la durée du cycle.

2.4 Essai 2

2.4.1 Description du lot 2

Pour ce deuxième essai de séchage, nous avons utilisé 72 sciages, qui n'ont pas été stockés dans les mêmes conditions que le lot 1. Ils ont été conservés en chambre froide, avant séchage.

Tableau 11. Mesures initiales de l'essai 2 ; 1/2

	Masse (kg)	Humidité (%)	Flèche de face (mm)	Flèche de chant (mm)	Largeur de cernes (mm)
Moyenne	12,6	41,8	2,8	1,6	1,7
Ecart-type	1,1	11,8	2,3	1,6	1,1
Coeff. de variation	9%	28%	82%	100%	65%
Minimum	10,66	24	0	0	1,1
Maximum	14,58	68	11	8	4,8

Humidité selon séchoir (24 mesures) : 46,4 % en moyenne, avec écart-type de 13,6 %

Tableau 12. Mesures initiales de l'essai 2 ; 2/2

Débit	Dosse (%)	Faux-quartier (%)	Quartier (%)
Proportion du lot	36	44	20
Présence de cœur (%)	4	39	93

Comme pour l'essai 1, un peu plus d'un tiers (36 %) des sciages ont du cœur inclus.

2.4.2 Description de l'essai 2

La table de séchage a été adaptée, avec une augmentation de la température à 75°C pendant toute la durée du cycle. La phase de préchauffage a été allongée à 10h, de même que celle d'équilibrage, afin de maintenir une bonne homogénéité de l'humidité et compenser l'augmentation de température qui doit accélérer le séchage.

Tableau 13. Table de séchage de l'essai 2

Phase	durée	Humidité du bois H% (%)	Températures (°C)		Humidité relative de l'air HR% (%)	Equilibre hygroscopique du bois EH% (%)	Gradient de séchage G
			sèche	humide			
Préchauffage1			70	66,9	87	15,0	
Préchauffage2	10h		75	66,9	87	15,0	
Séchage		> 50	75	69,9	79	12,0	
		50-40	75	69,1	77	11,2	2,7
		40-35	75	68,5	74	10,6	2,8
		35-30	75	67,7	70	10,0	3,0
		30-27	75	65,4	65	8,7	3,4
		27-24	75	64,1	60	7,9	3,4
		24-21	75	62	54	7,0	3,4
21-18	75	59	46	6,0	3,5		
Equilibrage	10h		70				

2.4.3 Résultats

Durée de l'essai : 67 heures

Tableau 14. Mesures finales de l'essai 2 ; 1/2

	Masse (kg)	Humidité (%)	Flèche de face (mm)	Flèche de chant (mm)	Tuilage (mm)
Moyenne	10,6	19,7	3,3	2,7	0,3
Ecart-type	0,8	2,1	1,7	1,5	0,5
Coeff. de variation	8%	11%	52%	56%	167%
Minimum	9,24	16,6	0	0	0
Maximum	12,98	26,2	10	8	2

Gradient dans l'épaisseur en moyenne : 3,64 %

Avec 91 % des sciages ayant une humidité comprise dans l'intervalle de tolérance autour de l'humidité cible de 18 %, la qualité du séchage est légèrement en dessous du seuil de la norme NF EN 14298 sur la qualité du séchage.

Tableau 15. Mesures finales de l'essai 2 ; 2/2

	Fentes de surface	Collapses	Fentes internes	Gauchissement
Pourcentage du lot touché	97%	0%	0%	33%

Le pin d'Alep semble être un bois qui se fend facilement en surface, mais qui n'est pas sujet aux collapses et fentes internes en séchage artificiel, ce qui est un bon signe pour l'industrialisation de son séchage.

Consommation énergétique :

Thermique : 297,7 kWh, soit 1,77 kWh/kg d'eau extraite

Electrique : 105 kWh

2.4.4 Conclusions de l'essai 2

L'essai 2 confirme le bon comportement du bois en termes de déformations à des températures hautes, mais il révèle aussi l'importance de le laisser s'homogénéiser, sous peine d'avoir un lot qui risque de ne pas être conforme aux exigences.

Pour améliorer les résultats, on peut envisager un essai à des températures encore plus hautes, mais en réduisant le gradient de séchage, pour compenser le gain de vitesse qui serait trop élevée.

