

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

➤ Contact SCD Nancy 1 : theses.sciences@scd.uhp-nancy.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

École Doctorale Sciences et Ingénierie Ressources Procédés Produits Environnement

THESE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ HENRI POINCARÉ NANCY 1

Spécialité : Sciences du bois et des fibres

Par

Johann AST



**ÉTUDE DE L'EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES
PLAQUETTES FORESTIERES EN FONCTION DES MODALITES DE STOCKAGE
ET DE SECHAGE**



Soutenue publiquement le 09/12/2009, devant le jury composé de :

Rapporteurs :

Whabi Jomaa, Professeur, Université Bordeaux 1, Talence

Patrick Rousseaux, Professeur, Université de Poitiers, Futuroscope

Examineurs :

André Zoulalian, Professeur émérite, Université Henri Poincaré, Nancy (directeur de thèse)

Yann Rogaume, Professeur, Université Henri Poincaré, Épinal (co-directeur de thèse), Président

Caroline Rantien, Ingénieur, ADEME, Angers

Alain Jacquet, Directeur général de Forêts et Bois de l'Est, Épinal



**DRAAF
Lorraine**



Résumé

Titre : Étude de l'évolution des caractéristiques physico-chimiques des plaquettes forestières en fonction des modalités de stockage et de séchage.

Résumé : Pour répondre aux enjeux énergétiques et environnementaux actuels et à venir, le développement du bois est très important, notamment avec des applications aux niveaux industriels et collectifs. Pour répondre à ces besoins et accompagner ce développement, de nombreuses structures d'approvisionnement en plaquettes forestières se mettent en place. La principale difficulté pour ces structures est de garantir une qualité de combustible sûre et constante au cours du temps, notamment en ce qui concerne l'humidité. L'objectif de ce travail de thèse est de rechercher les solutions les plus appropriées pour répondre à cette attente. Ainsi, le travail débute par l'étude bibliographique et la compréhension des systèmes de séchage existants ; le séchage peut se dérouler de manière naturelle (sous bâche, sous abri, ...) ou bien artificielle (séchoir tunnel, séchoir rotatif, ...). Dans un second temps, des essais ont été mis en place pour comprendre et quantifier précisément l'impact des paramètres influents sur le séchage naturel des plaquettes forestières et les modifications physico-chimiques se produisant lors du stockage des plaquettes forestières. Dans un troisième temps, des modèles mathématiques permettant de traduire le comportement des plaquettes forestières au cours du séchage seront proposés et comparés aux résultats des essais. Enfin, le dernier volet consiste en l'élaboration de scénarios technico-économiques permettant d'étudier les différentes solutions ou combinaisons de solutions de séchage pour aboutir à la qualité de combustible souhaitée.

Mots clés : bois énergie, plaquettes forestières, séchage naturel, séchage artificiel.

Summary

Title: Wood chips' physico-chemical evolution study functions of storage and drying modalities.

Summary: To answer actual and future energetic and environmental issues, wood development is very important, notably with industrial and collective applications. To answer these needs and follow this development, lots of supplying structures of wood chips are being created. The main difficulty for these companies is guaranty good and stable raw material quality all time, notably concerning moisture content. The objective of this work is to research the most appropriate solutions to answer this problematic. So, the work begins by a bibliographical study that will help to understand the existing systems of drying; drying can be natural (under layer, under shelter ...) or artificial (tunnel dryer, rotary dryer ...). Then, experiments were put in place to understand and quantify more precisely natural drying parameters impact on wood chips and physico-chemical modifications on wood chips during storage. After, mathematic models are developed to traduce wood chip drying comportment, after models results are compared to experimental results. Finally, economical scenarios were performed to study the different solutions or combinations of solutions to dry wood chips in order to answer technical and economical industrial needs.

Keywords: wood energy, wood chips, natural drying, artificial drying.

Thèse préparée au sein de la composante ENSTIB du LERMAB

Adresse : ENSTIB
 27, rue du Merle Blanc
 BP 1041
 88051 EPINAL Cedex 9
 FRANCE

Entre ce que je pense,
Ce que je veux dire,
Ce que je crois dire,
Ce que je dis,
Ce que vous avez envie d'entendre,
Ce que vous entendez,
Ce que vous comprenez...
Il y a dix possibilités qu'on ait des difficultés à communiquer.
Mais essayons quand même...

Bernard Werber

La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne.
La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi.
Quand la pratique et la théorie sont réunies, rien ne fonctionne et personne ne sait pourquoi.

Albert Einstein

Remerciements

Merci d'abord aux personnes qui ont supervisé mon travail, me laissant tout au long de cette thèse une grande et constructive liberté d'action et d'options.

A Yann Rogaume pour avoir initié, suivi, lu et discuté ce travail. Le bon déroulement de cette thèse lui revient en premier lieu.

A André Zoulalian pour le soutien, les discussions, les nombreuses connaissances et l'énorme expérience apportée tout au long de ces trois ans.

Je souhaite ici remercier Whabi Jomaa et Patrick Rousseaux pour tout d'abord avoir accepté d'être rapporteurs mais aussi pour l'intérêt certain qu'ils ont manifestés.

Merci à l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie), le Conseil Général des Vosges, le Conseil Régional de Lorraine, la DRAAF Lorraine (Direction Régionale de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Forêt) et FBE (Forêts et Bois de l'Est) qui ont financé cette thèse.

A l'ADEME, je souhaite en priorité remercier Caroline Rantien qui était en charge du suivi de ma thèse ainsi que les personnes ayant géré mon dossier.

Chez FBE, merci à Alain Jacquet, Damien François, Benoît Fritch et Jérôme Klotz pour leur disponibilité et leur aide.

Merci à Fabrice Vaxelaire pour sa disponibilité, son aide et pour avoir mis à ma disposition des tas de plaquettes forestières.

Merci également à Philippe Goupil de ONF Énergie pour les informations échangées et nos discussions fructueuses.

Merci à M. Sangouard pour son accueil et le temps accordé lors de mes expériences au sein de la ferme du lycée agricole de Mirecourt.

Merci également à Az-Eddine Khalfi de EDF R&D et Florian Castagno de EIFER qui, lors de nos collaborations m'ont apporté de nombreux conseils.

Je souhaite également remercier le directeur de l'ENSTIB, M. Triboulot ainsi que le directeur du LERMAB, M. Merlin pour m'avoir accueilli dans les locaux.

Un grand merci au personnel technique de l'ENSTIB pour leur soutien et plus particulièrement à Stéphane Aubert pour ses conseils avisés et ses idées lors de la mise au point du système de mesure.

Merci à Éric Mougel et Caroline Rogau pour les renseignements en tout genre qu'ils m'ont apportés.

Un grand merci à Jacques Sourdou qui m'a apporté beaucoup dans la phase d'étude économique.

Dans l'ordre chronologique, merci à Bajil Ouartassi du LERMAB à Nancy, Mourad Khelifa de l'ENSTIB et Olivier Authier du LSGC qui m'ont beaucoup apporté dans le cadre de la modélisation.

Merci à Eric Masson, Anthony Dufour, Pierre Girods et Jérôme Lemonon pour leur savoir faire et leur aide dans la partie d'analyse des gaz.

Merci également à Claude, Gilles et Pierre pour l'ambiance et la bonne humeur quand ils ne sont pas en expérience mais dans le bureau.

Merci à Rémi, Rami, Alex et Sana pour les longues pauses déjeuner.

Merci à tous les thésards et stagiaires sur le site d'Épinal.

Merci au personnel administratif et plus particulièrement à Françoise et Anne-marie pour leur réactivité.

Un grand merci à Béatrice et Annie du centre de documentation pour leur efficacité pour trouver l'introuvable, pour les discussions et tout le reste. Et encore, « merci Annie » pour la bouteille.

Merci à Véro, David et Salomé pour ces six ans de bons moments passés ensemble.

Un grand merci à mes parents et beaux-parents pour leur soutien, même s'il faut éviter de demander à un thésard : « Alors ta thèse, ça avance ? ».

Merci à Guillaume, Richard, Eulalie et Fred pour leur soutien. Merci à Josette, Jean-Louis (x2) et Annie pour l'accueil chaque été ... des moments à ne pas oublier.

Merci à Bahia pour son énergie et merci aussi à mes deux autres boules de poils.

Enfin, merci à ma femme, Julie, pour son soutien constant, son aide (dans la relecture de mes rapports entre autres), merci tout simplement.

Sommaire

Table des illustrations.....	15
Table des tableaux.....	19
Notations	21
Introduction	25
Chapitre I : Analyse bibliographique	29
1 Contexte et généralités	29
1.1 Biomasses et valorisations	29
1.2 Intérêts de la biomasse face à l'effet de serre.....	30
1.3 La production de plaquettes forestières.....	32
1.4 Utilisations du bois énergie.....	33
1.5 Le prix des différents types de biomasses.....	35
1.6 Caractéristiques du bois	37
1.6.1 Structure anatomique.....	37
1.6.2 Structure chimique	38
1.6.3 L'eau dans le bois.....	40
1.6.4 Masse volumique.....	42
1.6.5 Granulométrie.....	43
1.6.6 Pouvoir calorifique.....	44
2 Mesure de l'humidité dans le bois.....	45
2.1 Méthode conventionnelle	45
2.2 Méthodes de mesures en continu	46
2.2.1 Méthode par mesure de rayons X.....	46
2.2.2 Méthode par spectroscopie proche infrarouge	46
2.2.3 Méthode de mesure par radiofréquence	47
2.2.4 Méthode de mesure par spectroscopie à résonance magnétique nucléaire	47
2.2.5 Méthode par mesure de la capacitance.....	48
2.2.6 Méthode par mesure de résistivité.....	48
3 Analyse des procédés de séchage naturel et artificiel de la biomasse.....	49
3.1 Le séchage naturel des plaquettes forestières.....	49
3.1.1 Le phénomène d'échauffement - généralités	49
3.1.2 Le phénomène d'échauffement - les réactions.....	53
3.1.3 Le phénomène d'échauffement - interprétations du point de vue microbiologique	54
3.1.4 Modifications chimiques du bois et perte de masse sèche.....	57
3.1.5 Émissions gazeuses lors du séchage en tas	59
3.1.6 Différentes possibilités de séchage naturel	60
3.1.7 Caractéristiques techniques du séchage naturel	60
3.1.8 Avantages, inconvénients et risques du séchage naturel.....	61

3.2	Le séchage artificiel des plaquettes forestières	61
3.2.1	Séchoir tunnel.....	62
3.2.2	Séchoir à tambour rotatif.....	64
3.2.3	Séchage « en lit fixe »	67
4	Modélisation du séchage du bois	68
4.1	Bilans de matière et d'énergie.....	69
4.2	Équilibre hygroscopique du bois.....	70
4.3	Coefficient global de transfert.....	71
4.4	Perte de masse sèche de plaquettes forestières au cours du stockage	72
5	Conclusion.....	73
	Objectifs et déroulement de la thèse	75
	Chapitre II : Matériels et méthodes	77
1	Mesure de l'humidité dans le bois.....	77
1.1	Cahier des charges.....	77
1.2	Essais préliminaires.....	78
1.3	Système de mesure développé.....	80
1.3.1	Principe du pont de Wheatstone.....	80
1.3.2	Matériel utilisé et réglage du pont.....	81
1.4	Essais réalisés	83
1.5	Remarques	87
2	Mesure des températures.....	88
3	Dispositif d'acquisition des données.....	89
4	Mesure de répartition granulométrique	92
5	Qualification des gaz effluents	94
6	Mode opératoire	96
7	Conclusion.....	98
	Chapitre III : Résultats et discussion.....	101
1	Essais préliminaires concernant les modes de stockage.....	101
2	Paramètres du séchage en tas	103
3	Essais réalisés	105
3.1	Essai 1	105
3.2	Essai 2	107
3.3	Essai 3	108
3.4	Essai 4	113
3.5	Essai 5	117
3.6	Essai 6	120
4	Analyse des gaz effluents.....	123
5	Discussion	125
5.1	Synthèse des informations expérimentales	125
5.2	Quantification de l'influence des paramètres opératoires sur le séchage en tas ...	129
5.2.1	Influence des principaux paramètres.....	131
5.2.2	Influence du type de stockage	134
5.2.3	Influence de la saison de stockage	135
6	Conclusion.....	137

Chapitre IV : Modélisation du séchage des plaquettes forestières.....	139
1 Détermination du coefficient de transfert global.....	140
1.1 Objectif et protocole.....	140
1.2 Résultats	140
1.3 Coefficients globaux de transfert	141
2 Modélisation du séchage en lit fixe mobile à contre-courant.....	146
2.1 Modèle simplifié	146
2.2 Modèle plus complet	149
2.3 Comparaison entre les deux modèles	151
3 Modélisation du séchage naturel en tas.....	155
3.1 Modèle mathématique à une dimension.....	155
3.2 Résolution du modèle.....	160
3.3 Discussion	167
4 Conclusion.....	168
 Chapitre V : Bilan technico-économique du séchage des plaquettes forestières	 169
1 Hypothèses	169
1.1 Taille du projet et coût salariaux	170
1.2 Coût du matériel et des séchoirs.....	171
1.3 Caractéristiques physiques des plaquettes forestières	172
1.4 Coûts liés à l'immobilier	173
2 Méthode de calcul	175
2.1 Calcul du débit théorique de plaquettes forestières humides	175
2.2 Séchage naturel	176
2.3 Séchage artificiel	176
2.4 Coûts liés à l'immobilier	177
2.5 Calcul de rentabilité	177
3 Résultats pour les simulations étudiées	180
3.1 Séchage de plaquettes forestières de 50% d'humidité sur brut à 30% sur brut	180
3.2 Séchage de plaquettes forestières de 50 % à 10% d'humidité sur brut.....	183
4 Prix de vente minimal en fonction du procédé.....	186
5 Discussion	189
6 Conclusion.....	191
 Conclusion générale	 193
 Bibliographie.....	 197
 Annexe 1	 203
 Annexe 2	 207

Table des illustrations

<i>Figure 1 : Évolution de l'accroissement annuel et du prélèvement de bois en France entre 1989 et 2004</i>	25
<i>Figure 2 : Cycle du carbone du point de vue du bois</i>	30
<i>Figure 3 : Bilan sur l'effet de serre des différents types de chauffage collectif</i>	31
<i>Figure 4 : Bilan sur l'effet de serre des différents types de chauffage domestiques</i>	31
<i>Figure 5 : Étapes de la production des plaquettes forestières</i>	32
<i>Figure 6 : Part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie primaire</i>	34
<i>Figure 7 : Ordres de grandeur des coûts des différentes énergies</i>	35
<i>Figure 8 : Puissance du parc des chaufferies collectives</i>	36
<i>Figure 9 : Schéma général des constituants chimiques du bois [15]</i>	38
<i>Figure 10 : Biosynthèse générale des terpenoïdes</i>	40
<i>Figure 11 : PCI moyens pour les résineux et les feuillus en fonction de l'humidité</i>	45
<i>Figure 12 : Relation entre la température de surface et le rayon critique pour l'auto-inflammation [25]</i>	50
<i>Figure 13 : Proportion de taille de cœur d'un tas en fonction de sa hauteur</i>	52
<i>Figure 14 : Allure de la zone humide dans un tas de plaquettes forestières stockées à l'air libre</i>	52
<i>Figure 15 : Allure de la zone humide dans un tas de plaquettes forestières stockées sous abris</i>	53
<i>Figure 16 : Voies cataboliques possibles d'utilisation du glucose chez les cellules végétales capables de respiration et de fermentation</i>	56
<i>Figure 17 : Séchoir tunnel à une passe, un étage</i>	63
<i>Figure 18 : Séchoir rotatif direct à co-courant</i>	65
<i>Figure 19 : Séchage en lit fixe</i>	67
<i>Figure 20 : Résistance électrique du pin blanc en fonction de l'humidité sur brut</i>	78
<i>Figure 21 : Essai préliminaire de mesure de résistance électrique</i>	79
<i>Figure 22 : Pont de Wheatstone</i>	80
<i>Figure 23 : Résistance électrique (calculée) en fonction de la tension mesurée</i>	82
<i>Figure 24 : Module contenant 2 ponts de Wheatstone</i>	82
<i>Figure 25 : Allure des éprouvettes utilisées</i>	83
<i>Figure 26 : Résistance électrique d'échantillons en bois de Sapin en fonction de l'humidité sur brut</i>	84
<i>Figure 27 : Résistance électrique d'échantillons en bois d'Épicéa en fonction de l'humidité sur brut</i>	85
<i>Figure 28 : Conductance d'échantillons en bois de sapin en fonction de l'humidité sur brut</i>	86
<i>Figure 29 : Conductance d'échantillons en bois d'Épicéa en fonction de l'humidité sur brut</i>	86
<i>Figure 30 : Pointes en cuivre après séchage en tas de plaquettes forestières</i>	88
<i>Figure 31 : Sondes utilisées lors des mesures de séchage en tas des plaquettes forestières</i> ...	90
<i>Figure 32 : Dispositif d'acquisition des mesures</i>	91
<i>Figure 33 : Connecteur ZA9650FS3</i>	91
<i>Figure 34 : Dispositif d'analyse de répartition granulométrique</i>	92
<i>Figure 35 : Exemple de répartition granulométrique (1)</i>	93
<i>Figure 36 : Exemple de répartition granulométrique (2)</i>	93
<i>Figure 37 : Vue d'ensemble du thermodésorbiteur et du système d'analyse chromatographique</i>	94

<i>Figure 38 : Disposition des sondes au sein des plaquettes forestières</i>	96
<i>Figure 39 : Étape intermédiaire d'instrumentation</i>	97
<i>Figure 40 : Exemple de tas de plaquettes forestières instrumenté</i>	97
<i>Figure 41 : Essai préliminaire de comparaison des modes de stockage</i>	102
<i>Figure 42 : Essai 1 - champ de températures à t = 49 jours</i>	106
<i>Figure 43 : Essai 1 - évolution du champ d'humidités lors de l'essai</i>	106
<i>Figure 44 : Essai 2 - champ de températures à t = 40 jours</i>	108
<i>Figure 45 : Essai 3 - Relevé des températures dans le tas en fonction du temps</i>	109
<i>Figure 46 : Essai 3 - champ de température à t = 1 jour</i>	110
<i>Figure 47 : Essai 3 - champ de température à t = 25 jours</i>	110
<i>Figure 48 : Essai 3 - relevé des humidités sur brut dans le tas en fonction du temps</i>	111
<i>Figure 49 : Essai 3 - évolution du champ d'humidité dans le tas de plaquettes forestières.</i> ..	113
<i>Figure 50 : Essai 4 – tas de plaquettes sous hangar de stockage</i>	114
<i>Figure 51 : Essai 4 – Évolution des températures dans le tas de plaquettes forestières</i>	115
<i>Figure 52 : Essai 4 – cheminées d'évacuation de vapeur d'eau</i>	116
<i>Figure 53 : Essai 5 – évolution des températures dans le tas</i>	118
<i>Figure 54 : Essai 5 – champ des températures dans le tas à t = 37 jours</i>	119
<i>Figure 55 : Essai 6 – évolution des températures dans le tas</i>	120
<i>Figure 56 : Essai 6 – champ de températures dans le tas à t = 55 jours</i>	121
<i>Figure 57 : Pointe inox dégradée suite à l'essai</i>	122
<i>Figure 58 : Spectre de masse de gaz effluents lors d'un essai de séchage en tas</i>	124
<i>Figure 59 : hangar possédant uniquement un toit (à gauche)</i>	127
<i>Figure 60 : hangar possédant un toit et un côté ouvert (à droite)</i>	127
<i>Figure 61 : Influence des 3 paramètres considérés sur la production de chaleur et importance des interactions</i>	132
<i>Figure 62 : Influence des 3 paramètres considérés sur la capacité de séchage et importance des interactions</i>	133
<i>Figure 63 : Influence du type de stockage sur $\sigma\Delta T$ et $\sigma\Delta HB$</i>	135
<i>Figure 64 : Influence de la saison de stockage sur $\sigma\Delta T$ et $\sigma\Delta HB$</i>	136
<i>Figure 65 : Dispositif expérimental de séchage en enceinte climatique</i>	140
<i>Figure 66 : Séchage en enceinte climatique à 40°C pour différentes humidités relatives.</i> ...	141
<i>Figure 67 : Traitement des données obtenues lors du séchage en enceinte climatique.</i>	142
<i>Figure 68 : Coefficient k_x en fonction des essais.</i>	144
<i>Figure 69 : Coefficient directeur des courbes d'évolution de k en fonction de l'humidité relative de l'air en fonction de la température.</i>	144
<i>Figure 70 : Représentation d'un lit fixe mobile.</i>	148
<i>Figure 71 : Allure de la courbe d'humidité relative de l'air et de l'humidité du bois dans le lit de solide à petite échelle (modèle simplifié).</i>	153
<i>Figure 72 : Allure de la courbe d'humidité relative de l'air et de l'humidité du bois dans le lit de solide à petite échelle (modèle complet).</i>	153
<i>Figure 73 : Représentation d'un tas ne dépendant que d'une variable d'espace (modèle 1D).</i>	155
<i>Figure 74 : Évolution des températures calculées en fonction de la hauteur dans le lit de plaquettes sur 4 jours.</i>	161
<i>Figure 75 : Champ de températures dans le lit de plaquettes à t = 4 jours.</i>	162
<i>Figure 76 : Évolution des humidités absolues calculées en fonction de la hauteur dans le lit de plaquettes sur quatre jours.</i>	163
<i>Figure 77 : Évolution des humidités absolues calculées en fonction de la hauteur dans le lit de plaquettes sur 8 semaines.</i>	163
<i>Figure 78 : Champs d'humidités absolues dans le lit de plaquettes à t = 4 et t = 21 jours.</i> ..	164

<i>Figure 79 : Évolution de la valeur de q calculée en fonction de la zone du lit au cours du temps.....</i>	165
<i>Figure 80 : Vitesse de l'air calculée en fonction de la zone du lit de plaquettes sur 96 heures.</i>	166
<i>Figure 81 : Coût des séchoirs en fonction de la capacité d'évaporation.</i>	172
<i>Figure 82 : Paramètres de forme d'un tas de plaquettes forestières.</i>	173
<i>Figure 83 : Proportions des différentes zones d'un pôle de stockage.</i>	174
<i>Figure 84 : Influence des différents coûts liés au séchage des plaquettes forestières par rapport à la valeur ajoutée pour un projet de petite dimension (50>30%).</i>	181
<i>Figure 85 : Coût de la part de séchage naturel et/ou de séchage artificiel par rapport à la valeur ajoutée pour un projet de petite dimension (50>30%).</i>	182
<i>Figure 86 : Influence des différents coûts liés au séchage des plaquettes forestières par rapport à la valeur ajoutée pour un projet de petite dimension (50>30%).</i>	183
<i>Figure 87 : Influence des différents coûts liés au séchage des plaquettes forestières par rapport à la valeur ajoutée pour un projet de petite dimension (50>10%).</i>	184
<i>Figure 88 : Coût de la part de séchage naturel et/ou de séchage artificiel par rapport à la valeur ajoutée pour un projet de petite dimension (50>10%).</i>	185
<i>Figure 89 : Influence des différents coûts liés au séchage des plaquettes forestières par rapport à la valeur ajoutée pour un projet de grande dimension (50>10%).</i>	186
<i>Figure 90 : Coût des plaquettes par rapport aux autres énergies.</i>	188

Table des tableaux

<i>Tableau 1 : Exemples de granulométrie [14]</i>	44
<i>Tableau 2 : Composition d'échantillons avant et après stockage provenant de rémanents forestiers et de taillis à courte rotation</i>	55
<i>Tableau 3 : Exemples de bactéries produisant du lactate, de l'acétate ou de l'éthanol</i>	56
<i>Tableau 4 : Pertes de masse sèche en fonction des cas</i>	58
<i>Tableau 5 : Principaux COV émis lors du séchage en étuve à 105°C pour différent matériaux de type biomasse</i>	59
<i>Tableau 6 : Caractéristiques techniques du séchage naturel</i>	61
<i>Tableau 7 : Caractéristiques d'un séchoir tunnel</i>	63
<i>Tableau 8 : Caractéristiques d'un séchoir rotatif</i>	66
<i>Tableau 9 : Caractéristiques du séchage « en lit fixe »</i>	68
<i>Tableau 10 : Humidités sur brut obtenues selon le mode de stockage.</i>	102
<i>Tableau 11 : Essais menés avec suivi en continu de l'humidité et de la température</i>	104
<i>Tableau 12 : Essai 3 - humidités sur brut obtenues par méthode de mesure de résistance électrique et par étuvage</i>	112
<i>Tableau 13 : Essai 6 - humidités sur brut obtenues par méthode de mesure de résistance électrique et par étuvage</i>	122
<i>Tableau 14 : Essai 6 – Pouvoirs calorifiques supérieurs du bois anhydre avant et après stockage en tas</i>	123
<i>Tableau 15 : Récapitulatif des essais répertoriés, de leurs paramètres et des résultats enregistrés</i>	130
<i>Tableau 16 : Plan d'expérience complet pour les 3 paramètres étudiés et résultats correspondants</i>	131
<i>Tableau 17 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées de ΔT et ΔHB.</i>	134
<i>Tableau 18 : Coefficient k_x estimé en fonction des essais en $kg.m^{-2}.s^{-1}$.</i>	143
<i>Tableau 19 : Comparaison entre les modèles et les données expérimentales à petite échelle.</i>	152
<i>Tableau 20 : Comparaison entre les modèles et les données expérimentales à grande échelle.</i>	154
<i>Tableau 21 : Moyennes des vitesses de l'air entre $t = 100$ heures et $t = 500$ heures</i>	166
<i>Tableau 22 : Coût annuel d'un salarié en fonction du poste.</i>	170
<i>Tableau 23 : Coûts et durée d'amortissement des différents matériels.</i>	171
<i>Tableau 24 : Coût des séchoirs et emprise au sol en fonction de la capacité d'évaporation.</i>	171
<i>Tableau 25 : Caractéristiques des tas de plaquettes forestières et du bois.</i>	172
<i>Tableau 26 : Coût et temps d'amortissement des immobiliers.</i>	174
<i>Tableau 27 : Nombre d'opérations de manutention en fonction du type de procédé de séchage.</i>	175
<i>Tableau 28 : Prix de vente minimal en $€.Mwh^{-1}$ des plaquettes à 30% d'humidité sur brut en fonction du procédé de séchage.</i>	187
<i>Tableau 29 : Prix de vente minimal en $€.Mwh^{-1}$ des plaquettes à 10% d'humidité sur brut en fonction du procédé de séchage.</i>	187
<i>Tableau 30 : Caractéristiques des trois modes de stockages considérés.</i>	190
<i>Tableau 31 : Prix de vente des plaquettes forestières en fonction des trois modes de stockage considérés.</i>	190

Notations

$a (=S / V)$	Surface spécifique des particules en m^{-1} (rapport surface sur volume externe de la particule)
α	Coefficient d'ajustement dont la valeur est comprise entre 0 et 1
ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
COV	Composés Organiques Volatils
C_{p_a}	Chaleur spécifique massique de l'air sec en $J.kg^{-1}.K^{-1}$
C_{p_B}	Chaleur spécifique massique du solide sec en $J.kg^{-1}.K^{-1}$
$C_{p_e}^l$	Chaleur spécifique de l'eau liquide en $J.kg^{-1}.K^{-1}$
$C_{p_e}^v$	Chaleur spécifique de l'eau vapeur en $J.kg^{-1}.K^{-1}$
e	Épaisseur des particules en mm
ε	Porosité du lit de plaquettes forestières
G	Débit massique d'air sec en $kg.s^{-1}$
h	Coefficient de transfert de chaleur convectif $W.m^{-2}.K^{-1}$
HB	Humidité sur brut
HR	Humidité relative de l'air
IFN	Institut Forestier National
k	Coefficient global de transfert de matière en $kg.m^{-2}.s^{-1}$
K	Constante globale de transfert de matière en $kg.s^{-1}$
$\Lambda(0)$	Chaleur latente de vaporisation de l'eau à $0^\circ C$ en $J.kg^{-1}$
μ	Viscosité de l'air en Pa.s
m_0	Masse initiale de plaquettes forestières (avant séchage) en kg
M_a	Masse molaire de l'air en $kg.mol^{-1}$

M_{air}	Masse d'air qui passe dans une portion du lit pendant le pas de temps en kg
M_e	Masse molaire de l'eau en $\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$
M_{eau}	Masse d'eau présente dans le bois en kg
$M_{\text{eau entrée}}$	Masse d'eau entrant dans la portion de lit en kg
$M_{\text{eau sortie}}$	Masse d'eau sortant de la portion de lit en kg
$M_{\text{boishumide}}$	Masse du bois humide en kg
M_{anhydre}	Masse anhydre de bois en kg
M_s	Débit de solide sec en $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
P	Pression totale de l'air en Pa
PCI	Pouvoir calorifique inférieur en $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
$PCI_{\text{anhydre_bois}}$	Pouvoir calorifique inférieur du bois anhydre en $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
PCI_{HB}	Pouvoir calorifique inférieur du bois à l'humidité HB en $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
PCS	Pouvoir calorifique supérieur en $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
q	Débit d'énergie produit par fermentation par unité de masse du solide sec en $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
R	Constante des gaz parfaits en $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$
ρ_0	Masse volumique anhydre du bois en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ρ_a	Masse volumique de l'air sec en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
$\rho_{\text{apparente}}$	Masse volumique apparente anhydre d'un lit de plaquettes forestières en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ρ_e	Masse volumique de l'eau vapeur en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ρ_H	Masse volumique du bois humide en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
S	Surface externe de plaquettes forestières en contact avec l'air en m^2
t	Temps en s

T	Température en K
$T_{\text{entrée}}$	Température de l'air en entrée de la partie de lit de plaquettes forestières en K
T_g	Température de l'air de séchage en K
T_s	Température des plaquettes forestières en K
T_{sortie}	Température de l'air en sortie de la partie de lit de plaquettes forestières en K
TTC	Toutes Taxes Comprises
u	Vitesse de l'air en fût vide en m.s^{-1}
UE	Union Européenne
V	Volume de plaquettes forestières en m^3
W	Humidité absolue de l'air en $\text{kg}_{\text{eau}}.\text{kg}_{\text{air sec}}^{-1}$
W_e	Humidité absolue de l'air en l'équilibre avec l'humidité absolue X des particules en $\text{kg}_{\text{eau}}.\text{kg}_{\text{air sec}}^{-1}$
X	Humidité sur sec ou humidité absolue du bois
X^*	Humidité absolue d'équilibre des plaquettes forestières
X_0	Humidité initiale absolue des plaquettes forestières
X_s	Humidité absolue finale des plaquettes forestières
ρ_{e_sat}	Masse volumique de la vapeur d'eau à saturation

Le terme « tas de plaquettes forestières » pouvant apparaître régulièrement dans le texte, il a parfois été contracté en « tas de plaquettes » ou « tas » pour éviter les redondances.

Introduction

La France possède de fortes ressources en bois. En 2004, le ministère de l'économie, des finances et de l'industrie [1] a montré une utilisation de 9,2 millions de TEP, le potentiel total étant estimé à 12,2 millions de TEP (sans couper de bois). Le gisement disponible se distingue selon quatre classes :

- les coproduits non triturbables de l'industrie du bois tels l'écorce ou la sciure,
- certains produits bois en fin de vie tels les palettes, les cagettes ou les bois issus de la démolition de bâtiments,
- les bois issus de l'entretien des haies, bocages et espaces boisés,
- les résidus de l'exploitation et de l'entretien de la forêt.

À ces gisements, on peut ajouter le gisement forestier qui est de loin le plus important : la forêt française ne cesse de s'accroître en surface et en volume depuis plus de deux siècles. Sur les dix dernières années, la surface forestière française s'accroît d'environ 0,4 % par an.

Parler d'accroissement annuel seul ne suffit pas : le bois ne peut être considéré comme énergie renouvelable que si le taux de prélèvement de bois est inférieur ou égal à l'accroissement biologique naturel. En 2004, l'ensemble des prélèvements de bois (bois d'œuvre, bois de trituration, bois-énergie) s'élevait à 60 millions de m³ ; l'accroissement biologique naturel quant à lui s'élevait à 88,3 millions de m³, ces chiffres ne tenant compte que de la partie grume des arbres et non du houppier. La Figure 1 montre l'évolution de l'accroissement annuel et du prélèvement de bois en France de 1989 à 2004 [2].

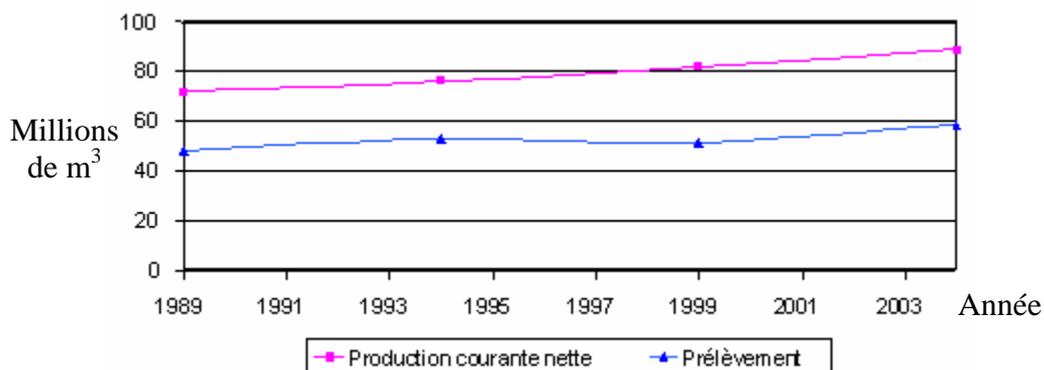


Figure 1 : Évolution de l'accroissement annuel et du prélèvement de bois en France entre 1989 et 2004

L'accroissement annuel et les prélèvements augmentent tous les deux. La différence représente un potentiel exploitable par les diverses industries du bois et croît également. La récolte des bois à destination des industries génère des rémanents forestiers (branchages, petits bois) qui, après broyage, peuvent être valorisés énergétiquement sous forme de plaquettes forestières. Une étude réalisée pour l'ADEME par l'IFN et SOLAGRO en 2004 [3] estime à 7,3 millions de tep par an l'équivalent énergétique de ces résidus sur l'ensemble du territoire. Outre l'intérêt énergétique qu'elle représente, la valorisation de ces résidus dans le cadre d'une exploitation forestière raisonnée est utile à l'entretien et au maintien des forêts.

Les plaquettes forestières peuvent être valorisées de plusieurs manières comme dans des chaudières ou dans des procédés de pyrolyse / gazéification. La principale difficulté liée à l'utilisation des plaquettes forestières est de garantir une qualité de plaquettes sûre et constante au cours du temps, notamment en ce qui concerne l'humidité et la granulométrie.

En fonction du type de valorisation énergétique désiré, les besoins en termes d'humidité du combustible sont différents. Maîtriser le séchage des plaquettes forestières est ainsi un défi très important pour rendre la filière pérenne. Le coût du séchage doit être le plus faible possible et le contrôle de l'humidité doit être relativement précis.

Afin de répondre à cette problématique, plusieurs techniques de séchage existent :

- le séchage dit naturel, qui consiste à stocker les plaquettes forestières sous forme de tas et à laisser les phénomènes d'auto-échauffement se produire pour sécher le bois ;
- le séchage dit artificiel où l'énergie servant à sécher le bois provient d'une source externe.

Le séchage artificiel est d'ores et déjà bien connu mais l'énergie à apporter pour sécher le bois est importante. C'est pourquoi le séchage naturel est le plus utilisé. Cependant, les phénomènes physico-chimiques et les paramètres intervenant lors du stockage/séchage des plaquettes forestières en tas sont très peu connus, donnant lieu régulièrement à de mauvaises pratiques.

Le premier objectif de ce travail de thèse est de comprendre les phénomènes apparaissant lors du séchage naturel des plaquettes forestières et de déterminer les paramètres influant sur ce procédé. Ainsi, le travail débutera par l'étude et la compréhension des systèmes existants afin de mettre en place des modèles de séchage pour chaque procédé. Dans un deuxième temps, une étude des différentes solutions envisageables (existantes ou non)

permettra d'élaborer plusieurs scénarii de stockage pour atteindre les performances souhaitées : les résultats permettront de répondre au mieux aux besoins industriels sur les plans techniques et économiques.

En dehors d'une introduction et d'une conclusion générale, le mémoire est scindé en cinq chapitres. Le chapitre I intitulé « Analyse bibliographique » passe en revue les propriétés du bois ainsi que les technologies de séchage adaptées aux plaquettes forestières. Le chapitre II intitulé « Matériels et méthodes » a pour objectif de décrire les méthodes de mesures utilisées et/ou mises au point ainsi que les protocoles expérimentaux utilisés. Le chapitre III intitulé « Résultats et discussion » décrit les résultats des essais ; il s'en suit une discussion sur les données recueillies et leur comparaison avec des données bibliographiques. Le chapitre IV intitulé « Modélisation scientifique du séchage des plaquettes forestières » présente un modèle de séchage des plaquettes forestières en lit fixe mobile, ainsi qu'un modèle de séchage naturel des plaquettes forestières. Enfin, le chapitre V intitulé « Modélisation technico-économique du séchage des plaquettes forestières » a pour objectif de comparer les différentes voies naturelles et/ou artificielles de séchage des plaquettes forestières et de proposer des solutions envisageables pour optimiser le séchage en fonction des besoins.

Chapitre I : Analyse bibliographique

1 Contexte et généralités

1.1 Biomasses et valorisations

Selon le gouvernement [1], la biomasse est la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales, de la sylviculture et des industries connexes ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers.

La biomasse d'origine animale est peu utilisée pour une valorisation énergétique. De même, la biomasse d'origine végétale servant à l'alimentation (maïs, blé, ...) n'est que très rarement utilisée en dehors des résidus issus de leur exploitation, ces valorisations étant généralement soumises à controverse comme dans le cas de la production de biocarburants. Les biomasses utilisées pour une valorisation énergétique sont le plus souvent des rémanents issus de l'agriculture (pailles), des rémanents issus de l'exploitation forestière ou le fruit de cultures dédiées (taillis à courte rotation, miscanthus, sorgho, chanvre, ...).

Les principales voies de valorisation sont :

- Voie biologique : fermentation aérobie ou anaérobie
- Voie physico-chimique : lipides (huiles) ou glucides (sucres)
- Voie thermo-chimique : liquéfaction, pyrolyse, gazéification, combustion

Pour les voies physico-chimiques et biologiques, la biomasse utilisée est généralement humide alors que pour la voie thermo-chimique, la biomasse sèche est le plus souvent préférée.

La valorisation de la biomasse par voie thermo-chimique est la voie la plus utilisée industriellement, notamment par combustion. La matière première utilisée est généralement issue du bois. Les procédés industriels de valorisation de la biomasse fonctionnant en continu, la biomasse est fragmentée pour permettre l'automatisation. Les plaquettes forestières représentent ainsi un des combustibles les plus utilisés pour ces systèmes.

L'utilisation de la biomasse contrairement à l'utilisation des ressources fossiles est décrite comme neutre vis-à-vis de l'effet de serre. La partie suivante présente les raisons pour lesquelles le bilan carbone est considéré comme neutre.

1.2 Intérêts de la biomasse face à l'augmentation de l'effet de serre

La quantité de CO₂ dégagée lors de la combustion du bois correspond à celle extraite de l'air par photosynthèse lors de la croissance des arbres. Le carbone de ce CO₂ est ensuite fixé dans l'arbre, l'oxygène étant dégagé dans l'air. Pour ces raisons, le bois peut être considéré comme neutre vis-à-vis de l'augmentation de l'effet de serre lors de son utilisation comme source d'énergie tant que les quantités prélevées demeurent inférieures à la croissance. De plus, l'utilisation énergétique du bois est préférable à sa décomposition naturelle qui produit du méthane, gaz à effet de serre plus redoutable que le CO₂.

En revanche, dans le cas des ressources fossiles, le carbone a été prélevé de l'atmosphère et piégé durant des millions d'années. Lors de l'utilisation intense de ces ressources, le carbone qui a été séquestré est réintroduit rapidement dans l'atmosphère et augmente rapidement la quantité de CO₂ contenu dans celui-ci. Le cycle du carbone est alors modifié, la biomasse ne pouvant absorber ces émissions très importantes de gaz carbonique.



Dessin AJENA

Figure 2 : Cycle du carbone du point de vue du bois

En considérant le bilan carbone strictement du point de vue du bois, le bilan est neutre. En revanche, en considérant le bilan carbone total de la production de plaquettes forestières par exemple, il convient de prendre en compte les différentes opérations qui vont de l'arbre en forêt à la plaquette forestière livrée dans le silo. Ces activités nécessitent l'utilisation de ressources fossiles dont l'utilisation dégage du CO₂ : abattage, broyage, transport... La Figure 3 montre la quantité de CO₂ d'origine fossile émise pour la production de 1 MWh de chaleur en fonction du type de chauffage collectif considéré. [4]

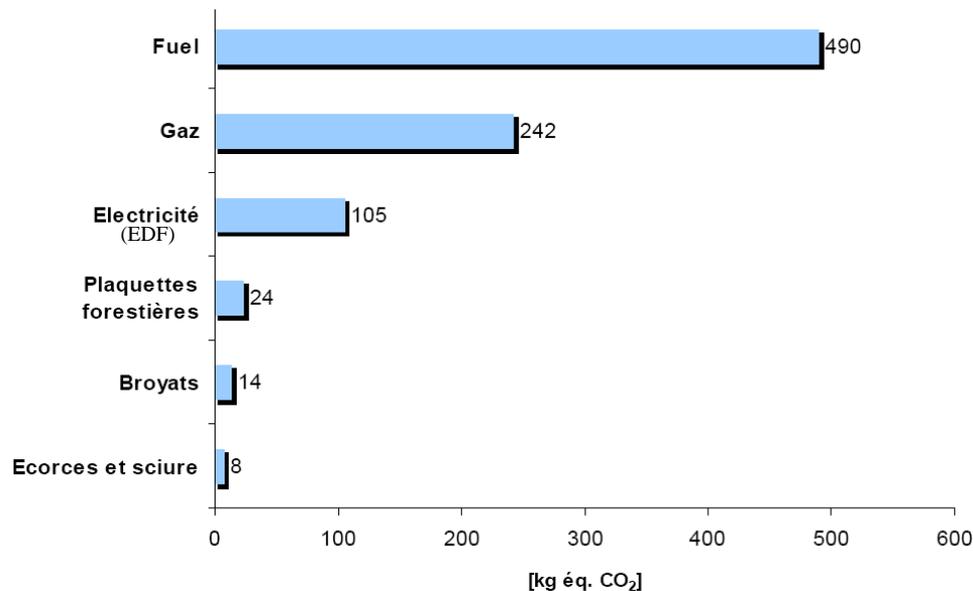


Figure 3 : Bilan sur l'effet de serre des différents types de chauffage collectif

La Figure 4 quant à elle montre la quantité de CO₂ d'origine fossile émise pour la production de 1 kWh de chaleur en fonction du type de chauffage domestique considéré. [5]

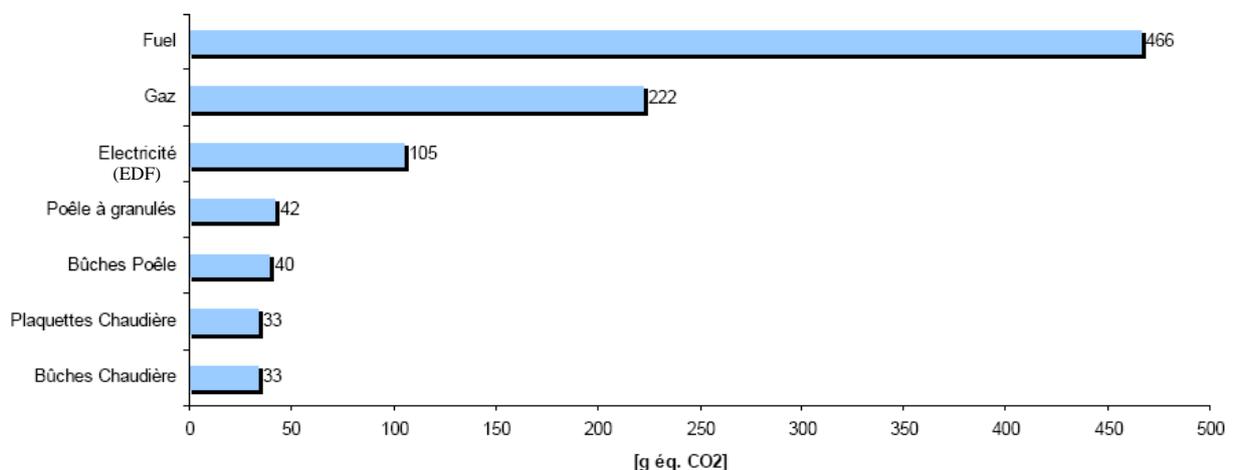


Figure 4 : Bilan sur l'effet de serre des différents types de chauffage domestiques

L'utilisation de bois énergie engendre, quel que soit le contexte entre 5 et 20 fois moins d'émissions d'origine fossile que le fuel, le gaz ou bien l'électricité. Finalement, pour que les plaquettes forestières aient réellement un bilan nul vis-à-vis du carbone, il est nécessaire que les émissions de carbone d'origine fossile soient absorbées par la croissance forestière. Ainsi la différence entre l'accroissement annuel et le prélèvement de bois doit permettre de piéger plus de carbone que celui produit de manière anthropique. Notons que c'est actuellement largement le cas en France : l'accroissement annuel est compris entre 85 et 100 millions de m³ pour un prélèvement d'environ 60 millions de m³ dont 40 millions de m³ pour l'énergie.