2.5 Essai 3

2.5.1 Description du lot 3

Le lot est assez semblable aux précédents en termes de déformations et de débit, et a une humidité initiale sensiblement égale au lot 2, ayant suivi le même stockage en chambre froide pour la conservation avant le séchage.

Tableau 16. Mesures initiales de l'essai 3 ; 1/2

	Masse (kg)	Humidité (%)	Flèche de face (mm)	Flèche de chant (mm)	Largeur de cernes (mm)
Moyenne	12,3	38,8	2,2	1,6	2,5
Ecart-type	0,9	9,3	2,0	1,5	0,9
Coeff. de variation	7%	24%	91%	94%	36%
Minimum	10,8	21	0	0	1,5
Maximum	15,02	57	10	5	5,5

Humidité selon séchoir : 43,5 % (écart-type de 8 %)

Tableau 17. Mesures initiales de l'essai 3 ; 2/2

Débit	Dosse (%)	Faux-quartier (%)	Quartier (%)
Proportion du lot	29	49	22
Dont cœur	5	39	91

Pour cet essai, 41 % des sciages ont du cœur inclus.

2.5.2 Description de l'essai 3

Compte tenu de la qualité de séchage légèrement inférieure à la norme NF EN 14298, nous avons choisi de maintenir la température de séchage mais de réduire le gradient, c'est-à-dire la dureté du séchage dans le but de réduire les déformations et améliorer l'homogénéité du séchage tout en gardant une durée de cycle courte.

L'essai 3 a donc été réalisé en utilisant la table de séchage suivante.

Tableau 18. Table de séchage de l'essai 3

Phase	durée	Humidité du bois H% (%)	Températures (°C)		Humidité relative de l'air HR% (%)	Equilibre hygroscopique du bois EH% (%)	Gradient de séchage G
			sèche	humide			
Préchauffage1			75	72	88	15,0	
Préchauffage2	15h		80	66,9	87	20,0	
Séchage		> 50	75	71,2	79	13,7	
		50-40	75	70,6	82	12,8	2,3
		40-35	75	70	80	12,1	2,5
		35-30	75	69,5	78	11,6	2,6
		30-27	75	67,8	72	10,1	3,0
		27-24	80	71,6	69	9,1	3,0
		24-21	80	69,7	63	8,0	3,0
21-18	80	67	56	6,9	3,0		
Equilibrage	15h		80				

2.5.3 Résultats

Durée de l'essai : 134 heures

Tableau 19. Mesures finales de l'essai 3 ; 1/2

	Masse (kg)	Humidité (%)	Flèche de face (mm)	Flèche de chant (mm)	Tuilage (mm)
Moyenne	10,4	16,9	3,5	3,1	0,6
Ecart-type	0,8	1,4	1,8	1,5	0,6
Coeff. de variation	8%	8%	51%	48%	100%
Minimum	8,22	14,4	1	1	0
Maximum	12,84	39	10	9	2

Gradient dans l'épaisseur : 3,2%

Avec 97,4 % des sciages ayant une humidité finale comprise dans l'intervalle de tolérance autour de l'humidité cible définie par la norme NF EN 14298, la qualité du séchage est satisfaisante.

Tableau 20. Mesures finales de l'essai 3 ; 2/2

	Fentes de surface	Collapses	Fentes internes	Gauchissement
Pourcentage du lot touché	100%	0%	0%	50%

Consommation énergétique :

Thermique : 409,6 kWh soit 2,74 kWh/kg d'eau extraite.

Electrique : 205 kWh

2.5.4 Conclusion de l'essai 3

Le cycle 3 a subi un aléa de la régulation provoquant une mesure anormalement élevée de l'humidité des bois. Cela a eu pour conséquence de ralentir drastiquement le séchage ce qui explique la durée très longue de ce cycle en comparaison aux autres cycles. Cela induit aussi une consommation d'énergie plus importante que nécessaire.

La qualité du séchage en termes d'humidité est satisfaisante mais les sciages apparaissent globalement plus déformés. La température plus élevée a amplifié la nervosité du bois malgré un gradient de séchage abaissé.