1.3 La production de plaquettes forestières

Lors de l'exploitation forestière, l'élagage et le défrichage produisent un grand nombre de branches et résidus qui peuvent être déchiquetés pour l'alimentation des chaufferies automatiques. L'approvisionnement en plaquettes forestières entre dans un processus commençant par l'abattage des arbres jusqu'au déversement des plaquettes dans un silo. Après combustion, les cendres pourraient être valorisées par épandage dans les forêts ou en agriculture pour rapporter les minéraux à la terre. La Figure 5 présente les différentes étapes de la production des plaquettes forestières : l'abattage (1), le façonnage (2) et le débardage (3), le déchiquetage (5), le transfert des plaquettes sur véhicule routier (6) [6].



Figure 5 : Étapes de la production des plaquettes forestières

Le déchiquetage du bois est effectué grâce à des broyeurs le plus souvent à tambours ou à disques. Les broyeurs à tambour sont munis de grilles de calibration qui permettent

généralement d'avoir une distribution granulométrique plus ciblée qu'avec des plaquettes forestières broyées à l'aide d'un broyeur à disque.

Après broyage et transport, deux types de chaînes logistiques peuvent être distinguées. L'approvisionnement s'effectue soit en flux tendu et le bois est livré humide, soit les plaquettes transitent via un centre de stockage pour être séchées et ensuite livrées.

Les plaquettes fines et sèches sont utilisées dans des petites chaudières automatiques pour des habitations individuelles ou des petits réseaux de chaleur de plusieurs logements. Les grosses plaquettes sont utilisées dans des chaufferies collectives ou industrielles de plus grosse puissance et souvent munies de réseaux de chaleur.

1.4 Utilisations du bois énergie

La production d'énergie primaire d'origine renouvelable s'élevait en France métropolitaine à 18 Mtep en 2007. Deux-tiers de cette énergie sont thermiques, provenant du bois, de l'incinération, des déchets urbains et des biocarburants. L'autre tiers est de l'électricité : 88 % d'origine hydraulique, 6 % à partir de l'éolien et 6 % provenant de la biomasse dans des unités de cogénération. La France est l'un des premiers producteurs d'énergies renouvelables en Europe, grâce principalement au bois et à l'hydroélectricité (respectivement 9,4 Mtep et 4,5 Mtep en 2005 [7]). La part des énergies renouvelables dans la consommation totale d'énergie primaire en France s'élevait à 6,6 % en 2007 contre 7,2 % en 1990. La Figure 6 présente la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie primaire entre 1990 et 2007 [8].

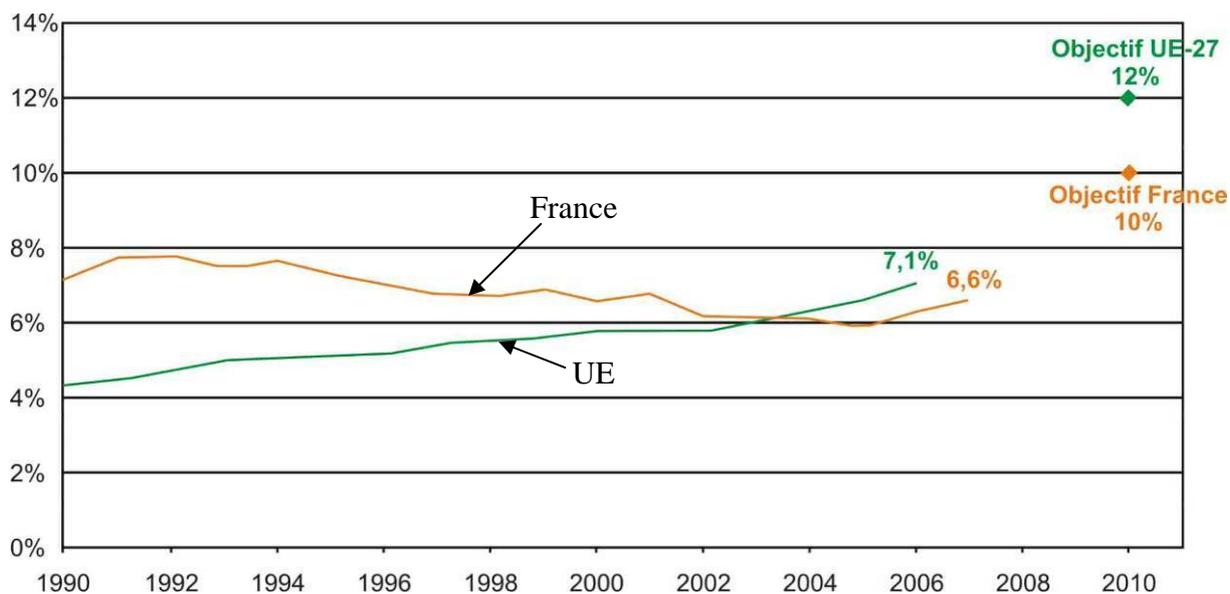


Figure 6 : Part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie primaire

Dans la loi d'orientation sur l'énergie du 13 juillet 2005, la France s'est fixée l'objectif de porter la part des énergies renouvelables à 10% en 2010. Jusqu'en 2005, la baisse observée s'explique par une augmentation de la production d'énergie d'origine renouvelable n'atteignant pas l'augmentation de la consommation d'énergie. La hausse constatée en 2006 et 2007 provient de l'accroissement conjugué de la production électrique (reprise de la production hydraulique et forte progression de l'éolien) et de la production primaire thermique dont le bois. En 2006, les énergies renouvelables couvraient 7 % des besoins énergétiques de l'Union Européenne des 27. Le seuil de 12 % ne sera sans doute pas atteint en 2010 ; le rythme actuel devrait seulement permettre d'atteindre 10 % pour 2020 estime la Commission Européenne, qui travaille à l'établissement de nouveaux objectifs, ambitieux et contraignants. [8]

La part du bois représente près de 60 % de l'énergie primaire produite d'origine renouvelable et plus de 75% de l'énergie thermique d'origine renouvelable produite [7]. Avec les objectifs fixés par la Commission Européenne, la consommation de bois à des fins énergétiques doit de nouveau augmenter, le potentiel de bois exploitable restant toujours important.

De plus, en France, différentes actions ont été mises en place pour augmenter la part de l'utilisation du bois dans la production d'énergie primaire : nous pouvons citer par exemple les plans bois énergie, le fonds chaleur et les projets CRE. Les plans bois énergie (1994-1999, 2000-2006 et 2007-2010) ont pour objectifs l'aide à la structuration de l'offre de bois, l'aide à

la décision d'installation de chaudières collectives et l'allocation de subventions pour l'acquisition de chaudières bois [9]. Le fonds chaleur, dans lequel le plan bois énergie 2007-2010 a été re-noyé, a pour objectif de développer la production de chaleur à partir des énergies renouvelables (biomasse, géothermie, solaire thermique ...). Il est destiné à l'habitat collectif, aux collectivités et à toutes les entreprises (agriculture, industrie, tertiaire) [10]. Enfin, les sessions CRE (CRE1, CRE2, CRE3) ont pour objectif l'installation de procédés de cogénération pour produire de l'électricité à partir d'énergie issue de la biomasse.

1.5 Le prix des différents types de biomasses

Pour comparer les différentes sources d'énergie, les coûts au MWh sont indiqués sur la Figure 7. Le prix des énergies variant fortement d'une période à l'autre, cette figure permet simplement d'avoir des ordres de grandeur comparatifs. Dans le cas de la biomasse (hors bûches) les données datent de 2005 [11], les autres données datent de 2005 et 2006 [12].

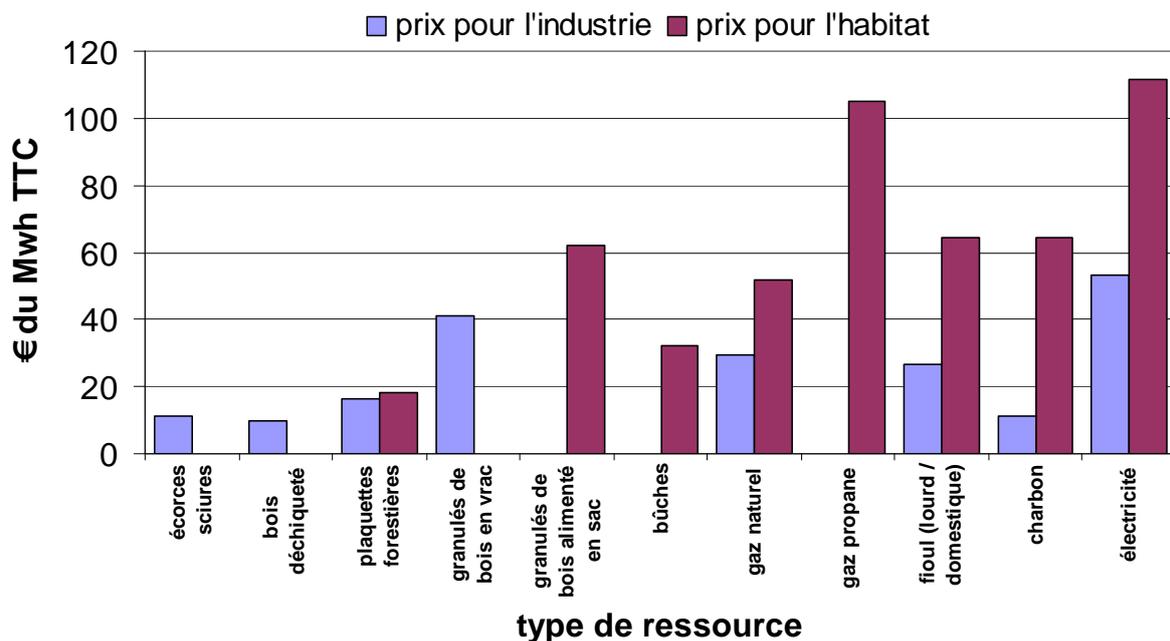


Figure 7 : Ordres de grandeur des coûts des différentes énergies

Les prix du bois déchiqueté (bois issu de toutes sources) et des plaquettes forestières (bois venant de forêts gérées) étant compétitifs, beaucoup de chaudières ont été installées ces dernières années et la tendance est à l'augmentation. La Figure 8 montre l'évolution de la puissance du parc des chaufferies collectives en France entre 1980 et 2005. Fin 2004, le parc

des chaufferies collectives bois en fonctionnement comprenait 641 installations, soit 430 MW de puissance thermique installée. Le parc en service est en constante progression, en moyenne de plus de 13 % par an depuis 2000. [13]

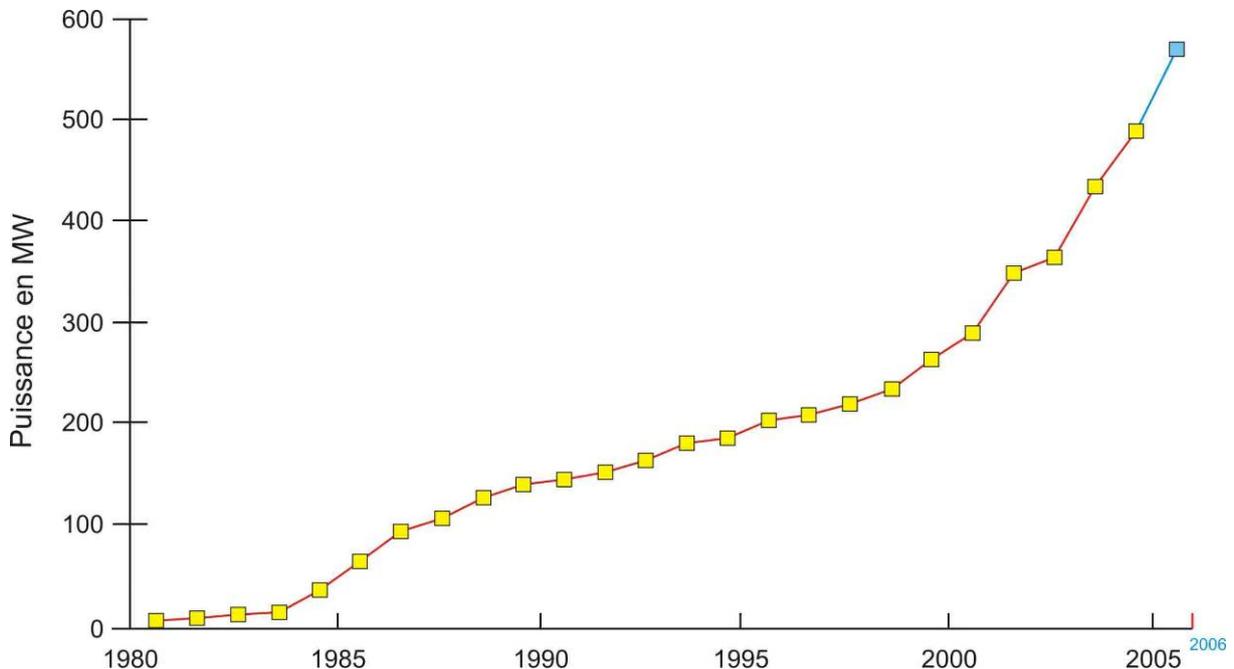


Figure 8 : Puissance du parc des chaufferies collectives

Concernant les chaufferies industrielles, de puissances supérieures à 1 MW, le parc est estimé à 1000 unités, essentiellement concentrées dans l'industrie du bois et de la trituration et représente une puissance installée de l'ordre de 2,5 GW. Fonctionnant en partie en cogénération, elles produisent ainsi de la chaleur valorisée sur place et de l'électricité qui est autoconsommée ou restituée sur le réseau électrique national.

Les combustibles utilisés sont le plus souvent des plaquettes issues soit de sous produits industriels, soit de sous produits forestiers. Les premières sont très souvent utilisées par les industries papetières ou de trituration, alors que les secondes sont utilisées principalement par le bois énergie. Lors des diverses utilisations, un combustible humide est moins fluide et plus lourd qu'un combustible sec : il faut donc prévoir des systèmes d'alimentation plus robustes. De plus, le pouvoir calorifique inférieur est aussi fortement dépendant de l'humidité et décroît rapidement avec celle-ci [14]. Ainsi, il est préférable de sécher partiellement le combustible avant son utilisation. La connaissance des caractéristiques physico-chimiques du bois est aussi un point clé pour développer des techniques de séchage appropriées.

1.6 Caractéristiques du bois

Les propriétés physiques du bois varient selon l'essence ou les parties de l'arbre considérées : qu'il s'agisse d'un feuillu ou d'un résineux, de la culée aux brindilles, l'humidité ou le taux de matières volatiles est différent. Le sujet abordé réside dans le séchage d'un bois fragmenté qui peut être issu de nombreuses essences différentes. Des hêtres, chênes ou frênes utilisés dans l'ameublement aux résineux utilisés dans le bâtiment ou la trituration, l'exploitation forestière ajoute à sa composition l'écorce, les brindilles ainsi que de la terre ou quelques cailloux. Notons que le combustible provient majoritairement du broyage des résidus d'exploitation forestière. L'obtention de plusieurs tonnes de plaquettes de quelques grammes chacune donne au combustible ainsi formé un caractère global assez homogène. L'ensemble des propriétés intrinsèques du bois à prendre en compte pour notre étude sera présenté dans cette partie. Ce paragraphe se décompose naturellement selon les deux aspects du bois qui peut être vu comme matériau puis comme combustible. Les propriétés du bois que nous aborderons sont donc sa composition du point de vue anatomique et chimique, son hygroscopie, sa masse volumique et son pouvoir calorifique.

1.6.1 Structure anatomique

Le bois est une structure biologique complexe contenant des substances chimiques et des cellules exerçant différentes fonctions pour assurer la vie de la plante. Ces fonctions permettent la conduction de la sève des racines aux feuilles, le soutien mécanique de la plante ainsi que le stockage de substances biochimiques.

Du point de vue biologique, le bois et l'écorce sont un ensemble de tissus résultant du fonctionnement du cambium (ou assise génératrice libéro-ligneuse). Le cambium permet, grâce à ses cellules initiales, de produire deux types de tissus [15] :

- le liber, vers l'extérieur, dans lequel circule la sève élaborée,
- le bois, vers l'intérieur, dans lequel circule la sève brute.

Les cellules de l'arbre sont issues du cambium, les types de cellules étant différents en fonction du type d'arbre (résineux ou feuillu) :

Les résineux ont une structure anatomique simple composée principalement de cellules longitudinales : les trachéides. Les trachéides du bois de printemps sont pourvues de nombreuses ponctuations aréolées permettant l'échange de différentes substances. Les trachéides du bois d'été ont une paroi plus épaisse et remplissent davantage une fonction de soutien. Dans la structure des résineux, des cellules de parenchyme sont aussi présentes : elles permettent le stockage des substances nutritives. Enfin, chez certains résineux, des canaux résinifères existent.

Les feuillus présentent un plan ligneux plus différencié. L'ensemble du tissu se compose en grande partie de fibres orientées axialement (pour une fonction de soutien) et de quelques trachéides. Les vaisseaux assurent la fonction de conduction chez les feuillus. Ici aussi des cellules de parenchyme assurent le stockage des substances nutritives.

1.6.2 Structure chimique

Les constituants chimiques du bois peuvent être classés selon deux types de substances [15] :

- les substances macromoléculaires des parois cellulaires (cellulose, hémicellulose, lignine) présentes en quantités abondantes dans toutes les essences
- les substances de faible poids moléculaire (extraits, substances minérales) généralement plus spécifiques de certaines espèces de bois.

La Figure 9 schématise les principaux constituants du bois.

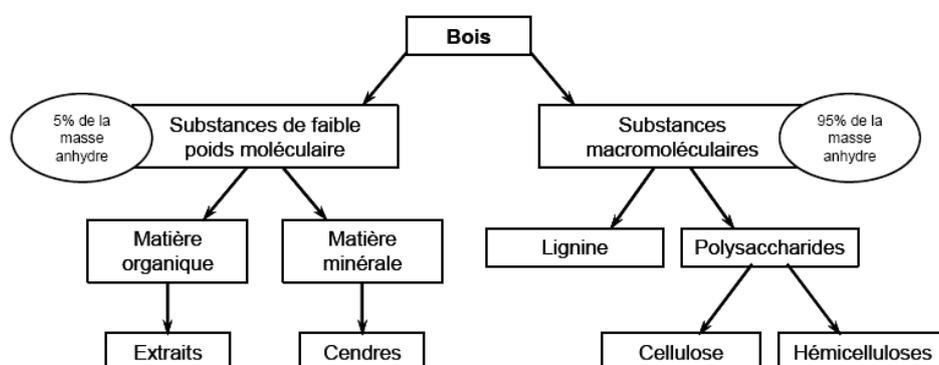


Figure 9 : Schéma général des constituants chimiques du bois [15]

Dans le bois, les substances macromoléculaires représentent environ 95 % de la masse anhydre tandis que les substances de plus bas poids moléculaires ne représentent que 5 % de la masse anhydre. Les polysaccharides représentent 65 à 75 % en masse du bois.

La cellulose est le composé majeur du bois dont la quantité représente environ la moitié des constituants totaux aussi bien chez les conifères que chez les feuillus. Elle est caractérisée par un polymère linéaire de haut poids moléculaire formé exclusivement de β - D - glucose.

Comme la cellulose, les hémicelluloses sont des polysaccharides, mais elles sont composées de différentes unités de sucres. Le degré de polymérisation des hémicelluloses est beaucoup plus bas que celui de la cellulose et celles-ci sont moins ordonnées et plus courtes. Elles diffèrent aussi de la cellulose du fait de certains de leurs groupements hydroxyles qui sont naturellement acétylés. Elles réagissent assez facilement et sont thermiquement beaucoup moins stables que la cellulose et la lignine. Leur dégradation provoque la production d'acide acétique, de méthanol et d'autres composés volatils.

La lignine est un polymère phénolique amorphe d'un poids moléculaire indéterminé ; les feuillus contiennent moins de lignine que les résineux.

Parmi les substances de bas poids moléculaire contenues dans le bois, il y a des substances minérales. Lors de la combustion, on les retrouve sous forme de cendres. Parmi ces substances minérales, il est possible de trouver du calcium, du potassium, de la silice, du magnésium...

Selon les essences, le bois peut contenir 0,5 % à 20 % en masse d'extractibles. On y trouve des composés insaturés, acides gras et glycérides. On y trouve aussi des terpènes, lignane, flavonoïdes et autres composés aromatiques. De nombreux extraits sont utilisés pour des applications médicales, en agro-alimentaire, pour des colorations, ...

La Figure 10 permet de clarifier la filiation de quelques molécules aromatiques et ainsi de mieux comprendre les mécanismes de différenciation chimique se déroulant au sein de la cellule végétale lors de la formation de ces molécules [16].

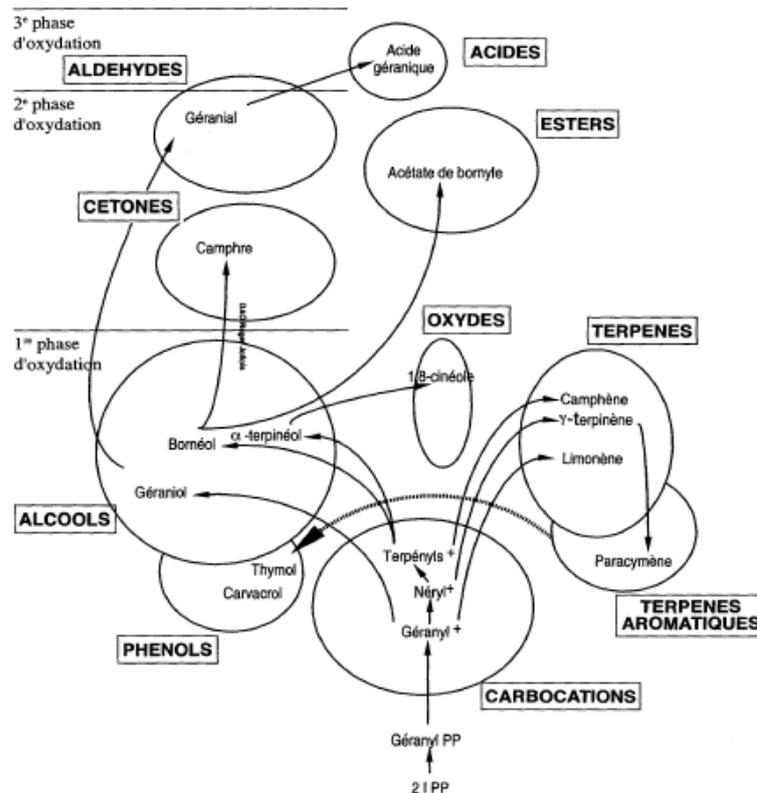


Figure 10 : Biosynthèse générale des terpénoïdes

Chaque étape est sous la dépendance d'une enzyme spécifique. Les différentes molécules mono terpéniques sont, comme toutes les autres molécules issues du végétal, le résultat de modifications structurales, ou fonctionnelles, plus ou moins importantes. Elles sont liées à l'activation ou à l'inactivation d'enzymes, ou de groupes enzymatiques, influencés par des facteurs endogènes (chromosomiques) et exogènes (climat, sol, ...).

1.6.3 L'eau dans le bois

Par convention (Norme NF B 51-004, 1985) le bois anhydre est celui qui est obtenu après un séjour en étuve ventilée à 103-105°C jusqu'à stabilisation de la masse. Par suite, le terme « d'eau contenue » exclut l'eau de constitution qui ne peut être extraite que par dégradation du produit. Cette eau contenue dans le bois peut apparaître sous trois formes : l'eau libre, l'eau liée et l'eau vapeur.

Pour des humidités inférieures au point de saturation des fibres (de l'ordre de 30 % d'humidité sur sec, soit 23 % d'humidité sur brut), l'eau dans le bois se trouve sous forme d'eau vapeur et d'eau liée ou adsorbée sur les fibres du bois et plus particulièrement sur les

fonctions hydroxyles de la cellulose et des hémicelluloses. Dans ce domaine d'humidité, appelé domaine hygroscopique du bois, une variation dimensionnelle du bois en fonction de son humidité et donc de celle du milieu extérieur est observée.

Au delà du domaine hygroscopique, il apparaît dans les cavités du bois de l'eau dite libre ou capillaire : en effet, l'eau libre est soumise aux forces capillaires. Dans un capillaire, l'énergie surfacique de l'interface liquide-gaz (la tension superficielle) induit une pression de vapeur d'eau inférieure à la pression de vapeur saturante de l'eau à la température du milieu. Cette différence de pression permet à l'eau capillaire de circuler de bas en haut dans l'arbre vivant.

Tout au long du mémoire, deux définitions d'humidités seront utilisées en fonction des applications. Pour la valorisation énergétique, l'humidité prise en compte est l'humidité sur brut. Elle se calcule par le rapport entre la masse d'eau et celle du produit humide :

$$HB = \frac{m_{eau}}{m_{boishumide}} = \frac{m_{eau}}{m_{anhydre} + m_{eau}}$$

Avec :

- *HB l'humidité sur brut,*
- *$m_{anhydre}$ la masse anhydre de bois,*
- *$m_{boishumide}$ la masse du bois humide,*
- *m_{eau} la masse d'eau présente dans le bois.*

Lors du calcul d'humidité, les masses doivent être exprimées avec la même unité (kg ou g).

Pour les calculs concernant le séchage, l'humidité sur sec (aussi appelée humidité absolue) est utilisée. Contrairement à l'humidité sur brut, l'humidité sur sec est définie par le rapport entre la masse d'eau et celle du produit anhydre :

$$X = \frac{m_{eau}}{m_{anhydre}}$$

Avec :

- *$m_{anhydre}$ la masse anhydre de bois,*
- *m_{eau} la masse d'eau présente dans le bois,*

- X l'humidité sur sec ou humidité absolue.

Dans ce cas également, les masses doivent être exprimées avec la même unité.

Ces deux humidités (HB et X) sont liées par les relations :

$$HB = \frac{X}{1 + X} \text{ ou } X = \frac{HB}{1 - HB}$$

1.6.4 Masse volumique

La masse volumique du bois anhydre peut être très différente selon l'échelle à laquelle la mesure est effectuée. On distingue sur base anhydre :

- la masse volumique des parois des cellules constitutives du bois, à l'échelle du nano litre : de 1460 à 1540 kg.m⁻³ [15],
- la masse volumique du bois massif (ρ_0), à l'échelle du litre : de 200 à 1350 kg.m⁻³ pour l'ensemble des essences qui se réduit de 400 à 600 kg.m⁻³ pour les essences majoritaires en Europe,
- la masse volumique apparente anhydre d'un tas de bois déchiqueté ($\rho_{\text{apparente}}$), à l'échelle du mètre-cube : de 100 à 300 kg.m⁻³ pour le bois déchiqueté et jusqu'à 650 kg.m⁻³ pour des granulés de bois.

La différence entre les masses volumiques des échelles du nano litre et du litre met en évidence le vide existant dans le bois à l'échelle cellulaire. Ce vide peut-être occupé par l'eau libre, ou par de l'air si le bois est anhydre.

La différence entre les masses volumiques des échelles du litre et du mètre-cube met en évidence le vide dû à l'arrangement des particules de bois fragmenté. Contrairement au précédent, ce vide n'est pas structuré en cavités et en capillaires et il ne contient que de l'air. Il dépend de la forme et des dimensions des éléments en bois massif constituant le tas ou la pile. Ces dimensions permettent de définir la fraction granulométrique, celles-ci sont généralement définies par trois cotes : la longueur (L) dans le sens de la fibre, la largeur (l) et l'épaisseur (e). Ces valeurs varient en fonction du réglage du broyeur. Le rapport de la masse volumique apparente d'un tas de bois sur la masse volumique réelle du bois massif qui constitue le tas s'appelle le foisonnement.

La masse volumique anhydre est liée au solide considéré ; la masse volumique humide est dépendante de l'humidité du bois. Les dimensions et les formes des particules qui engendrent le foisonnement d'un tas ne dépendent que très peu de l'humidité. Un tas de bois fragmenté humide est donc, comme dans le cas du sable humide, augmenté de la masse d'eau qu'il contient. La masse volumique humide se déduit de la masse volumique anhydre par la formule suivante :

$$\rho_H = \frac{1}{1 - HB} \rho_0$$

Avec :

- *HB l'humidité sur brut moyenne du tas de plaquettes forestières,*
- *ρ_0 la masse volumique anhydre en kg.m^{-3} ,*
- *ρ_H la masse volumique humide en kg.m^{-3} .*

A partir de la masse volumique anhydre et de la masse volumique apparente anhydre, la porosité externe d'un lit de plaquettes forestières peut être déduite par la relation :

$$\text{Porosité} = \frac{\rho_0 - \rho_{\text{apparente}}}{\rho_0}$$

Les masses volumiques doivent être exprimées avec la même unité.

1.6.5 Granulométrie

La granulométrie donne une indication sur la taille des plaquettes forestières, elle est caractérisée par trois grandeurs :

- les côtes moyennes des morceaux de la fraction la plus importante ;
- le pourcentage de fines (poussières et sciures) ;
- le pourcentage et la longueur maximale de gros morceaux.

La granulométrie type des principaux combustibles est donnée dans le Tableau 1 [14].

Type	Classe	Cotes moyennes (mm)	Teneur en fines (%)	Gros morceaux < 1 %
Sciures	Très fin	2 × 1 × 1		10 mm maximum
Copeaux	Fin et enroulé	20 × 10 × 2		30 mm maximum
Plaquettes fines	Fin coupé	20 × 10 × 5	< 5	40 mm maximum
Plaquettes moyennes	Moyen coupé	40 × 10 × 10	< 5	80 mm maximum
Broyat et plaquettes grossières	Grossier éclaté	150 × 50 × 50	< 5	200 mm maximum

Tableau 1 : Exemples de granulométrie [14]

La granulométrie des plaquettes forestières a une influence sur le type de broyage et sur le coefficient de foisonnement. Broyer du bois finement demande plus d'énergie que de le broyer grossièrement.

1.6.6 Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) est l'énergie thermique libérée par la combustion totale d'un kilogramme de combustible en considérant le retour des gaz de combustion à la température initiale du combustible.

Le pouvoir calorifique inférieur est l'énergie thermique libérée par la combustion totale d'un kilogramme de combustible en considérant que l'eau formée est évacuée à l'état gazeux. Selon l'essence du bois, le PCI anhydre moyen est compris entre 16700 et 18000 kJ.kg⁻¹ pour les feuillus et entre 17600 et 19600 kJ.kg⁻¹ pour les résineux [14]. Pour connaître le pouvoir calorifique inférieur du bois en kJ.kg⁻¹ pour une humidité sur brut HB, le calcul est le suivant :

$$PCI_{HB} = \frac{100 - 100.HB}{100} \times PCI_{anhydre_bois} - 25,1 \times 100.HB$$

Ainsi, un bois à 20 % d'humidité contient deux fois plus d'énergie qu'un bois à 50% d'humidité sur brut, d'où l'intérêt de sécher le bois avant valorisation énergétique (Figure 11).

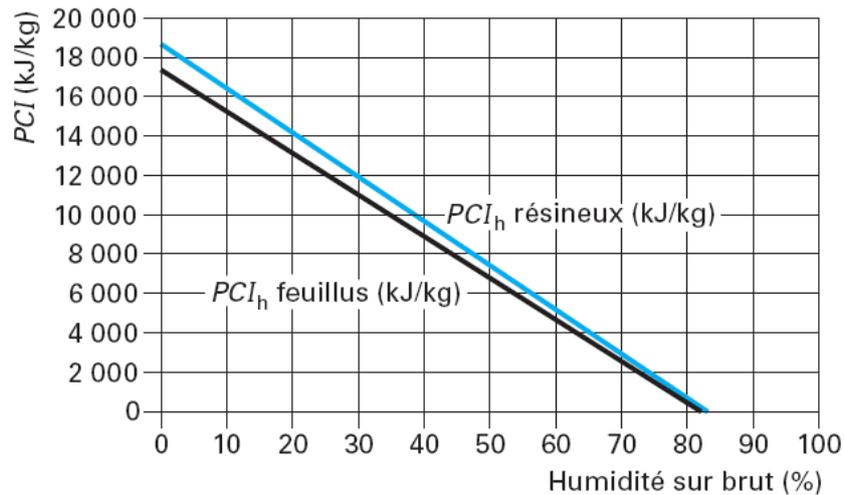


Figure 11 : PCI moyens pour les résineux et les feuillus en fonction de l'humidité

Pour faciliter les comparaisons, les plaquettes forestières sont vendues aujourd'hui en euros par MWh. Il est alors intéressant de sécher le bois pour transporter le maximum d'énergie pour un même volume et augmenter le bilan économique du transport et du stockage.

2 Mesure de l'humidité dans le bois

L'humidité de la biomasse fragmentée est un facteur prépondérant pour son utilisation comme combustible. Il existe aujourd'hui plusieurs méthodes de mesure de l'humidité pour le bois avec des applications et des mises en œuvre variables.

Dans cette partie, les principales méthodes de mesure de l'humidité existantes sont décrites, le but étant de sélectionner une technologie adaptée au suivi de l'humidité du bois lors du séchage de plaquettes forestières en tas.

2.1 Méthode conventionnelle

La détermination de l'humidité par séchage en étuve est la méthode de référence citée dans la norme CEN TC335 *Solid Biofuels — Methods for determination of moisture content — Oven dry method — Part 1 : Total moisture—Reference method*. Selon cette norme, la

biomasse doit être séchée à $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant 24 ou 48 heures puis pesée à intervalles réguliers jusqu'à ce que la masse soit stable. L'humidité peut ensuite être calculée de deux manières : soit en termes d'humidité sur base sèche, soit en termes d'humidité sur brut.

2.2 Méthodes de mesures en continu

L'intérêt de ces méthodes réside dans le fait qu'il est alors possible de suivre l'évolution de l'humidité au cours du temps. Pour caractériser le séchage lors du stockage en tas des plaquettes, c'est une méthode de ce type que nous cherchons à utiliser.

2.2.1 Méthode par mesure de rayons X

Cette technique fonctionne sur le principe d'absorption des rayons X par les matériaux et nécessite une calibration. Le principe est l'utilisation d'un émetteur et d'un récepteur de rayons X, le tout placé dans un contenant. D'un côté, l'émetteur envoie des rayons à deux niveaux d'énergie (70 eV et 40 eV), les rayons traversent le matériau à caractériser et de l'autre côté le récepteur enregistre l'atténuation des deux signaux. La plage de mesure d'humidité possible pour ce système est 10 – 75 % sur sec, soit 9 - 43% sur brut [17]. Même si le système est intéressant, il semble peu approprié à une mesure au sein d'un tas de plaquettes car onéreux et difficile à mettre en place sur différents niveaux.

2.2.2 Méthode par spectroscopie proche infrarouge

Lorsqu'un matériau est soumis à des rayons infrarouges, une partie des rayons est absorbée et une autre réfléchi. Dans le cas de solides, on utilise les rayons proches infrarouges car ils pénètrent mieux dans la matière que les infrarouges : les longueurs d'ondes utilisées vont de 800 et 2500 nm. Grâce à ce balayage en fréquence, on obtient un spectre dépendant de la composition chimique du matériau, de sa densité et de son humidité [17]. Par traitement, on peut alors obtenir l'humidité. Comme dans le cas précédent, cette méthode ne

peut pas être utilisée pour suivre l'humidité dans un tas de plaquettes pour des raisons de coût et de difficultés techniques.

2.2.3 Méthode de mesure par radiofréquence

La biomasse est un diélectrique polaire, ce qui signifie que lorsqu'elle est soumise à un champ alternatif, les particules chargées électriquement vont réagir et frotter les unes contre les autres, créant ainsi un dégagement de chaleur. Finalement, le champ alternatif s'en retrouve diminué et permet de déterminer la teneur en eau de l'échantillon de biomasse. Dans cette méthode, l'échantillon est placé entre deux antennes réceptrices. Un champ électrique alternatif est émis au sein de l'échantillon, le traverse, puis est capté par deux antennes. L'atténuation et le décalage du signal sont calculés ; ces deux données dépendent de la densité, de l'humidité, de la masse et de la température. Pour avoir un signal de réponse dépendant très fortement de l'humidité et plus faiblement des autres facteurs, la fréquence d'émission doit être choisie inférieure à 10 MHz. La plage de mesure d'humidité pour cette méthode est 15 – 60 % sur sec, soit 13 – 37 % sur brut.

De la même manière, la mesure peut être réalisée par micro-onde, cependant la plage de variation de l'humidité est alors 2 – 30 % sur sec, soit 2 – 23 % sur brut, ce qui ne correspond pas à la plage souhaitée pour de la biomasse en tas [17]. De plus, comme les précédentes, cette technique n'est pas vraiment adaptée à la mesure au sein d'un tas car trop difficile à mettre en œuvre techniquement.

2.2.4 Méthode de mesure par spectroscopie à résonance magnétique nucléaire

Cette méthode est uniquement utilisée pour du bois dont l'humidité varie entre 7 et 18 % d'humidité sur sec (soit 6 – 15 % sur brut) et n'a pas encore été calibrée pour de la biomasse fragmentée. De plus, le coût d'une telle technologie est important [17], ce qui ne la rend pas viable pour notre application.

2.2.5 Méthode par mesure de la capacitance

La constante diélectrique du bois est définie comme le rapport entre le potentiel mesuré aux bornes d'un condensateur dont l'isolant est le vide et le potentiel mesuré aux bornes d'un condensateur dont l'isolant est le bois sous l'effet d'une même source de tension. Cette propriété est fonction de l'humidité, de l'essence de bois, de la masse volumique, de la température et de l'orientation du bois. Les électrodes utilisées sont des plaques métalliques et entre ces deux plaques se trouve le bois. Cette technique permet de mesurer une humidité moyenne d'un échantillon de bois. Cependant, elle ne fonctionne bien que si l'humidité du bois est inférieure à l'humidité correspondant au point de saturation des fibres, c'est-à-dire en dessous de 23 % sur brut. Certains appareils de mesure sont capables d'estimer des humidités jusqu'à environ 50 % sur brut [18]. Même si l'échelle de mesure n'est pas vraiment idéale pour notre cas, cette méthode sera approfondie pour vérifier son potentiel.

2.2.6 Méthode par mesure de résistivité

La résistance électrique du bois est fonction de la teneur en humidité, de la température, de l'orientation et de l'essence de bois. Cette caractéristique est à la base de la méthode de mesure de l'humidité. Deux électrodes (pointes) sont insérées dans le bois à une distance précise choisie, permettant ainsi de mesurer la résistance électrique du bois. Cette technique est généralement utilisée pour des humidités de l'ordre de 6 à 30 % sur base sèche (soit 5 – 23 % sur brut) car c'est dans cette plage qu'une petite variation d'humidité entraîne une grande variation de la résistance électrique du bois. Pour des humidités plus élevées, la variation de résistance est faible [19].

Concernant l'influence de la température sur la mesure de résistance, pour une humidité donnée la résistance électrique diminue de moitié tous les 10°C [20]. Cette technique est relativement simple à mettre au point dans les conditions d'un tas de plaquettes. Elle n'est cependant pas adaptée pour l'échelle de mesure souhaitée, mais sera étudiée pour essayer d'élargir la plage de mesure.

3 Analyse des procédés de séchage naturel et artificiel de la biomasse

Cette partie traite des différentes solutions possibles pour sécher les plaquettes forestières. Parmi ces solutions, deux catégories existent : le séchage naturel où l'énergie nécessaire au séchage est apportée par une source d'énergie interne et le séchage artificiel où l'énergie nécessaire au séchage est apportée par une source de chaleur externe.

3.1 *Le séchage naturel des plaquettes forestières*

Cette partie traite des différents aspects du séchage naturel des plaquettes forestières. Les notions générales y seront présentées ainsi que des aspects de microbiologie et de chimie.

3.1.1 Le phénomène d'échauffement - généralités

Lorsque les plaquettes sont fraîchement broyées puis amoncelées, un échauffement du tas se produit.

Cet échauffement est dû à plusieurs phénomènes [21] à [23] :

- dans un premier temps, des cellules de bois encore vivantes contenues dans l'aubier, le cambium et l'écorce respirent et dégagent de la chaleur,
- ensuite, le développement de bactéries et de champignons libère aussi de la chaleur,
- enfin, lorsque la température du tas dépasse 65°C, une oxydation du bois apparaît.

Lors du broyage du bois, les cellules sont activées par le traumatisme subi lors du broyage. La respiration de ces cellules ne dure pas très longtemps. En revanche, lorsque le bois est stocké en grumes, les cellules peuvent rester vivantes jusqu'à six mois [24].

Les carbohydrates solubles contenus dans le bois sont le carburant permettant la respiration de celui-ci et le développement des bactéries. Les carbohydrates solubles sont en plus grande quantité dans les bois jeunes que l'on peut trouver dans les taillis à courte rotation

que dans les résidus forestiers. De plus, la quantité de carbohydrates solubles est plus importante pendant la saison d'été. D'une manière générale, le développement de bactéries est moins important chez les résineux que chez les feuillus car la quantité de carbohydrates solubles y est moins importante.

La quantité de chaleur produite, ainsi que la température au sein du tas de plaquettes dépendent de plusieurs caractéristiques du tas : la quantité de bois entreposé, la compaction du tas, la granulométrie des plaquettes, le type de bois utilisé et son humidité.

La production de chaleur est proportionnelle au volume de l'amoncellement, lui-même proportionnel au cube du rayon du tas. Dans le même temps, la perte de chaleur est proportionnelle à la surface du tas, donc au carré du rayon. Cette valeur limite du rayon est appelée « rayon critique » [25].

Il existe une relation théorique entre la température ambiante critique et le rayon critique du tas. Celle-ci a été précisée par *Tsuchiya et Surini* pour différentes matières (Figure 12).

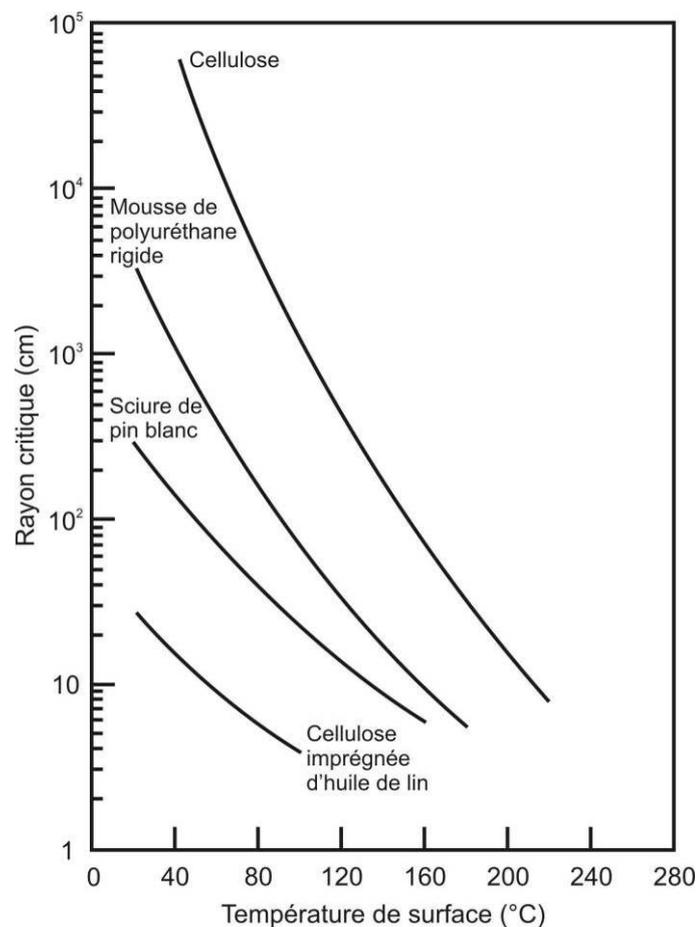


Figure 12 : Relation entre la température de surface et le rayon critique pour l'auto-inflammation [25]

Plus la température ambiante est élevée, plus le rayon critique diminue et inversement. Lorsque la température ambiante se situe juste en dessous de la température critique, la matière s'échauffe mais ne s'enflamme pas. Lorsqu'elle est légèrement plus élevée, une combustion spontanée peut se produire après une longue période.

La stagnation de la température au sein du tas est fortement influencée par son taux de compaction et la granulométrie des plaquettes. En effet, plus le tas est compact et plus l'espace entre les plaquettes est faible, plus les échanges par convection diminuent, ce qui fait que la chaleur stagne, favorisant le séchage, mais augmentant aussi les risques d'auto inflammation.

Plus les plaquettes sont petites (granulométrie basse), plus la surface en contact avec l'air est importante et plus les réactions sont importantes, augmentant la température du tas de plaquettes. La granulométrie est un paramètre plus influent sur l'élévation et la stagnation de la température que la hauteur du tas [22] [23].