2.6 Conclusions et préconisations

Le tableau ci-dessous récapitule les résultats obtenus lors des trois essais de séchage réalisés en laboratoire

Tableau 21: récapitulatif des résultats des essais de séchage

		Essai 1	Essai 2	Essai 3
Conditions de séchage	Température (°C)	70	75	80
	Gradient de séchage	3,4	3,4	3
	Durée du cycle (h)	112	67	134
Conditions initiales	Masse moyenne (kg)	12,5	12,6	12,3
	Humidité moyenne à la réception (%)	42	41,8	38,8
	Humidité moyenne selon séchoir (%)	75,3	46,4	43,5
	Largeur de cernes moyenne (mm)	2,3	1,7	2,5
	Flèche de face moyenne (mm)	2,8	1,6	2,2
	Flèche de chant moyenne (mm)	1,2	1,7	1,6
Conditions finales	Masse moyenne (kg)	10,4	10,6	10,4
	Humidité moyenne mesurée (%)	17,9	19,7	16,9
	Gradient d'humidité dans l'épaisseur (% d'humidité)	2,89	3,64	3,84
	Flèche de face moyenne (mm)	3	3,3	3,5
	Flèche de chant moyenne (mm)	2,6	2,7	3,1
	Tuilage (mm)	0,4	0,3	0,6
	Fentes de surface (% des échantillons)	96	97	100
	Collapses (% des échantillons)	0	0	0
	Fentes internes (% des échantillons)	0	0	0
	Gauchissement (% des échantillons)	26	33	50
	Consommation thermique (kWh par kg d'eau extraite du bois)	1,59	1,77	2,74
	Masse d'eau évaporée du bois (kg)	380	168,2	149,5
	Consommation énergétique totale (thermique et électrique) (kWh)	777,8	402,714	614,63

Le pin d'Alep est une essence qui sèche rapidement à des températures de 70 à 75°C. C'est une essence qui n'a pas montré de sensibilité aux collapsés ou aux fentes internes. Les fentes de surface observées sur les sciages ne présentent pas de frein à son utilisation si ce n'est pour des emplois esthétiques, mais le cas échéant, les conditions de séchage devront être adaptées pour limiter leurs apparitions.

Il convient d'ajouter que le pin d'Alep est un bois sensible aux déformations et particulièrement au gauchissement, même si elles restent dans les limites des tolérances de la norme du marquage CE. L'usage de trop forte température peut accentuer cette caractéristique si elle est couplée à un déficit d'humidification.

Comme pour toutes les essences, si l'on souhaite obtenir un lot homogène en humidité, une phase de stabilisation est nécessaire en fin de cycle.

C'est donc dans ce cadre et au vu de ces résultats que nous recommandons une table de séchage proche de la table de l'essai 2 employée lors de ces essais, avec un gradient de séchage réduit à 3.

La table de séchage ci-dessous est celle que nous préconisons suite aux résultats de ces essais pour le séchage du pin d'Alep

Tableau 22: table de séchage du pin d'Alep (épaisseur 50-70mm)

Phase	durée	Humidité du bois H% (%)	Températures (°C)		Humidité relative de l'air HR% (%)	Equilibre hygroscopique du bois EH% (%)	Gradient de séchage G
			sèche	humide			
Préchauffage1			75	72	88	15,0	
Préchauffage2	10h		75	72	88	15,0	
Séchage		> 50	75	69,9	79	12,0	
		50-40	75	68,9	76	11,0	2,7
		40-35	75	67,7	71,7	10,0	3,0
		35-30	75	67,7	71,7	10,0	3,0
		30-27	75	66,2	66,7	9,0	3,0
		27-24	75	64,4	61	8,0	3,0
		24-21	75	62	54,2	7,0	3,0
		21-18	75	59	46,4	6,0	3,0
Equilibrage	10h		75	72	88	15	

3. Première approche économique

Cette première approche économique a pour objectif de donner aux industriels qui souhaiteraient proposer des sciages de pin d'Alep séché artificiellement, une évaluation du coût de revient du séchage. Cette évaluation est réalisée sur la base des résultats obtenus lors des essais de séchage en laboratoire, notamment en termes d'humidité initiale des sciages, de durée de séchage et de consommation d'énergie.

Les hypothèses de calcul, notamment les données concernant les coûts d'investissement, financier ou de manutention sont représentatives de la réalité, validées récemment avec différents acteurs industriels.

3.1 Scénario de travail.

Le scénario de travail retenu est celui du séchage d'avivés de Pin d'Alep en section 50 x 140 mm avec une humidité cible de 18 %. Cette section et cette humidité ont été choisies pour une valorisation du pin d'Alep dans le secteur de la construction. Le procédé de séchage retenu est le séchage dit traditionnel, c'est-à-dire à Air Chaud Climatisé (ACC). Il est le procédé de séchage le plus répandu. Deux hypothèses de production sont évaluées : celle d'une production annuelle de 2 600 m³ séchée obtenue avec un séchoir de 50 m³ alimenté par un brûleur direct au gaz ; l'autre est la production annuelle de 12 740 m³ séché, obtenue avec un parc de 4 séchoirs de 60 m³ alimentés par une chaudière biomasse de 1,3 mégawatt.

3.2 Hypothèses de calcul

Le tableau ci-après présente les hypothèses de calcul retenues pour l'évaluation du coût de revient du séchage suivant le scénario de travail ci-dessus.

Tableau 23 : Hypothèses de calcul

Postes de dépenses	Coût	Unités
Energie		
• Biomasse humide	0,0125	€HT/kWh
• GPL	0,10	
• Electricité	0,085	
Personnel (charges incluses) Cariste et surveillance (séchoirs et chaudière)	22	€HT/h
Moyen de manutention		
• Coût d'utilisation d'un chariot élévateur	9	€HT/h
• Temps de manutention (chargement et déchargement)	12	min/m ³ de sciage
Temps de surveillance		
• Séchoirs	10	Min/jour
• Chaudière	171	Heures/an
Assurances (séchoir et chaudière)	0,4	%/an sur la valeur des investissements
Taxes diverses	1,15	%/an sur la valeur des investissements
Entretien annuel		
• Séchoirs	1	%/an sur la valeur des investissements
• Chaudière	2	
Frais financiers		
• Part d'auto financement	20%	Ans
• Taux d'emprunt	4,5%	
• Durée d'emprunt	7	
Amortissements (durée)		
• Séchoirs	7	Ans
• Chaudière bois	10	Ans
Temps de fonctionnement annuel		
• Séchoir	11 24	Mois/an Jours/mois selon la durée de cycle
Installation de séchage		
Séchoir ACC avec Brûleur direct au gaz	1 séchoir de 50 m ³	
Séchoirs ACC avec chaudière biomasse	4 séchoirs de 60 m ³ Chaudière biomasse de 1,3MW	

3.3 Calcul du coût de revient du séchage

Le calcul du coût de revient du séchage du pin d'Alep est réalisé sur la base, d'une part d'un séchoir de 50 m³ équipé d'un brûleur direct au gaz, et d'autre part d'un parc de 4 séchoirs de 60 m³ alimentés avec une chaudière biomasse. Le tableau ci-après présente les données de fonctionnement réelles des séchoirs, sur la base des recommandations en termes de lattage et de durée de cycle pour aboutir à une qualité de séchage permettant une utilisation des sciages en construction. La consommation spécifique retenue est de 1,77 kWh/kg d'eau évacuée, correspondant à la consommation du cycle 2 des essais de séchage.

Le montant des investissements (génie civil et raccordement électrique compris) est pris pour une valeur de 85 000 € HT pour le séchoir brûleur direct au gaz de 50 m³ et de 880 000 € HT pour le parc de 4 séchoirs alimentés par la chaudière biomasse.

Tableau 24 : coût de revient du séchage du pin d'Alep

Procédé	Air chaud climatisé	
	1 cellule 50 m ³	4 cellules 60 m ³
Installation		
Chauffage	Brûleur direct au gaz	Chaudière biomasse 1,3 MW
Section des sciages (mm)	50 * 140	
Humidité initiale (%)	50	
Humidité finale (%)	18	
Durée de cycle (jours)	4,5	
Consommation spécifique (kWh/kg d'eau évacuée)	1,77	
Epaisseur des lattes (mm)	27	
Temps de fonctionnement		
mois/an	11	
jours/mois	24	
Soit jours/an	264	
Production /an/cellule (m³)	2 600	3 060
Production /an/installation (m³)	2 600	12 240
Coût de revient (€HT/m³)	43,2	24,3
Répartition du coût de revient par poste de charge		
Charges variables (%)	86	51
Charges fixes (%)	14	49

Le coût de revient du séchage est dépendant de la source d'énergie thermique utilisée. Dans le cas du séchage avec brûleur direct au gaz, le coût de l'énergie thermique représente 64 % du coût de revient du séchage alors qu'elle ne représente que 14 % du coût de revient dans le cas d'un séchage avec chaudière biomasse. A l'inverse, la part des amortissements matériels est bien plus faible dans le cas du brûleur direct au gaz que dans le cas de la chaudière biomasse avec respectivement 10 % et 35 % du coût de revient lié aux amortissements.