Dans le cas des plaquettes forestières, une hauteur de tas d'environ 10 mètres paraît être le meilleur compromis [21].

L'auto inflammation est encore un phénomène mal connu, il semble que la température d'auto inflammation des plaquettes forestières en cours de fermentation soit inférieure à la température à laquelle l'oxydation du bois en présence d'oxygène devient exothermique (environ 200-250°C). Des études en thermo balance ont été menées mais n'ont pas permis d'extrapolation concernant la cause de l'auto inflammation des plaquettes forestières au cours du séchage naturel [26].

Pour des tas de faibles dimensions, un auto échauffement se produit également, mais la quantité de chaleur générée sera plus faible. De plus, il existe toujours dans un tas une zone sèche (à l'intérieur) et une zone beaucoup plus humide (en surface) due à la condensation de l'eau en surface du tas lorsque la température diminue ou à la reprise d'humidité due à la pluviométrie. Il est ainsi intéressant d'augmenter la hauteur du tas afin d'augmenter la proportion de bois qui sera plus sec. La Figure 13 représente la part de cœur du tas (partie du tas n'étant généralement pas sujette aux reprises d'humidité) en fonction de sa hauteur pour le stockage de plaquettes forestières à l'air libre [21].

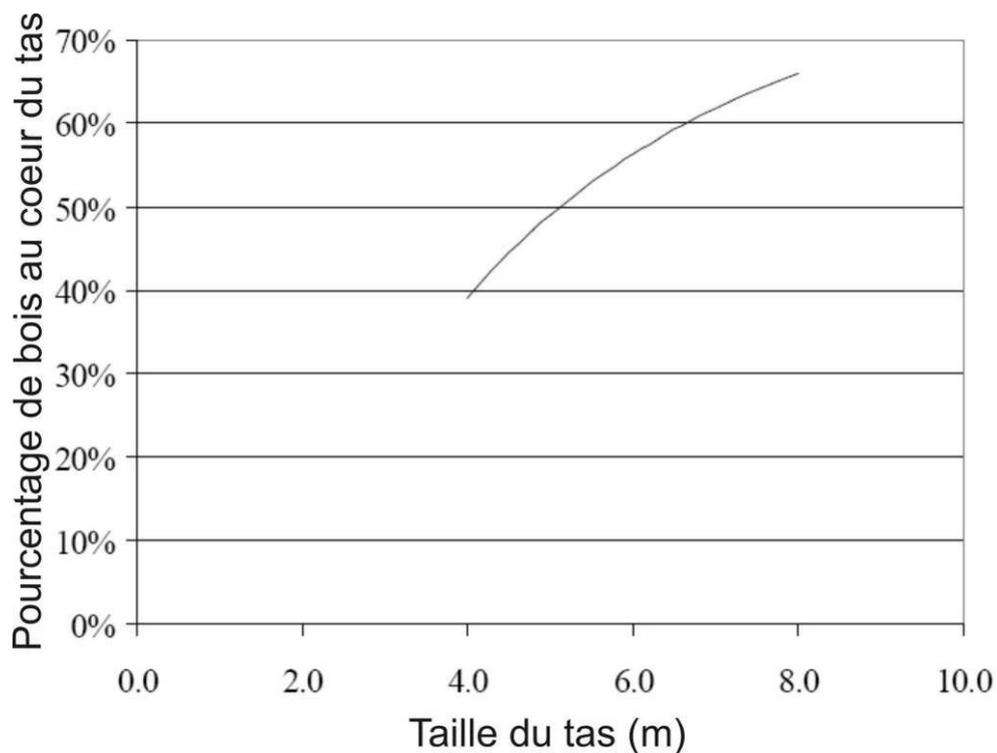


Figure 13 : Proportion de taille de cœur d'un tas en fonction de sa hauteur

Pour diminuer la proportion de bois humide d'un tas de plaquettes forestières, deux solutions sont couramment utilisées :

- le bâchage
- le stockage sous abri.

Dans le cas de plaquettes forestières stockées en tas et à l'air libre, la zone humide est de la forme suivante (Figure 14) [27].

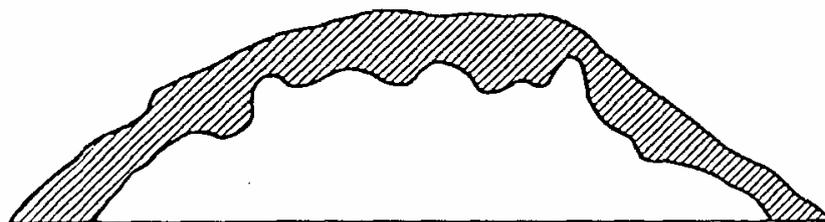


Figure 14 : Allure de la zone humide dans un tas de plaquettes forestières stockées à l'air libre

Lorsqu'un tas est stocké sous abri, la zone humide prend plutôt une des formes présentées sur la Figure 15.

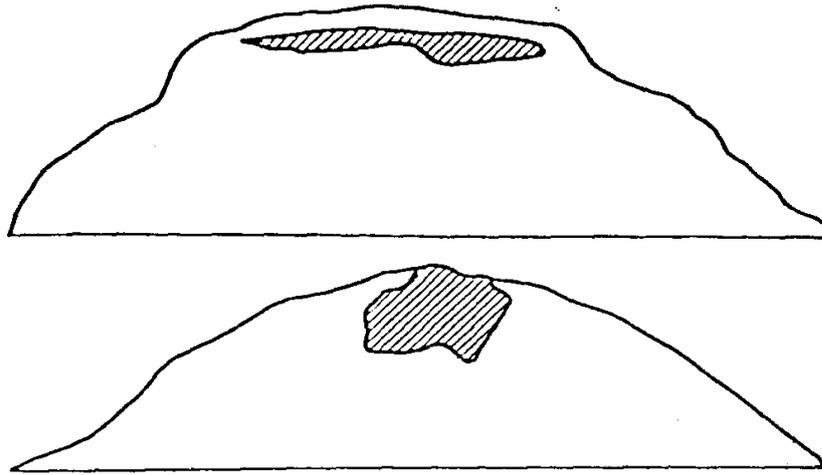


Figure 15 : Allure de la zone humide dans un tas de plaquettes forestières stockées sous abris

Lors du stockage sous bâche, il faut veiller à utiliser une bâche perméable à la vapeur d'eau car sinon, l'humidité ne diminuant pas, les plaquettes forestières finiront par se dégrader selon un phénomène proche du compostage [21].

3.1.2 Le phénomène d'échauffement - les réactions

La respiration des cellules produit de la chaleur à condition qu'elles soient encore vivantes. Cette respiration cellulaire serait la cause d'une perte de masse sèche du bois de 1%, ce qui correspondrait à une énergie de 160 kJ/kg sur base sèche. De plus, au delà de 40°C, la respiration des cellules s'accélère. En considérant l'énergie de vaporisation de l'eau à 2500 kJ/kg, cela représenterait une évaporation de 0,064 kg d'eau par kg de matière sèche. Pour des plaquettes à 50% d'humidité sur brut, l'humidité diminuerait alors de 1,7 % [21].

La réaction de fermentation se déroule en aérobie partielle. Le développement de bactéries dans le tas engendre la fermentation de celui-ci. Plus il y a de feuilles, d'écorces et de nutriments dans le tas, plus la fermentation est rapide et intense. Plus la quantité de lignine dans le bois est importante, moins la fermentation est forte. Ce développement a été identifié comme le phénomène produisant le plus de chaleur [21].

L'azote contenu dans l'écorce et le cambium est la source principale d'azote organique pour le développement de champignons. De plus, il y a 3 à 8 fois plus d'azote dans l'écorce que dans le bois. Plus il y a d'écorce, plus le développement fongique sera important. Parmi les champignons se développant dans les tas de plaquettes forestières, il y a des champignons

mésophiliques et des champignons thermotolérants. Ainsi durant toutes les périodes de séchage, des champignons sont présents. La variété que l'on retrouve le plus souvent à la fin du stockage et qui domine la flore est : *Aspergillus fumigatus* qui est actif entre 10 et 55°C [28][29]. Le taux de compaction du tas n'influe pas sur le développement des champignons. En revanche, dans les tas extérieurs la quantité de champignons sera moins importante que pour les tas de plaquettes stockés sous abri. Les développements de champignons sont plus faciles à obtenir en utilisant du bois de feuillus plutôt que du bois de résineux car les résines et les terpènes jouent le rôle de détergent, inhibant le développement des champignons. De même, les acides produits lors de la fermentation ont pour effet de freiner les actions biologiques.

Au delà de 65°C, la température est suffisamment élevée pour permettre une auto oxydation du bois. Les groupes acétyls attachés à la cellulose se détachent pour former de l'acide acétique. Ce phénomène provoque un noircissement du bois. Que ce soit lors de la fermentation ou lors de l'auto oxydation, la production d'acide acétique est plus importante chez les feuillus que chez les résineux en fonction des teneurs en cellulose et en hémicelluloses.

Ces réactions ont pour conséquence la production de chaleur et de nombreux composés : acides gras volatils à courte chaîne de carbone (acide lactique, acide acétique), alcools, eau, dioxyde de carbone, ...

3.1.3 Le phénomène d'échauffement - interprétations du point de vue microbiologique

Lorsque le bois vient d'être broyé, les cellules vivantes du bois se mettent en activité à cause du traumatisme subi lors du déchiquetage. Il en découle alors une phase de respiration aérobie des cellules qui produit de la chaleur, de la vapeur d'eau et du CO₂ par consommation de glucose. Les plaquettes étant stockées en tas, l'air est consommé et se renouvelle lentement, induisant une phase où les cellules vivantes du bois fonctionnent de manière anaérobie. Cette action consomme toujours du glucose mais produit dans ce cas du CO₂, de l'éthanol ou de l'acide lactique ainsi que de la chaleur mais en quantité moins importante que lors de la respiration aérobie. On a alors une phase de fermentation [30] [31].

Le Tableau 2 montre des analyses de plaquettes forestières issues de rémanents forestiers et de taillis à courte rotation avant et après une période de stockage de 12 mois. [21]

Composant	Après 12 mois de stockage	Taillis à courte rotation (après broyage)	Rémanents forestiers (après broyage)
pH	3,2		
Carbohydrates solubles dans l'eau (%)	Non analysé	1,94	0,68
Acide acétique (mg.kg ⁻¹)	5440	<325	<325
Acide lactique (mg.kg ⁻¹)	527	5774	1586

Tableau 2 : Composition d'échantillons avant et après stockage provenant de rémanents forestiers et de taillis à courte rotation

On note tout d'abord, le pH assez faible du bois après stockage ainsi que le lien qui semble exister entre quantité de carbohydrates solubles et quantité d'acide lactique. Il apparaît également une forte quantité d'acide lactique et une absence d'acide acétique avant stockage, alors, qu'après stockage, la tendance est inversée. Il semblerait donc que peu de temps après broyage, un ou plusieurs phénomènes ont produit de l'acide lactique et que pendant le stockage, un ou plusieurs autres phénomènes ont produit de l'acide acétique et potentiellement consommé l'acide lactique.

Les réactions dans le tas de plaquettes semblent se produire en anaérobie partielle. Les bactéries se développant au sein du tas de plaquettes forestières sont donc capables de fonctionner en aérobie et en anaérobie. Ces bactéries sont en général présentes en forêt et sont inoculées au bois lors du broyage.

Chez beaucoup de bactéries et de champignons, l'activité en anaérobie aboutit à la formation d'acide lactique : c'est la fermentation lactique [31]. La Figure 16 montre les deux voies cataboliques (aérobie et anaérobique) possibles pour assimiler du glucose chez les cellules végétales.

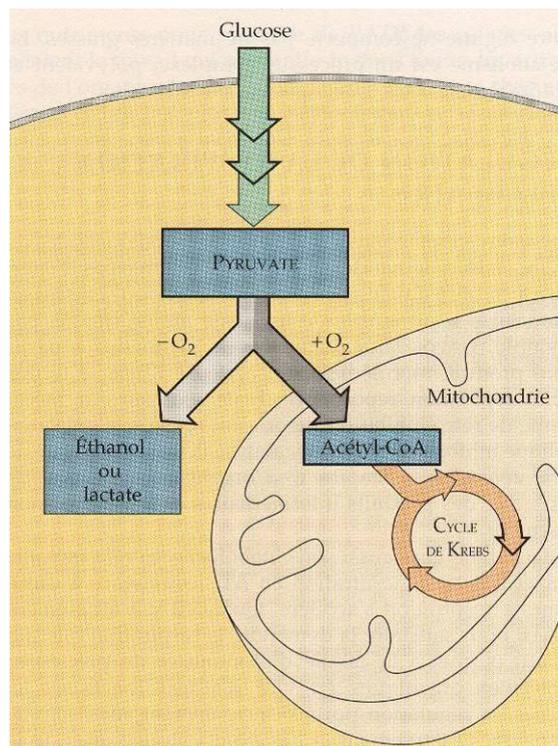


Figure 16 : Voies cataboliques possibles d'utilisation du glucose chez les cellules végétales capables de respiration et de fermentation

Après glycolyse du glucose en pyruvate, les cellules végétales capables de respiration aérobie et anaérobie peuvent produire du CO₂, de l'eau, de l'éthanol ou de l'acide lactique.

Le Tableau 3 montre quelques exemples de bactéries produisant des espèces chimiques que l'on retrouve dans les plaquettes forestières lors du stockage [29].

Espèce	Substrat	Produits
<i>Lactobacillus casei</i>	Glucose	Lactate
<i>Leuconostoc Mesenteroides</i>	Glucose	Lactate, éthanol, CO ₂
<i>Bifidobacterium bifidum</i>	Glucose	Acétate, lactate
<i>Escherichia coli</i>	Glucose	Lactate, éthanol, acétate
<i>Clostridia tyrobutyricum</i>	Glucose ou lactate	Butyrate, acétate, CO ₂
<i>Eubacterium limosum</i>	Glucose, lactate, pyruvate	Butyrate, acétate, CO ₂ , H ₂ , lactate (avec glucose)

Tableau 3 : Exemples de bactéries produisant du lactate, de l'acétate ou de l'éthanol

Ces bactéries ne sont pas forcément présentes lors du stockage du bois. Des études sur le compostage ont montré que les principaux genres de bactéries présents étaient de type : *Pseudomonas*, *Azotobacter*, *Escherichia*, *Proteus*, *Serratia*, *Erwinia*, *Bacillus*, *Lactobacillus*,

Streptococcus, *Corynebacterium* et *Arthrobacter* [32]. Il est alors cohérent d'imaginer retrouver les mêmes genres de bactéries lors du séchage des plaquettes forestières en tas.

D'après ces données, suite au broyage du bois, les cellules se mettent en action et les bactéries se développent très rapidement par la suite. L'acide lactique produit juste après broyage serait ainsi produit par des bactéries et les cellules du bois. Il n'y a pas, à priori, lors du compostage, de bactéries transformant l'acide lactique en acide acétique. L'acide lactique est peut être évacué lors du séchage des plaquettes forestières en même temps que la vapeur d'eau ou réutilisé par les bactéries ou les cellules de bois pour produire de l'énergie, du CO₂ et de la vapeur d'eau. Il semble également que les bactéries produisant de l'acide lactique soient plus actives en début de stockage des plaquettes forestières et que les phénomènes produisant de l'acide acétique prennent le relais par la suite. La quantité élevée d'acide acétique en fin de stockage pourrait venir du fait qu'en fin de fermentation, lorsqu'il n'y a plus beaucoup de glucose, l'énergie dégagée n'est pas suffisante pour évacuer la vapeur d'eau et les acides. Ainsi, les bactéries présentes lors du séchage des plaquettes forestières doivent pouvoir vivre en aérobie (où elles produiront le plus de chaleur) et en anaérobie (où elles produiront des acides). Il est d'ailleurs probable qu'au cours du séchage, il y ait alternativement des cycles de production d'énergie avec des montées en température et des cycles de production d'acides lors des phases d'anaérobie. Ces cycles seront induits par la présence ou non d'oxygène dans le tas.

3.1.4 Modifications chimiques du bois et perte de masse sèche

Lors du séchage, les réactions provoquant l'échauffement altèrent aussi le bois. Cependant, seulement de faibles changements (< 3 %) ont été observés en ce qui concerne les composants structuraux du bois : cellulose, hémicellulose, lignine. Les changements les plus importants ont été observés pour les extractibles extraits à l'éthanol. On peut observer une diminution d'environ 70 % de ces extractibles dans le bois (terpènes par exemple) [21] [23] [33] [34].

Lors du stockage, les quantités d'aubier et de cambium diminuent plus rapidement que la quantité moyenne de bois. De plus les petites plaquettes supportent mal les stockages de longues périodes car leur perte de masse sèche est plus importante.

Le Tableau 4 récapitule des données issues de la bibliographie sur les pertes de masse sèche lors du stockage.

Type de bois	Humidité initiale sur brut	Humidité finale sur brut	Perte de masse sèche en %/mois	référence	
Plaquettes de pin sans écorce	/	/	0,72	[35]	
Plaquettes de pin avec écorce	/	/	0,9		
Plaquettes de rémanents forestiers	/	/	3	[36]	
Plaquettes	25	15 à 20	0,25 à 0,8		
Plaquettes de bois de Bouleau	/	/	1 à 1,5	[37]	
Plaquettes	/	/	2,9	[38]	
Grosses plaquettes	/	/	0,3		
Plaquettes couvertes	45,5	30,0	2,0	[39]	
	53,5	42,5	1,0		
	58,0	47,0	1,1		
	49,6	48,0	2,9		
Plaquettes non couvertes	45,0	59,0	3,8		
	53,5	69,5	2,8		
Grosses plaquettes couvertes	44,0	29,5	1,7		
Grosses plaquettes non couvertes	44,0	52,5	1,7		
Plaquettes de bois de Bouleau non couvertes	32,0	29,0	0,1		[40]
	32,0	32,0	0,7		
	31,0	39,0	0,3		
Plaquettes stockées en container couvert	45,0	29,0	0,9	[41]	
Plaquettes de rémanents forestiers	56,0	29,0	1,9	[42]	
	56,0	44,0	1,2		

Tableau 4 : Pertes de masse sèche en fonction des cas

Généralement, il a été montré que la perte de masse sèche est inférieure à 3 % par mois de stockage ; elle est en moyenne comprise entre 1 et 2 %. Cette perte de masse sèche augmente lorsque le bois est peu âgé ou contient beaucoup d'écorces.

3.1.5 Émissions gazeuses lors du séchage en tas

Le séchage, de manière générale, est une source de polluants, principalement sous la forme de poussières et de composés organiques volatils (COV). Dans le cas du séchage naturel en tas, la quantité de ces polluants varie beaucoup avec le type de bois utilisé et la température atteinte au cours du stockage. Les températures de séchage plus élevées tendent à produire de plus grandes quantités de COV. Les particules qui sont émises lors du séchage en tas sont sous forme de spores de champignons dont la taille est inférieure à 20 μm [28].

Les émissions varient d'une essence à une autre, car les différentes essences réagissent différemment à la chaleur. Le Tableau 5 recense les principaux COV émis lors du séchage de plusieurs types de biomasses en étuve à 105°C, ainsi que leur proportion en pourcentage massique sur base sèche [43].

Type de biomasse	COV en % de la masse sèche	COV majoritaires
Ecorce de bouleau	0.30	2,6-Dimethylbicyclohept-2-ene (35%), 1,3,6,10-cyclotetradecatetraene (22%)
Plaquettes de bouleau	0.04	Hexanal (12%), 2-pentylfuran (8%)
Liège	0.05	Furfural (50%), phenol (22%)
Eucalyptus	0.03	Hexanal (16%), α -pinene (12%), 2-pentylfuran (11%)
Feuillus	0.004	Piperazine (58%), 2-pentylfuran (42%)
Rémanents forestiers	0.08	α -Pinene (25%), 3-carene (11%), 1,4-methanoazulene (14%)
Tourbe moulue	0.20	2-Cyclohexenecarboxanilide (21%), isoparvifuran (9%)
Miscantus	0.20	Naphtopyran derivative (40%), 1,4-methanonaphtalene (20%)
Noyaux d'olive	0.06	4-Hydroxobutanoic acid (14%), pyrazole (10%)
Ecorce de pin	0.15	α -Pinene (32%), β -pinene (8%)
Plaquettes de pin	0.06	α -Pinene (45%), β -pinene (12%)
Bois plein de résine	1.74	α -Pinene (35%), β -pinene (17%)
Cake de colza	0.04	2-Pentylfuran (34%), hexanal (18%), 1-pentanol (10%)
Saule	0.02	Hexanal (53%), 2-pentylfuran (30%)
Sciure	0.05	α -Pinene (45%), β -pinene (10%)
Ecorce d'épicéa	0.28	α -Pinene (30%), β -pinene (10%)
Plaquettes d'épicéa	0.04	α -Pinene (48%), β -pinene (13%)
Triticale	0.01	Hexanal (75%), 2-pentylfuran (25%)
Granulés de bois I	0.09	Hexanoic acid (7%), hexanal (6%); nonanal (4%)
Granulés de bois II	0.10	α -Pinene (8%), hexanal (6%), 3-carene (3%)

Tableau 5 : Principaux COV émis lors du séchage en étuve à 105°C pour différent matériaux de type biomasse

Dans le cas du séchage de plaquettes forestières, la température au sein du tas est moins importante : les composés émis doivent donc être présents en moins grande quantité. Cependant, il est possible que la présence d'acides produits au cours du séchage ait un effet sur la nature et la quantité d'émissions de COV et plus particulièrement de terpènes.

3.1.6 Différentes possibilités de séchage naturel

Les modalités de séchage en tas peuvent être très variées. Nous avons ainsi répertorié les principales techniques de séchage naturel : le séchage naturel à l'air libre avec ou sans bâche respirante et le séchage sous abri.

Séchage naturel sans bâche respirante

Ce type de séchage est généralement effectué en forêt, près du lieu de déchiquetage. Les tas mesurent le plus souvent 5 à 8 mètres de haut afin d'optimiser le séchage. La surface accueillant le tas est préparée pour être propre et plane, mais n'est pas bétonnée. Le coût de ces opérations est estimé à 0,12 €/m² au sol [44].

Séchage naturel sous bâche respirante (Toptex ou Lest'o)

Ce type de séchage est similaire au précédent mais une bâche respirante est utilisée pour éviter la reprise d'humidité due à la pluviométrie : la bâche laisse passer la vapeur d'eau qui sort du tas mais pas l'eau de pluie. Le coût d'une telle bâche est de 1,5 €/m² (en projection au sol si l'on couvre un tas) [44]. Pour faire des bilans économiques, il faudra aussi prendre en compte un coût de manutention de cette bâche.