Une sous-utilisation de l'équipement avec un volume séché inférieur aux prévisions impactera plus fortement le coût de revient dans le cas d'une installation avec chaudière biomasse que dans le cas d'un brûleur direct au gaz.

Cette approche de coût doit permettre à un industriel d'évaluer la rentabilité d'une installation en fonction du prix de vente du séchage.

4. Conclusion

Cette étude a permis d'établir les règles de base du séchage du pin d'Alep et d'apporter les premiers éléments technico-économiques.

Le pin d'Alep est une essence qui peut se sécher à des températures autour de 70°C sans risques majeurs de déformations, néanmoins, le pin d'Alep semble être un bois « nerveux » pour lequel une trop haute température associée à un gradient de séchage important peut générer des déformations et un gauchissement susceptibles de gêner sa mise en œuvre. Il conviendra donc de ne pas travailler à des températures supérieures à 75°C au risque de ne pas pouvoir utiliser les sciages pour les applications souhaitées.

Phase	durée	Humidité du bois H% (%)	Températures (°C)		Humidité relative de l'air HR% (%)	Equilibre hygroscopique du bois EH% (%)	Gradient de séchage G
			sèche	humide			
Préchauffage1			75	72	88	15,0	
Préchauffage2	10h		75	72	88	15,0	
Séchage		> 50	75	69,9	79	12,0	
		50-40	75	68,9	76	11,0	2,7
		40-35	75	67,7	71,7	10,0	3,0
		35-30	75	67,7	71,7	10,0	3,0
		30-27	75	66,2	66,7	9,0	3,0
		27-24	75	64,4	61	8,0	3,0
		24-21	75	62	54,2	7,0	3,0
21-18	75	59	46,4	6,0	3,0		
Equilibrage	10h		75	72	88	15	

Comme pour les autres résineux, l'extraction de l'eau est assez rapide et les temps de séchage relativement courts.

L'évaluation du coût de revient montre que en fonction de la taille des installations et de la source d'énergie thermique, le coût de revient du séchage est compris entre 24 € HT/m³ et plus de 40 € HT/m³. Il sera donc nécessaire de bien évaluer le prix de vente du séchage et la rentabilité prévisionnelle de l'installation avant de faire un investissement.

Glossaire

COLLAPSE

Effondrement cellulaire sous l'effet de la pression capillaire

EQUILIBRE HYGROSCOPIQUE DU BOIS

Humidité vers laquelle tend un échantillon de bois lorsqu'il est placé dans des conditions de température et d'humidité relative de l'air maintenues constantes.

GRADIENT DE SECHAGE

Rapport entre l'humidité du bois à un instant donné et l'équilibre hygroscopique du bois correspondant aux conditions de l'air à ce même moment.

HUMIDITE DU BOIS

Rapport entre la masse d'eau contenue dans le bois et la masse anhydre.

HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR

Rapport entre la pression de vapeur existante à une température donnée et la pression de vapeur saturante à la même température.

PERIODE D'EQUILIBRAGE

Dans un cycle de séchage, période destinée à rendre homogène la répartition de l'humidité du bois dans l'épaisseur.

POINT DE SATURATION DES FIBRES

Humidité du bois lorsque toute l'eau libre a été évacuée et où il reste encore toute l'eau liée. Les parois cellulaires sont encore "saturées" d'humidité. C'est aussi l'humidité du bois en dessous de laquelle les variations d'humidité du bois sont accompagnées de variations dimensionnelles.

TEMPERATURE HUMIDE

Température lue sur un thermomètre dont le bulbe est recouvert d'une gaze imbibée d'eau liquide.

TEMPERATURE SECHE

Température lue sur un thermomètre dont le bulbe est maintenu sec, non recouvert d'un tissu humide.