Séchage naturel sous abri

Le séchage sous abri permet de ne pas avoir de reprise d'humidité et tous les problèmes liés à la manutention de la bâche sont évités (mauvais positionnement, envol par le vent, ...). Le coût d'un abri est d'environ 250 à 400 €/m² au sol [44].

3.1.7 Caractéristiques techniques du séchage naturel

Le temps de rétention du bois est d'environ 2 mois pour les grosses plaquettes forestières et 3 mois pour les plus petites. Les différentes techniques de séchage naturel ne

permettent pas d'atteindre la même humidité finale. Ces caractéristiques sont données dans le Tableau 6.

Température maximum dans le tas	Temps de rétention	Humidité sur brut finale
60 à 80°C	2 à 3 mois	35 % sans bâche 30 % sous bâche 25 % sous abri

Tableau 6 : Caractéristiques techniques du séchage naturel

La capacité d'évaporation dépend de la quantité de bois qui a été mise en tas. Les données répertoriées ici sont issues d'essais menés par des coopératives forestières et représentent des moyennes.

3.1.8 Avantages, inconvénients et risques du séchage naturel

Le séchage naturel en tas permet de sécher toutes sortes de plaquettes forestières et toutes les granulométries possibles. Ce type de séchage peut être installé partout et il est très économique. Le principal inconvénient est la difficulté de contrôle de l'humidité. De plus, si le tas est trop gros et les particules trop petites, le risque d'auto-inflammation est réel. Enfin, cette technique nécessite un important stock tampon, ce qui engendre des coûts non négligeables et un besoin de site de stockage.

3.2 Le séchage artificiel des plaquettes forestières

Les séchoirs présentés dans cette partie sont des séchoirs de type continu qui sont adaptés aux fortes productions. Les corps humides pénètrent dans la chambre de séchage de manière régulière et sont séchés pendant leur traversée. Les trois types de séchoirs présentés sont les plus aptes au séchage de plaquettes forestières dont la taille des particules est très

hétérogène. Ce tri dans les technologies de séchage a été réalisé suite à une étude technique complète pour les technologies de séchage utilisables sur la biomasse fragmentée. [45]

3.2.1 Séchoir tunnel

Le principe du séchoir tunnel est assez simple, le produit à sécher est transporté sur le convoyeur et l'air chaud effectue un passage forcé à travers le lit de produit. Ce type de séchoir est généralement décrit comme un convoyeur enfermé dans une boîte où circule de l'air chaud. Concernant l'encombrement, un séchoir tunnel mesure en général 2,5 à 3 m de large et 3 à 60 m de long pour des capacités d'évaporation de 0,1 à 4 t.h⁻¹ [46] à [56].

3.2.1.1 Les différentes configurations

En général, ce type de séchoir est très bien adapté pour sécher des particules allant de 1 à 50 mm. Cette technique implique de forcer le passage de l'air à travers le lit de produit. La plage d'humidité pour ce type de séchoir est très large : 95 % pour certains fruits en entrée à moins de 1% sur brut en sortie dans le cas de caoutchoucs synthétiques. Le temps de séjour du solide dans le séchoir est de 5 à 240 minutes. Il existe de nombreuses configurations, tant en termes de convoyeurs que de dispositions des flux d'air.

Les trois principales configurations sont :

- séchoir une passe, un étage,
- séchoir une passe, plusieurs étages,
- séchoir à passes multiples.

La Figure 17 présente un séchoir à une passe et un étage qui est le système le plus simple : il comporte un seul convoyeur qui achemine le produit de l'entrée à la sortie du séchoir [47].

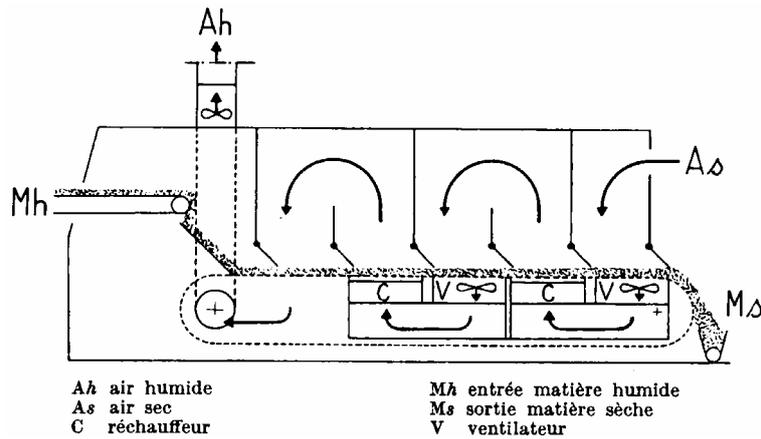


Figure 17 : Séchoir tunnel à une passe, un étage

Dans les séchoirs tunnels, l'air peut circuler à co- ou contre-courant ou encore à courant croisé. En général, il est préférable d'opter pour un séchoir tunnel à courant croisé qui augmente le transfert de chaleur et de masse.

3.2.1.2 Caractéristiques techniques

Les caractéristiques techniques de ce type de procédé sont données dans le Tableau 7 :

Vitesse du fluide	Température de fonctionnement	Temps de séjour du solide	Capacité d'évaporation
très variable	30 à 250°C	5 à 240 min	0,1 à 4 t.h ⁻¹

Tableau 7 : Caractéristiques d'un séchoir tunnel

En fonction des caractéristiques du produit à sécher, les principales variables sont le temps de séjour du produit dans la chambre, la vitesse de l'air traversant le produit à sécher ainsi que la température de l'air dans les différentes zones de la chambre. Le produit peut ainsi être refroidi en fin de traitement.

3.2.1.3 Coûts relatifs

De manière générale, la consommation énergétique thermique d'un séchoir tunnel est de 4000 à 6000 kJ.kg⁻¹ d'eau évaporée soit 1,1 à 1,7 kWh.kg⁻¹ d'eau évaporée. La consommation

énergétique électrique du séchoir dépendra du nombre de convoyeurs, du nombre de ventilateurs et de la consommation du système d'alimentation. Pour un séchoir tunnel à une passe et un étage d'une capacité de 2 tonnes par heure, la consommation énergétique électrique (ventilation et auxiliaires) est d'environ $0,1 \text{ kWh.kg}^{-1}$ d'eau évaporée pour une puissance électrique de 350 kW. L'efficacité d'un séchoir tunnel définie comme le rapport entre l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau et l'énergie totale consommée lors du séchage est comprise entre 40 et 60 %.

Le prix d'un séchoir tunnel est généralement compris entre 350 et 700 k€par t.h^{-1} d'eau évaporée.

3.2.1.4 Avantages, inconvénients et risques d'exploitation

L'avantage d'un séchoir tunnel est qu'il est très bien adapté aux produits difficiles à sécher et très polyvalent. Son principal inconvénient est son coût d'investissement élevé. Lors de l'utilisation d'un tel séchoir, il faut bien veiller à ce que le lit à sécher soit uniforme pour éviter toute baisse de qualité du produit en sortie de séchoir. Dans le cas de produits contenant des fines, celles-ci peuvent causer une détérioration du moteur du convoyeur s'il n'est pas bien protégé ; il faut donc veiller à un bon entretien des parties mobiles du séchoir. Il est aussi très important de bien protéger les fines des sources de chaleur (brûleur par exemple) afin d'éviter tout risque d'incendie ou d'explosion.

3.2.2 Séchoir à tambour rotatif

Un séchoir rotatif est constitué d'un cylindre pouvant être mis en rotation le long de son axe et légèrement incliné par rapport à l'horizontale. Le produit à sécher est introduit dans la partie supérieure du séchoir et progresse dans le cylindre au fur et à mesure des rotations du tambour pour ressortir en partie basse [46][47][51][54][56] à [60].

3.2.2.1 Les différents types

Les séchoirs rotatifs sont classés selon quatre catégories : directs, indirects, indirect-direts et spéciaux. Cette classification est basée sur la méthode utilisée pour le transfert d'énergie. Le transfert est direct quand la chaleur est ajoutée ou retirée du solide par un échange direct entre le gaz et le solide. Il est indirect lorsque le fluide de séchage et le produit à sécher sont séparés par une paroi de métal. Pour le séchage de plaquettes forestières et d'écorces, le séchoir rotatif direct est le plus adapté en termes de température de fonctionnement et d'efficacité énergétique.

La Figure 18 représente un schéma simplifié d'un séchoir rotatif direct [58].

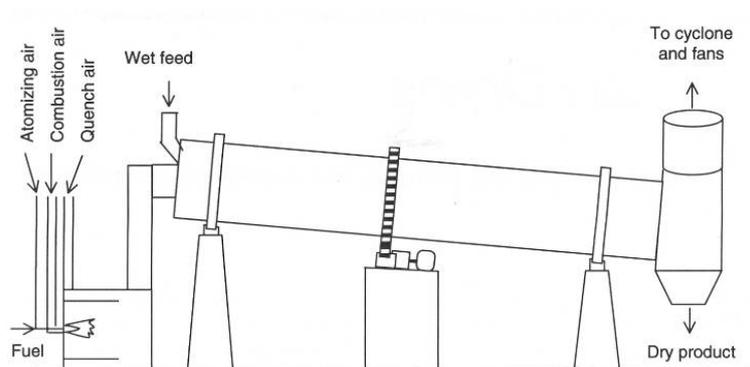


Figure 18 : Séchoir rotatif direct à co-courant

Les séchoirs rotatifs directs sont les plus simples et les plus économiques. Ils sont utilisés lorsque le contact entre le gaz de séchage et le produit à sécher n'est pas gênant. Cependant, si le produit que l'on veut sécher contient de fines particules, celles-ci risquent d'être entraînées à cause du débit et de la vitesse du gaz de séchage.

Le contrôle de fonctionnement de ces appareils est réalisé de façon indirecte, par la mesure des températures du gaz en entrée et en sortie, ce qui implique des difficultés concernant le contrôle précis de l'humidité des produits, notamment lorsque l'humidité d'entrée est variable.

Les séchoirs rotatifs sont moins sensibles aux fluctuations importantes de débit et de taille du produit et sont reconnus pour leur flexibilité et leur construction robuste. Leur coût de maintenance est faible. En revanche, c'est sur ce type de séchoirs que l'on rencontre le plus de risque d'incendie à cause des températures d'air élevées et de l'envol des fines.

Généralement, du point de vue économique, les séchoirs rotatifs offrent une des meilleures solutions. Du point de vue de l'encombrement, un séchoir rotatif mesure entre 2 et

5 mètres de diamètre et 10 à 15 mètres de long pour une capacité d'évaporation allant de 6 à 10 tonnes par heure.

3.2.2.2 Caractéristiques techniques d'un séchoir rotatif

Les caractéristiques techniques de ce type de procédé sont données dans le Tableau 8 :

Vitesse du fluide	Température de fonctionnement	Temps de séjour du solide	Capacité d'évaporation
1 à 2,5 m.s ⁻¹	230 à 1090°C	5 à 60 min	jusqu'à 10 t/h (simple passage) jusqu'à 60 t/h (triple passage)

Tableau 8 : Caractéristiques d'un séchoir rotatif

3.2.2.3 Coûts relatifs

En général, la consommation énergétique thermique d'un séchoir rotatif est de 4600 à 9200 kJ.kg⁻¹ d'eau évaporée soit 1,3 à 2,6 kWh.kg⁻¹ d'eau évaporée. La consommation énergétique électrique du séchoir dépendra de la consommation du moteur faisant tourner le cylindre, de la puissance de l'extracteur (s'il y en a un) et de la consommation du système d'alimentation. Globalement, cette consommation électrique est d'environ 0,1 kWh.kg⁻¹ d'eau évaporée pour une puissance du moteur du ventilateur variant de 500 à 900 kW lorsque la capacité d'évaporation passe de 20 à 30 t.h⁻¹. L'efficacité d'un séchoir rotatif définie comme le rapport entre l'énergie nécessaire pour l'évaporation de l'eau et l'énergie consommée lors du séchage est comprise entre 40 et 70 %.

Le prix d'un séchoir rotatif est généralement compris entre 100 et 200 k€ par t/h d'eau évaporée.

3.2.2.4 Avantages, inconvénients et risques d'exploitation

Les avantages d'un séchoir rotatif sont sa flexibilité en termes de granulométrie, sa robustesse et sa possibilité d'accepter des gaz à haute température. Du point de vue économique, les séchoirs rotatifs offrent souvent de bonnes solutions. L'inconvénient

principal de ces séchoirs est que l'humidité du produit à sécher n'est pas uniforme en sortie du séchoir. De plus, lors de son exploitation, la possibilité de combustion spontanée du produit séché doit être prise en compte.

3.2.3 Séchage « en lit fixe »

Le séchage « en lit fixe » est une méthode très attractive grâce à son efficacité sur les transferts thermiques et massiques. Ce type de séchage, a également l'avantage de ne modifier que très peu le matériau à sécher du fait des faibles températures d'air de séchage utilisées. La base du séchoir sur laquelle est entreposé le produit à sécher est généralement perforée. Ce type de séchoir est généralement utilisé pour de petites capacités de séchage, sauf pour le séchage du grain, où les plateformes peuvent être de grande capacité [54][61].

Il s'agit d'une bonne alternative aux techniques de séchage conventionnelles grâce à leur faible coût d'investissement et par la possibilité d'utiliser de l'air à basse température. Il est aussi possible de coupler ces séchoirs avec des systèmes solaires ou de récupération d'énergie fatale de certains procédés. La forme conventionnelle de ce type de séchoir est représentée sur la Figure 19 [54] :

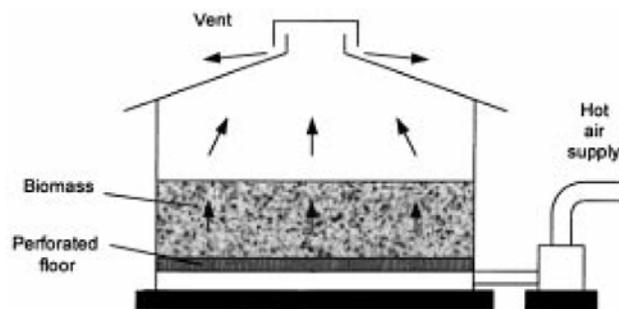


Figure 19 : Séchage en lit fixe

Le matériau à sécher est chargé sur le sol perforé afin de former un lit homogène en hauteur. L'air de séchage est mis en mouvement à l'aide d'un ventilateur et il est injecté par le sol perforé. Plus l'air de séchage est à basse température et humide, plus le temps de séchage sera long. Au fur et à mesure du séchage, un système de désilage retire le produit sec et un système de chargement complète le lit à sécher. Le fait de retirer le produit de cette manière permet d'avoir un matériau sec dont l'humidité est homogène, en effet, seul le produit sec (le plus en profondeur) est retiré en continu.

3.2.3.1 Caractéristiques techniques

Les caractéristiques techniques de ce type de procédé sont données dans le Tableau 9 :

Vitesse du fluide	Température de fonctionnement	Temps de séjour du solide	Capacité d'évaporation
0,1 m.s ⁻¹	20 à 100°C	plusieurs heures à plusieurs jours	jusqu'à quelques tonnes par heure

Tableau 9 : Caractéristiques du séchage « en lit fixe »

3.2.3.2 Coûts relatifs

La chaleur est généralement récupérée d'un autre procédé. Le seul coût énergétique est celui du ventilateur qui dépend de la hauteur du lit et de la surface sur laquelle l'air est distribué. On évalue habituellement ce coût énergétique à 0,2 kWh.kg⁻¹ d'eau évaporée.

3.2.3.3 Avantages et inconvénients

Les avantages de cette technique résident dans ses coûts d'investissement et de fonctionnement faibles. Il est possible d'utiliser une source d'énergie à basse température ; le contrôle du temps de séjour est relativement aisé et l'efficacité thermique est bonne.

Les inconvénients sont relatifs au temps de séjour important du solide, des pertes de charge importantes pour les lits trop épais et de l'empreinte au sol qui peut être importante.

4 Modélisation du séchage du bois

La modélisation du séchage du bois fait intervenir plusieurs phénomènes tels que les transferts couplés de masse et de chaleur que l'on peut décrire grâce à des bilans de matière et d'énergie. D'autres données caractérisant le bois sont également nécessaires telles que le

comportement statique et cinématique de l'eau contenue dans celui-ci et l'équilibre hygroscopique avec le milieu extérieur.

4.1 Bilans de matière et d'énergie

Pour résoudre un problème, on utilise en général des équations de bilan qui sont basées sur trois principes de conservation :

- Conservation de la matière,
- Conservation de l'énergie,
- Conservation de la quantité de mouvement

Le principe de conservation de la matière peut s'écrire selon un bilan de type :

$$\text{Débit sortant} - \text{débit entrant} + \text{débit d'accumulation} = \text{débit de production}$$

Le principe de conservation de l'énergie peut s'écrire comme ci-dessous :

$$\begin{aligned} \text{Débit d'énergie sortant} - \text{débit d'énergie entrant} + \text{débit d'accumulation d'énergie} \\ = \text{débit d'énergie thermique} + \text{débit d'énergie mécanique} \end{aligned}$$

Le principe de conservation de la quantité de mouvement s'écrit :

$$\begin{aligned} \text{Débit de quantité de mouvement sortant} - \text{Débit de quantité de mouvement entrant} \\ + \text{Dérivée temporelle de la quantité de mouvement} \\ = \text{Somme des forces extérieures appliquées au système} \end{aligned}$$

Dans le cas du séchage des plaquettes forestières en tas, des études ont été menées et un modèle basé sur les principes de conservation a été réalisé en modifiant un logiciel de simulation de séchage du grain (storedry), cependant nous n'avons pas réussi à avoir plus d'informations sur ce programme [63]. Pour notre étude, les modèles développés dans le chapitre modélisation (p 140) sont écrits sur la base de ces principes de conservation.

Le bilan matière sur l'eau nécessite de connaître le comportement du bois humide en contact avec de l'air plus ou moins humide. Ces données à différents équilibres seront ainsi recherchées sur nos échantillons pour pouvoir être prises en compte dans ces équations. De même pour le bilan d'énergie : dans le cas général, le transfert d'eau du bois vers l'air peut être pris en compte par l'intermédiaire d'un coefficient global de transfert qui traduit une vitesse d'échange de l'eau contenue dans le bois vers l'air. Comme précédemment, des essais et des mesures seront mis en œuvre pour estimer ce coefficient global de transfert qui sera mis en équation à partir de données bibliographiques.

4.2 Équilibre hygroscopique du bois

L'humidité d'équilibre du bois en fonction des caractéristiques de l'air ambiant peut être définie selon plusieurs relations plus ou moins empiriques en fonction des conditions expérimentales. Nous pouvons ainsi citer les équations développées par Langmuir, Dent, Guggenheim-Anderson-deBoer, Annon, Hailwood-Horrobin, Lartigues et Puiggali, ... [64]

Les plaquettes forestières étant généralement produites à partir de rémanents et de bois de faible valeur commerciale, les essences que l'on retrouve le plus souvent sont le bois de Sapin, d'Épicéa et de jeunes feuillus. Ainsi, parmi toutes les relations disponibles, nous avons choisi d'évaluer l'humidité absolue d'équilibre du bois à l'aide de la corrélation proposée par Lartigue et Puiggali [65] qui a été développée à partir d'essais sur du pin maritime qui est un résineux dont le comportement est à priori proche de celui du bois contenu dans les plaquettes forestières. Cette relation s'écrit :

A, B, C, Q : coefficients de la corrélation proposée par Lartigue et Puiggali

HR : humidité relative de l'air

T : température de l'air en Kelvin

X : humidité absolue d'équilibre du bois en kg d'eau par kg de bois sec*

$$X^* = \frac{\text{Ln}(Q)}{100 \cdot \text{Ln}(B)} \quad (1)$$

Avec :

- $Q = \frac{C - \ln(HR)}{A}$
- $A = - 2,86.10^{-5}.T^2 - 1,075.10^{-2}.T + 10,238$
- $B = - 5,414.10^{-4}.T + 1,0134$
- $C = 4,97.10^{-6}.T^2 - 2,667.10^{-3}.T + 0,3548$

Cette relation traduisant l'équilibre hygroscopique du bois permet de connaître l'humidité d'une pièce de bois placée dans une ambiance (température et humidité relative fixées) pendant un temps suffisant pour que son humidité ne varie plus. Pour les modèles de séchage, le coefficient de transfert de l'eau contenue dans le bois vers le milieu ambiant varie en fonction des conditions qui varient elles-mêmes au fur et à mesure que le bois sèche et que l'air se charge en eau.

4.3 Coefficient global de transfert

Dans le bilan d'énergie, il faut prendre en compte l'énergie nécessaire au transfert et à l'évaporation de l'eau. En première approche, ce besoin énergétique peut être caractérisé par un coefficient global de transfert. Les études menées par L. Chrusciel [66] ont montré une modification du coefficient de transfert global en fonction des paramètres suivants :

- Surface spécifique des particules,
- Vitesse de l'air de séchage,
- Température de l'air de séchage,
- Humidité relative de l'air de séchage.

L'équation établie lors de cette étude était représentative du séchage de planches de bois et non de plaquettes forestières, dont les dimensions sont différentes. De plus, les vitesses d'air étudiées sont inférieures dans notre cas. Le principe peut cependant être repris pour notre étude, l'équation étant de la forme :

$$\frac{1}{k_x} = a_0 \cdot \exp\left(\frac{c_0}{T}\right) \cdot e + b_0 \cdot \exp\left(\frac{c_0}{T}\right) \cdot u^{-n} \cdot \exp\left[\frac{-(1 - HR)}{(0,3 - X^*)}\right] \quad (2)$$

Dans cette équation, k_x est exprimé en $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, avec :

- a_0, b_0, c_0, n sont des coefficients dont les valeurs doivent être déterminées pour chaque type de séchage,
- e , l'inverse de la surface spécifique des particules en mm,
- HR , l'humidité relative de l'air,
- T , la température de l'air en K,
- u , la vitesse de l'air en m.s^{-1} ,
- X^* , l'humidité absolue du bois à l'équilibre avec l'air.

Enfin, pour modéliser le séchage naturel des plaquettes forestières en tas, il est nécessaire de pouvoir évaluer la quantité d'énergie produite durant leur stockage. Pour ce faire, une relation donnant la perte de masse sèche peut servir de base.

4.4 Perte de masse sèche de plaquettes forestières au cours du stockage

Une équation évaluant la perte de masse sèche (PB) des plaquettes forestières en fonction de la température et de l'humidité dans le bois a été mise au point par l'AFRC Siloe Research Institute [63]. La valeur de PB exprimée en % par mois est donnée par la relation :

$$PB = (-0,0066 + 0,3093.HR) \cdot \frac{\exp(0,1141.((T - 273) - 40))}{1 + (\exp(0,1141.((T - 273) - 40)))^2}$$

Avec :

- HR l'humidité relative de l'air
- T la température de l'air en K

A partir de cette relation et en imaginant en première approche que l'énergie libérée correspond à la perte de masse multipliée par le pouvoir calorifique, nous pouvons estimer la quantité de chaleur libérée lors du séchage naturel en tas.

5 Conclusion

Avec l'essor du bois énergie, l'utilisation des plaquettes forestières va augmenter, surtout pour les chaufferies de petites et moyennes puissances. L'enjeu est alors de fournir un combustible de qualité, avec des caractéristiques stables et homogènes, notamment pour l'humidité et la granulométrie.

Le séchage naturel en tas des plaquettes forestières a été expérimenté à maintes reprises de façon empirique, surtout pour évaluer les pertes de masse sèche ou les développements de champignons. Cependant, le suivi de l'évolution des caractéristiques n'a jamais été réalisé précisément, par exemple pour mesurer en continu l'évolution de la température dans les tas de plaquettes ou suivre l'évolution de l'humidité du bois durant son stockage. De même, on attribue aux différentes actions microbiologiques une échelle d'impact sur l'auto-échauffement des tas mais les influences réelles des différents paramètres tels que la granulométrie et la taille du tas sont peu étudiées.

Les données concernant le séchage en tas restent assez peu nombreuses, même si certaines coopératives forestières ont effectué des relevés, le but étant surtout économique. Les données sont alors peu précises et pas suffisantes pour bien comprendre les phénomènes et les modéliser.

Concernant la mesure d'humidité des plaquettes forestières pendant le séchage en tas, il n'existe à ce jour aucune méthode indirecte pour cette plage d'humidité, les solutions utilisées sont le retrait d'échantillons à des profondeurs peu importantes ou la création de tranchées dans le tas pour y faire des prélèvements. Ces deux techniques impliquent une modification des conditions d'essais. Le tas utilisé doit alors être très long (plus de 30 m) pour pouvoir effectuer plusieurs tranchées sans affecter le séchage dans tout le tas lors des prélèvements. Cette seconde technique nécessite beaucoup de manutention et l'utilisation d'outils spécifiques, débouchant sur des coûts importants.

Pour notre travail, il est donc important de commencer par mettre au point une technique de mesure de l'humidité au sein de tas de plaquettes forestières qui soit à la fois précise et non destructive. Pour mieux comprendre les phénomènes de séchage, il est important que cette mesure soit réalisée en continu et dans différentes parties du tas.

Les données bibliographiques recueillies concernant la modélisation du séchage du bois et des plaquettes forestières montrent la nécessité d'écrire un modèle basé sur les équations de conservation de la matière, de l'énergie et de la quantité de mouvement. Les relations concernant l'équilibre hygroscopique du bois, le coefficient global de transfert et la perte de masse sèche des plaquettes forestières au cours du séchage en tas serviront de base et pourront être modifiées pour alimenter les modèles ainsi mis au point.

Objectifs et déroulement de la thèse

Le bilan bibliographique réalisé précédemment a mis en évidence un certain nombre de points importants pour l'étude des modifications physiques et chimiques des plaquettes forestières et a également montré des manques qu'il apparaît nécessaire de combler pour mieux comprendre les phénomènes et ainsi modéliser et optimiser les modalités de stockage. Ainsi, les principaux points qui feront l'objet du travail de thèse sont les suivants :

- Étant donné les coûts d'investissement et d'utilisation des séchoirs artificiels, l'étude du séchage naturel en tas semble être la voie à privilégier dans le cadre de la valorisation énergétique ;
- Le suivi de la température et de l'humidité au sein d'un tas de plaquettes forestières n'est pas fait ou peu. Il apparaît donc primordial de mettre en place une technique de mesure et une série d'essais permettant de suivre ces données en continu ;
- L'obtention de ces données permettra alors de mieux comprendre les phénomènes régissant le séchage naturel et de mettre en place une modélisation de ce procédé pour tenter de l'optimiser ;
- Le séchage en lit fixe mobile étant à priori la principale autre solution économiquement viable pour les plaquettes forestières, des essais seront également réalisés avec cette technique, les données étant ensuite utilisées pour mettre en place un modèle ;
- Enfin, les données techniques n'étant pas les seules importantes dans le cadre de cette étude, des calculs technico-économiques seront aussi mis en œuvre pour sélectionner les choix optimaux.

L'ensemble de ces points sont présentés dans la suite du document.

Chapitre II : Matériels et méthodes

L'analyse bibliographique a montré que le séchage en tas des plaquettes forestières reste encore mal connu. En effet, même si les principaux phénomènes physico-chimiques qui s'y déroulent sont connus individuellement leurs impacts respectifs sur le séchage est difficilement quantifiable. Nous avons donc décidé d'examiner de façon précise le séchage en suivant en continu l'évolution de l'humidité et de la température au sein de différents tas en fonction des modalités de stockage.

1 Mesure de l'humidité dans le bois

1.1 *Cahier des charges*

Dans le cas étudié, les mesures d'humidité du bois doivent s'effectuer en continu au sein de tas de plaquettes forestières. L'humidité des plaquettes fraîchement broyées varie entre 50 et 60 % sur brut (soit 100 - 150 % sur sec) et la cible à atteindre est d'environ 20 - 30 % sur brut (soit 25 - 43 % sur sec). Les méthodes citées dans la bibliographie sont généralement inutilisables sur cette plage et n'ont jamais été calibrées pour ces fortes humidités.

Le système à mettre en œuvre doit pouvoir mesurer une humidité en un point ou sur une région assez restreinte au sein même d'un tas de plaquettes forestières. Pour ce faire, il faut que le système soit installé dans le tas sans modifier sa structure, ce qui fausserait les données. Le dispositif de mesure ne doit en outre pas modifier le déroulement du séchage. Ainsi, tous les systèmes de mesures sous forme de boîtes sont à exclure.

Enfin, la réalisation d'une cartographie des humidités au sein d'un tas de plaquettes nécessite de pouvoir effectuer la mesure à plusieurs endroits dans le tas en même temps ou dans un laps de temps assez court. Les tas de plaquettes étant le plus souvent stockés en forêt, loin de toute source d'énergie, le système devra aussi être économe en énergie pour pouvoir être alimenté par batteries si nécessaire.

Ainsi, la seule méthode qui paraît prometteuse est la mesure de résistivité électrique car elle permet une mesure locale grâce à un système de pointes insérées dans l'échantillon. Le

séchage en tas ne sera alors que très peu altéré. Le système est économe en énergie car il demande une courte période d'alimentation lors de la mesure : ce type de mesure est d'ailleurs déjà réalisé par des appareils portatifs à batteries pour déterminer l'humidité de pièces de bois. Enfin, l'humidité étant liée à la mesure d'une résistance électrique, il est aisé de faire passer des câbles électriques au sein du tas aux endroits où l'on souhaite effectuer une mesure. Même si les principaux critères semblent remplis, la mesure d'humidité par résistivité électrique reste peu précise sur notre plage de variation car la résistance varie peu. La Figure 20 donne la variation de la résistance électrique du pin blanc en fonction de l'humidité sur brut sur la plage de mesure des appareils portatifs. [62]

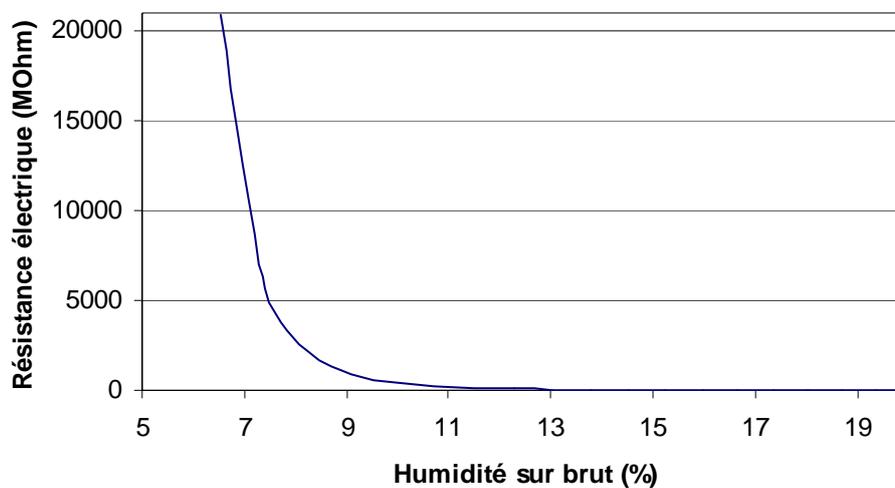


Figure 20 : Résistance électrique du pin blanc en fonction de l'humidité sur brut

Il apparaît clairement que cette mesure est précise sur une plage très courte pas du tout appropriée à notre besoin. Il est donc nécessaire de concevoir un système plus précis, puis de l'étalonner et de construire des abaques de résistance électrique du bois en fonction de son humidité.

1.2 Essais préliminaires

Une première série d'essais a été effectuée afin de déterminer la résistance électrique pour les fortes humidités. Parallèlement nous avons recherché une méthode pour mesurer de faibles résistances électriques. Les plaquettes forestières étant de taille relativement petite, la

première idée fut de placer deux tiges métalliques directement dans les plaquettes forestières, séparées d'une vingtaine de centimètres : l'augmentation de la distance entre deux électrodes doit faciliter la mesure.

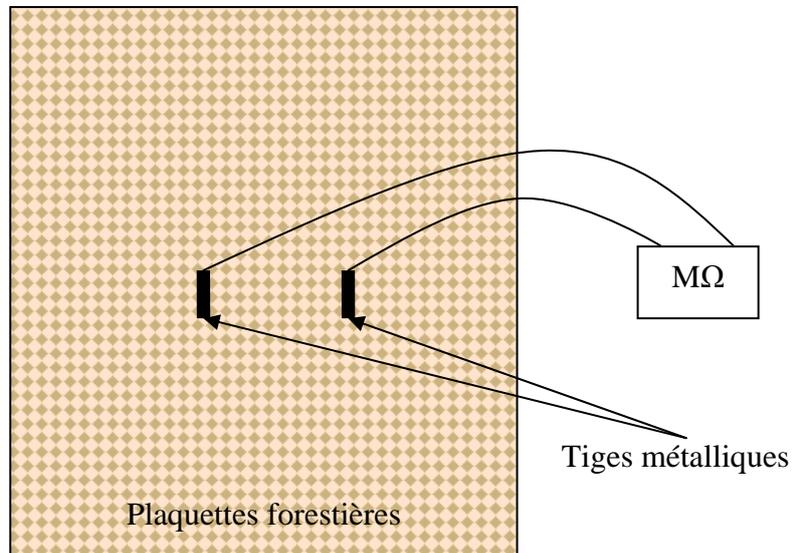


Figure 21 : Essai préliminaire de mesure de résistance électrique

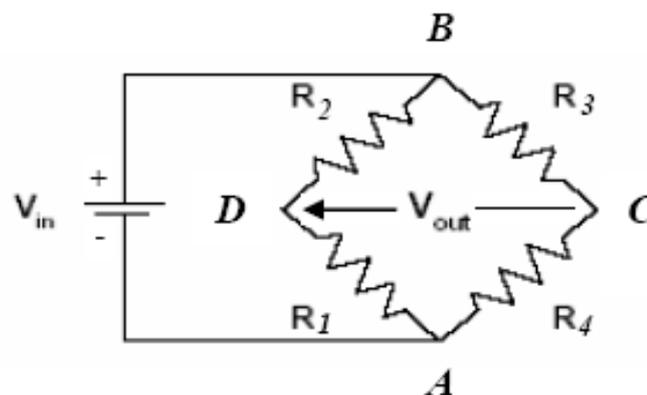
Les tiges métalliques utilisées étaient en acier recouvert d'une couche de cuivre. Lors de l'utilisation du méga-ohmmètre, nous avons observé que la mesure de résistance variait constamment. En effet, l'appareil délivre au niveau des tiges métalliques une tension continue de forte valeur, engendrant une électrolyse et faussant la mesure. De plus, l'action bactérienne dans les plaquettes forestières génère un potentiel entre les deux tiges métalliques et fausse la mesure. Pour améliorer les mesures, il nous a paru nécessaire de placer les deux électrodes au sein d'un même morceau de bois. Cependant, les plaquettes forestières étant relativement petites, cela est difficile. Le choix adopté est alors d'utiliser des échantillons de bois calibrés munis de deux clous et de mesurer leur résistance électrique pour en évaluer l'humidité. L'espacement entre les clous a été choisi à 5 cm. Plus la distance entre les clous est grande, plus la précision sera grande. Il faut cependant veiller à ne pas avoir un échantillon trop grand qui pourrait causer des dégâts dans les systèmes d'aménagement du combustible vers les chaudières. Enfin, un morceau de bois trop gros aura plus de difficulté à être toujours en équilibre hygroscopique avec les plaquettes l'entourant.

1.3 Système de mesure développé

Des études de suivi de séchage ont déjà été réalisées pour des produits de scierie en mesurant la résistance électrique du bois. Les méthodes usitées sont soit l'utilisation d'un appareil déjà calibré (pour des bois d'humidité inférieure à 30% sur sec) ce qui n'est pas possible dans notre cas, soit l'utilisation d'un mégohmmètre couplé à un multiplexeur. Ici encore, cette solution n'est pas viable car elle consomme trop d'énergie pour fonctionner sur batteries. La solution envisagée a alors été d'utiliser des connecteurs spéciaux pour ponts de jauge reliés à un pont de Wheatstone.

1.3.1 Principe du pont de Wheatstone

Un pont de Wheatstone est un instrument de mesure inventé par S. H. Christie en 1833, puis amélioré et démocratisé par C. Wheatstone en 1843. Il est utilisé pour mesurer une résistance électrique inconnue par équilibrage de deux branches d'un circuit en pont, avec une branche contenant le composant inconnu (Figure 22).



$$V_{out} = \frac{V_{in} (R_1 R_3 - R_2 R_4)}{(R_2 + R_1)(R_3 + R_4)}$$

Equation de base du pont

Figure 22 : Pont de Wheatstone

Le pont est constitué de deux résistances connues, R_1 et R_2 , d'une résistance variable de précision R_3 et de la résistance R_4 dont on cherche la valeur.

En pratique, le pont de Wheatstone comporte un ensemble de résistances calibrées, de façon à pouvoir mesurer une large gamme de valeurs de R_x avec une seule résistance de précision ; il suffit de changer le rapport R_1 sur R_2 .

Le pont est un moyen très précis de mesurer des résistances. Si l'on fixe les valeurs des résistances R_1 , R_2 , R_3 et de la tension d'entrée, il est très facile de connaître la valeur de R_4 par simple mesure de la tension V_{out} . Ce qui caractérise le montage est le pont, entre les points C et D, contenant un voltmètre qui détecte la tension lorsque A et B sont alimentés par une source électrique stable.

1.3.2 Matériel utilisé et réglage du pont

Lors d'essais préliminaires réalisés sur des éprouvettes en bois, la résistance électrique dans le sens des fibres pour une longueur entre pointes de 50 mm varie entre 100 k Ω et 5 M Ω pour des humidités sur brut variant de 60 % à 20 %. Le pont a alors été dimensionné pour pouvoir mesurer des résistances de l'ordre de quelques ohms jusqu'à 6 M Ω .

Le connecteur utilisé permettant de relier le pont de jauge à la centrale d'acquisition délivre une tension continue de 5 V et mesure la tension de sortie V_{out} pour des valeurs variant entre +2,6 V à -2,6 V.

Pour répondre à ces critères, les valeurs des résistances ont été choisies à :

- $R_1 = 50 \Omega$ (utilisation d'un potentiomètre de 100 Ω pour équilibrer le pont)
- $R_2 = 100 \Omega$
- $R_3 = 1 \text{ M}\Omega$
- $R_{4 \text{ équilibrage}} = 0,5 \text{ M}\Omega$ (précision 0,05 %)

Pour équilibrer le pont, il faut utiliser la résistance $R_{4 \text{ équilibrage}}$ et régler le potentiomètre pour que la valeur V_{out} soit nulle à 0,001 V près.

La Figure 23 représente la valeur de la résistance R_4 inconnue (bois) en fonction de la tension mesurée par la centrale d'acquisition.

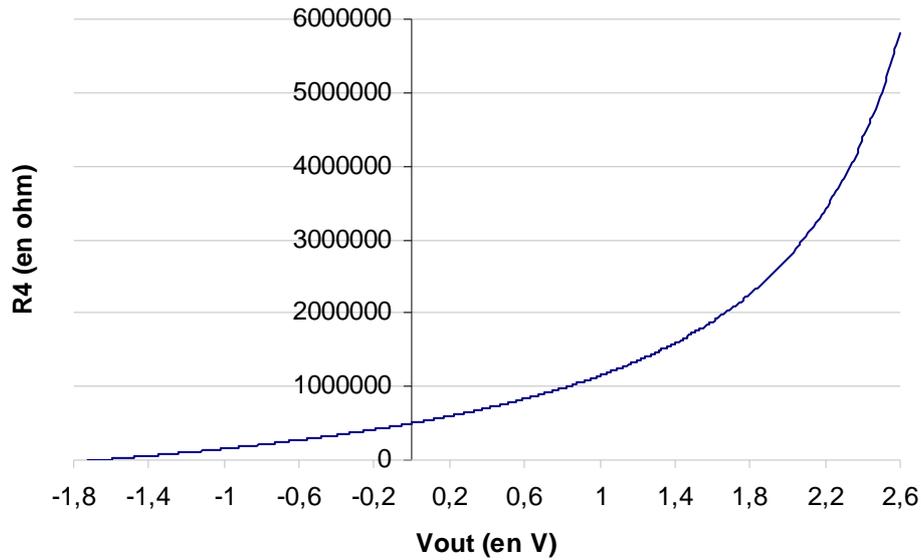


Figure 23 : Résistance électrique (calculée) en fonction de la tension mesurée

La précision de la mesure est ici supérieure à 99,8 % aux fortes humidités (où la variation de résistance en fonction de l'humidité est la plus faible) et elle est supérieure à 98,5 % aux faibles humidités.

Pour les expériences, deux systèmes ont été conçus :

- Un module contenant 10 ponts de Wheatstone pour réaliser les mesures dans les tas de plaquettes forestières
- Un module contenant 2 ponts de Wheatstone pour les essais de séchage en laboratoire afin de construire des abaques spécifiques à chaque sonde.

Pour éviter d'avoir 4 entrées et 2 sorties sur chaque pont de Wheatstone des modules, des fiches spéciales à 4 et 2 voies sont utilisées. (Figure 24)



Figure 24 : Module contenant 2 ponts de Wheatstone

1.4 Essais réalisés

Le module à 10 voies est installé sur site. Pendant ce temps, l'autre module sert à effectuer des essais de séchage afin de caractériser les éprouvettes de bois identiques à celles utilisées sur site (bois issu de la même planche).

Afin de déterminer les essences de bois à utiliser en tant qu'éprouvettes, des essais ont été réalisés sur des résineux et des feuillus. Les résultats préliminaires ont été obtenus en séchant du bois vert (humidité sur brut supérieure à 50%) dans une enceinte climatique. La résistance électrique du bois est mesurée par une centrale d'acquisition et l'humidité réelle est suivie par pesée de l'échantillon en continu. La résistance électrique du bois est mesurée dans le sens des fibres entre deux pointes métalliques espacées de 5 centimètres. Les essais ont montré l'importance du choix de l'essence de bois et du choix de l'échantillon. En effet, les essais menés sur les bois de feuillus se sont soldés par un échec. La structure anatomique du bois de feuillus étant hétérogène (présence de fibres, vaisseaux), la mesure de résistance électrique varie fortement selon les échantillons et ne permet pas de construire des abaques précises. Les essais menés sur les résineux ont montré des résultats beaucoup plus prometteurs. Cependant il vaut mieux éviter le choix d'essences produisant beaucoup de résines, qui elles aussi influencent la mesure de la résistance électrique du bois. Les éprouvettes utilisées lors des essais ont été choisies en bois de Sapin ou d'Épicéa, bois très courant dans nos régions.

Pour assurer une bonne reproductibilité, les échantillons sont choisis de droit fil et du bois issu de débits sur dosse est utilisé afin d'obtenir des éprouvettes dont les cerne sont orientés de la manière suivante (Figure 25) :

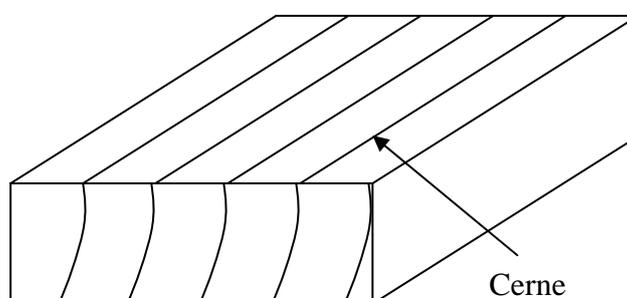


Figure 25 : Allure des éprouvettes utilisées

Les pointes métalliques doivent être plantées dans le même cerne. Pour les mesures nous choisissons de positionner les pointes de manière parallèle dans le bois de printemps,

plus tendre que le bois d'été. Planter les clous dans deux cernes différents aurait pour conséquence une mesure de résistance électrique du bois qui dépendrait du type de cerne (fin ou épais) que l'on traverse.

Pour chaque essai dans les tas de plaquettes forestières, les éprouvettes utilisées proviennent du même morceau de bois. Le bois utilisé est du bois vert, qui est ensuite transformé en éprouvettes de longueur 7 cm, de largeur 3 cm et d'épaisseur 0,5 cm. L'épaisseur des échantillons est choisie fine afin d'obtenir rapidement l'équilibre hygroscopique avec les plaquettes forestières environnantes. Après usinage des éprouvettes, celles-ci sont conservées dans l'eau pour les maintenir humides.

Au niveau pratique, lors des mesures réalisées sur sites, parallèlement au suivi du séchage des plaquettes forestières en tas, des essais en enceinte climatique sont effectués sur les autres échantillons provenant du même morceau de bois afin de construire des abaques permettant d'évaluer l'humidité du bois en fonction de sa résistance électrique. La Figure 26 et la Figure 27 montrent l'évolution de la résistance électrique d'échantillons en fonction de l'humidité sur brut du bois pour une température de 20°C.

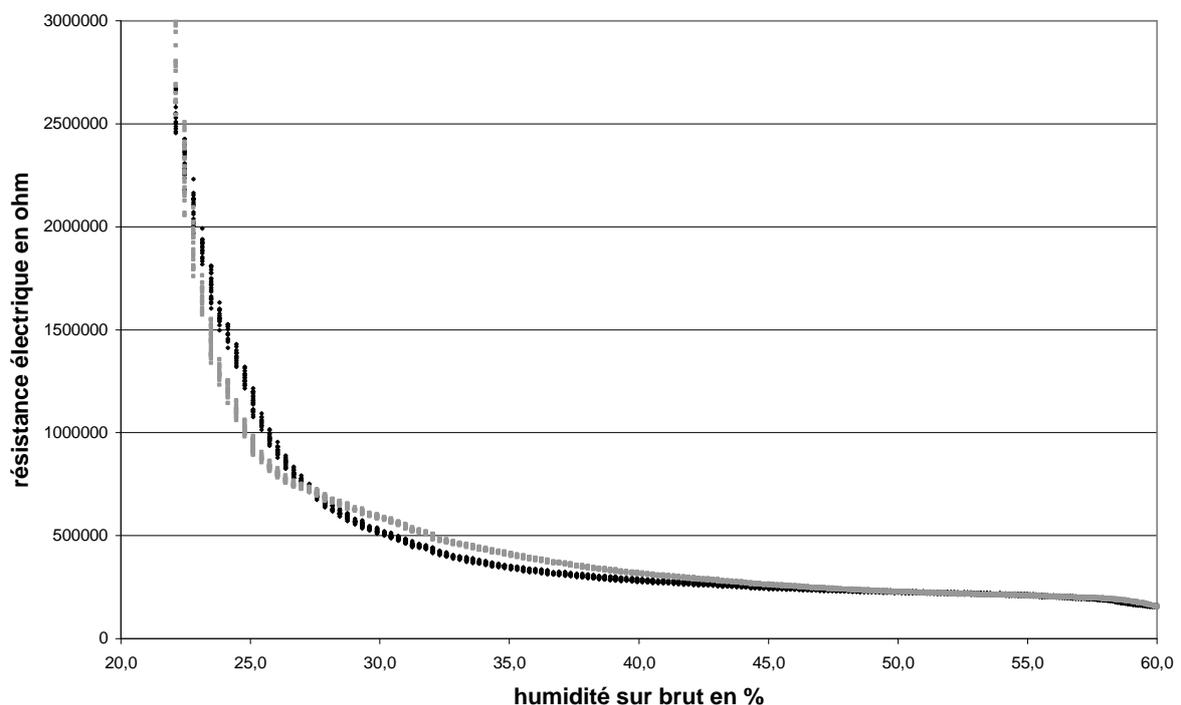


Figure 26 : Résistance électrique d'échantillons en bois de Sapin en fonction de l'humidité sur brut

La résistance électrique varie peu pour les humidités élevées, cependant, la précision de mesure est suffisamment bonne pour l'évaluer correctement même aux humidités élevées :

précision de l'ordre de 3 % d'humidité sur brut dans ce cas. Pour les humidités plus faibles, la différence de résistance entre les échantillons est plus grande mais l'humidité du bois reste néanmoins évaluée avec la même précision relative.

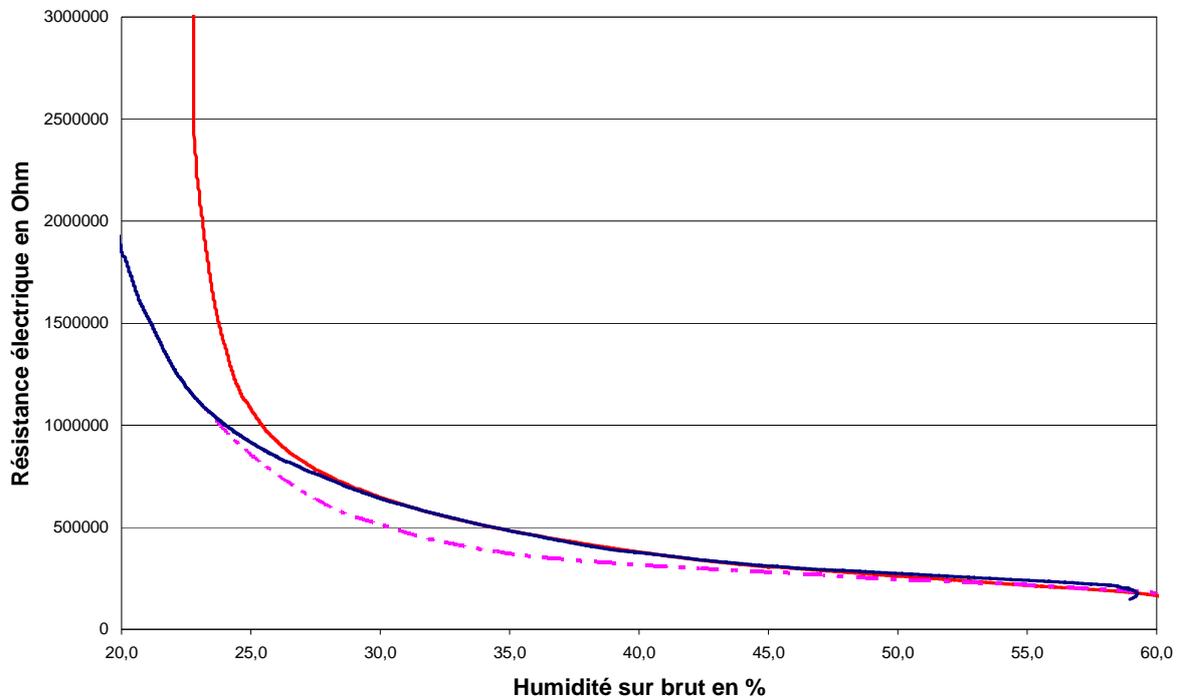


Figure 27 : Résistance électrique d'échantillons en bois d'Épicéa en fonction de l'humidité sur brut

Dans le cas des échantillons en bois d'Épicéa, l'allure générale est similaire à celle du sapin. On obtient également une bonne précision de l'évaluation de l'humidité en fonction de la résistance électrique même pour les fortes humidités.

Pour le traitement des données, la forme des courbes des Figure 26 et Figure 27 n'est pas facile à traduire mathématiquement. Cependant, en traçant l'évolution de l'humidité en fonction de l'inverse de la résistance, on obtient une courbe sensiblement linéaire et donc plus facile à mettre en équation. La Figure 28 montre l'évolution de l'humidité d'éprouvettes en bois de Sapin en fonction de la conductance, la série de points construite en fonction de la moyenne des essais étant représentée en noir et la dispersion en gris.

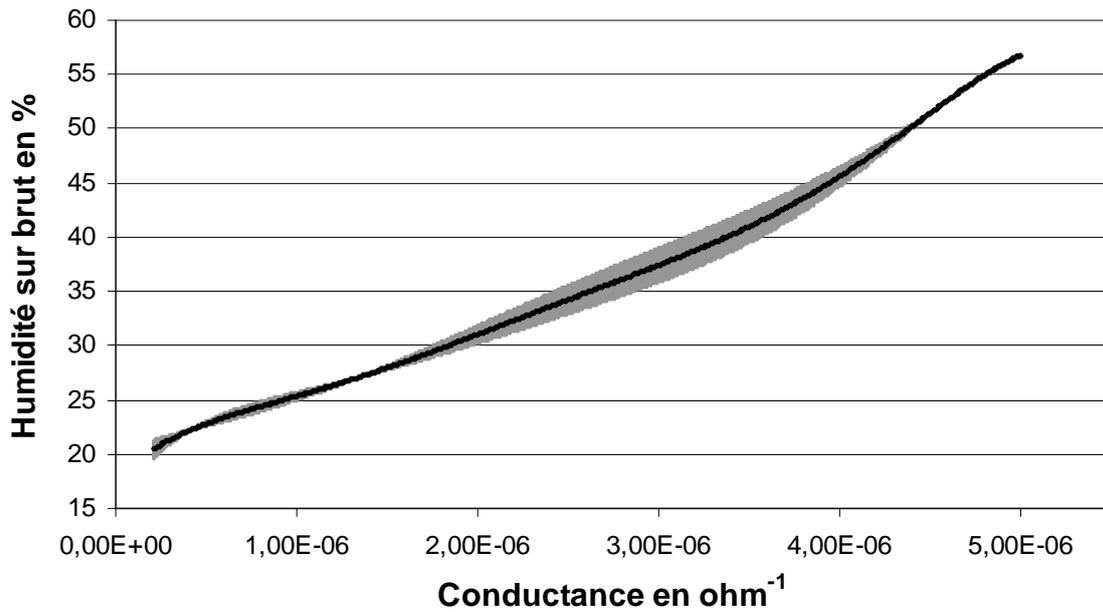


Figure 28 : Conductance d'échantillons en bois de sapin en fonction de l'humidité sur brut

La Figure 29 montre l'évolution de l'humidité d'éprouvettes en bois d'Épicéa en fonction de la conductance, la série de points noirs étant également construite en fonction de la moyenne des essais et la dispersion en gris. Dans ce cas, l'allure semble plus rectiligne que précédemment.

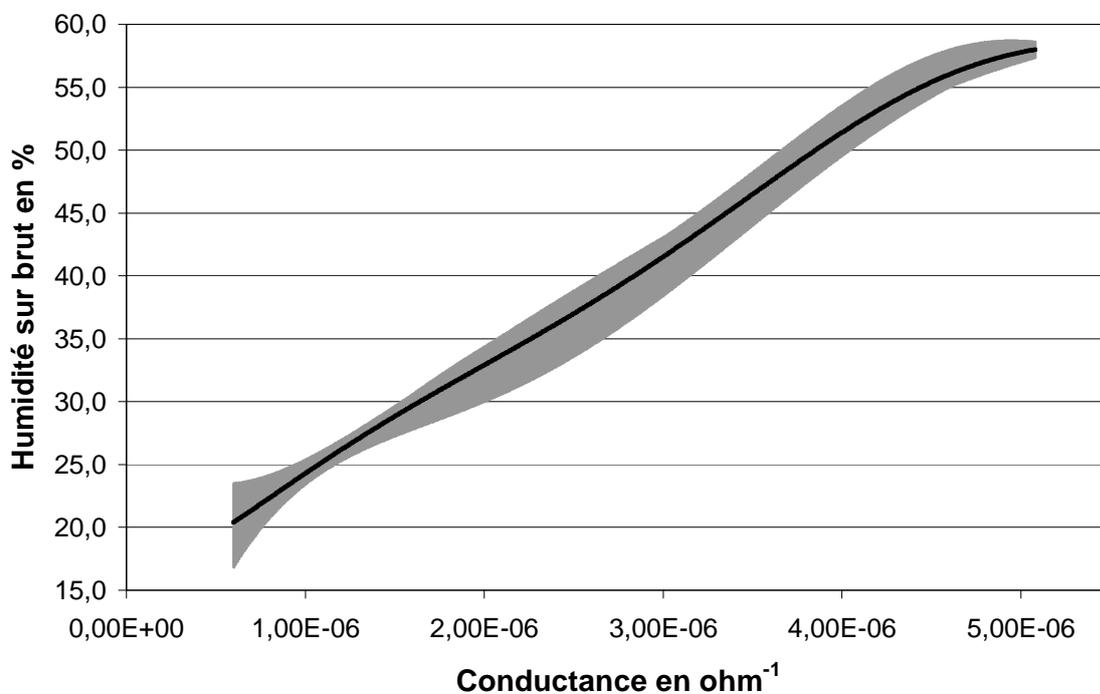


Figure 29 : Conductance d'échantillons en bois d'Épicéa en fonction de l'humidité sur brut

D'autre part, pour les deux essences les courbes d'humidité du bois en fonction de la conductance sont assez proches. Ainsi pour une conductance de $10^{-6} \Omega^{-1}$ l'humidité du bois dans les deux cas est très proche de 25 % sur brut. Pour une conductance de $5.10^{-6} \Omega^{-1}$ l'humidité du bois dans les deux cas se situe aux alentours de 55 - 60 % sur brut. Le bois de printemps du bois de Sapin et du bois d'Épicéa semble avoir des caractéristiques électriques relativement proches. En supposant que les variations sont linéaires, on obtient les équations de régression suivantes :

- *Sapin* : $HB\% = 7,51.10^6.G + 16,6$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 97,8$
- *Épicéa* : $HB\% = 8,29.10^6.G + 16,2$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 99,6$

Avec :

- G la conductance du bois en Ω^{-1} ,
- $HB\%$ l'humidité sur brut du bois en %.

Les équations obtenues sont relativement proches. Toutefois, pour chaque série d'essais de séchage en tas, la calibration sera réalisée à partir d'échantillons de bois issu des mêmes morceaux de bois utilisé pour les éprouvettes placées dans le tas. La loi obtenue sera appliquée pour exploiter les données de chaque série de mesures.

1.5 Remarques

Une imprécision sur les mesures peut être notée en fonction de la nature des pointes utilisées lors de la mesure de résistance. En effet, sous l'action des acides produits par l'action des bactéries, les pointes se transforment en anode et cathode. Nous avons tout d'abord utilisé des pointes en cuivre car elles s'oxydent beaucoup moins vite que des pointes en acier et leur autre avantage est d'empêcher le développement de micro-organismes dans la zone où se situe le cuivre. Cependant, l'oxydation d'une des deux pointes est impossible à éviter à cause des acides produits dans tout le tas par des bactéries et le potentiel électrique utilisé lors de la mesure. La Figure 30 montre l'état de quelques pointes en cuivre après séchage des plaquettes forestières en tas pendant trois mois.



Figure 30 : Pointes en cuivre après séchage en tas de plaquettes forestières

L'utilisation de pointes en cuivre peut donc poser des problèmes de mesure. Ainsi, si la pointe casse à cause d'une attaque trop importante, les mesures ne pourront plus être effectuées. Dans la suite des essais, nous avons utilisé des clous en acier inoxydable qui s'oxydent beaucoup moins durant les expériences.

Pour étudier les phénomènes physico-chimiques, la mesure de la résistance électrique seule ne suffit pas. Il faut également mesurer la température dans le tas. En effet la résistance électrique du bois dépend de l'humidité mais également de la température. Il faudra alors effectuer une correction sur les valeurs des résistances électriques mesurées. Il est également important de mesurer la température lors du séchage pour préciser l'influence de différents paramètres sur les variations de température et ainsi évaluer la quantité d'énergie produite par les réactions microbiologiques et d'oxydation.

2 Mesure des températures

Pour effectuer les mesures de température, des thermocouples sont utilisés. La taille des tas de plaquettes forestières étant assez importante, la distance entre le point de mesure et le système d'acquisition est grande. Il est donc nécessaire de choisir une méthode de mesure de température peu coûteuse, suffisamment précise et qui fonctionne en continu avec la possibilité de faire une acquisition de données via un signal électrique.

La mesure de température par des thermocouples est basée sur l'effet Seebeck. Un thermocouple est composé de deux fils métalliques de deux alliages différents. Les deux métaux a et b, de nature différente, sont reliés par deux jonctions (formant ainsi un thermocouple) aux températures T1 et T2. Par effet Seebeck, le thermocouple génère une différence de potentiel qui dépend de la différence de température entre les jonctions. Notons

que les thermocouples ne mesurent pas à proprement parler une température mais une différence de températures. Pour mesurer une température inconnue, l'une des deux jonctions doit être maintenue à une température connue, par exemple celle de la glace fondante (0°C). Il est également possible que cette température de référence soit mesurée par un capteur indépendant. La mesure de température est donc une mesure indirecte, puisque les thermocouples mesurent en fait une différence de potentiel électrique. Il est nécessaire de connaître la réponse du thermocouple utilisé en fonction de la température pour pouvoir relier la différence de potentiel électrique à la différence de température. La mesure passant par la détermination d'une différence de potentiel, sa précision dépend fortement du voltmètre utilisé.

Il existe plusieurs types de thermocouples. Tous sont utilisés pour une gamme précise de température de quelques degrés à quelques milliers de degrés. Les signaux électriques de ces sondes sont de l'ordre du microvolt au millivolt et non linéaires. Les signaux sont traités par des modules électroniques intégrant une fonction adaptée au thermocouple qui linéarise le signal et le corrige avec la soudure froide. Les avantages du thermocouple sont la fiabilité, l'encombrement, la mise en œuvre et le coût assez faible.

Les thermocouples utilisés lors des essais sont de type K : ils sont composés d'un fil en Chromel (alliage nickel + chrome) et d'un autre fil en Alumel (alliage nickel + aluminium (5 %) + silicium). Ils permettent une mesure dans une gamme de température large (-250°C à 1372°C) et sont de couleur vert et blanc.

Le système d'acquisition des données pour les essais doit ainsi être capable de mesurer la température à partir de thermocouples de type K et de faire fonctionner le système de mesure de résistance électrique des éprouvettes en bois. Il doit également être peu consommateur d'énergie et pouvoir fonctionner sur batteries.

3 Dispositif d'acquisition des données

Pour suivre l'évolution des réactions se produisant au sein d'un tas de plaquettes, des sondes comprenant un thermocouple et un dispositif de mesure d'humidité sont utilisées. La Figure 31 montre une éprouvette témoin munie des deux pointes servant à la mesure de

résistance électrique et d'un thermocouple pour le suivi de la température. Cet ensemble forme une sonde de mesure.

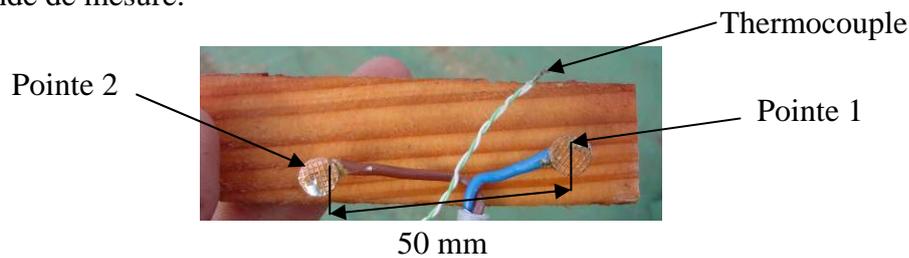


Figure 31 : Sondes utilisées lors des mesures de séchage en tas des plaquettes forestières

Les câbles associés aux sondes utilisées sont d'une longueur de 20 mètres pour permettre d'instrumenter des tas de plaquettes forestières mesurant jusqu'à 12 mètres de haut. Ces câbles sont composés d'une gaine électrique de diamètre 12 mm dans laquelle passe un fil thermocouple de type K et un câble électrique 2 brins. Afin d'effectuer une cartographie de l'humidité et de la température dans un tas de plaquettes forestières, 10 câbles de mesures ont été fabriqués.

Après installation dans le tas de plaquettes forestières, les sondes sont raccordées à une centrale d'acquisition de marque Almemo qui stocke les mesures toutes les heures (Figure 32). La centrale Almemo est un système d'acquisition dont les principales caractéristiques sont :

- Acquisitions par mesures modulaires à alimentation variable
- Sur chaque carte de circuit de mesures, une prise de sortie permet le raccordement à une sortie analogique ou à des contacts d'alarme
- Une programmation de la séquence de scrutation est possible par commandes de l'interface ; on gère le départ et l'arrêt de l'enregistrement des mesures, seuils ou entrée déclenchée depuis l'extérieur
- Mémoire de 512 ko soit environ 100000 mesures.
- Alimentation possible par batterie 12 V. La centrale peut se mettre en mode veille pour économiser l'énergie et ainsi réaliser des mesures toutes les heures pendant plus d'une semaine sur batterie.

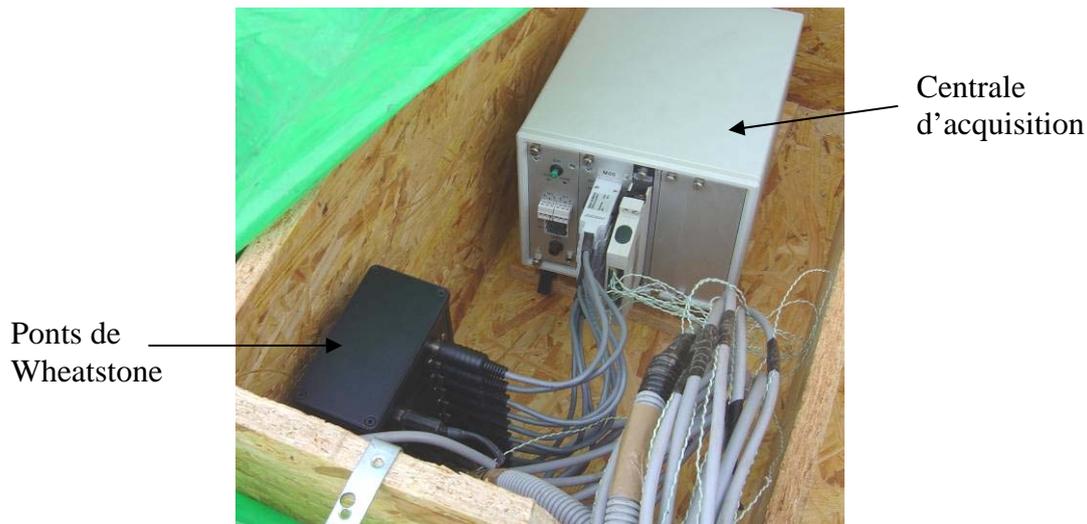


Figure 32 : Dispositif d'acquisition des mesures

Les fils des thermocouples sont branchés sur des connecteurs spéciaux de référence ZA9020FS, la compensation soudure froide étant réalisée par la centrale d'acquisition. Le dispositif à ponts de Wheatstone est branché à la centrale d'acquisition via des connecteurs ZA9650FS3 (Figure 33). Les bornes (+) et (-) alimentent le pont de Wheatstone avec une tension continue de 5V plus ou moins 0,05V et un courant de sortie maximal de 100 mA. Les bornes B et C mesurent la tension dans l'autre branche du pont de Wheatstone qui permet de calculer la valeur de la résistance inconnue (résistance de l'échantillon de bois). Le connecteur permet de mesurer des tensions de -2,6 à +2,6 V avec une précision de 0,001 V.

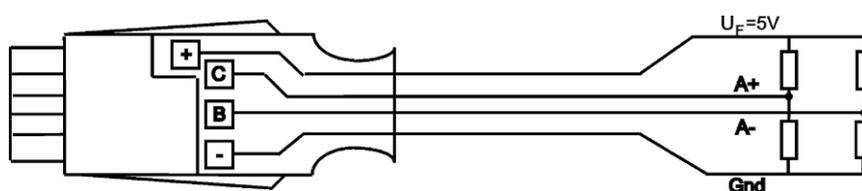


Figure 33 : Connecteur ZA9650FS3

La centrale d'acquisition est elle-même branchée à une batterie de 150 A.h⁻¹ qui lui permet une autonomie de 1 à 2 semaines. Pour plus de sécurité et pour une meilleure longévité des batteries, celles-ci sont changées toutes les semaines. En effet, les décharges profondes des batteries ont pour effet de diminuer grandement le nombre de cycles charge/décharge applicable.

Au début des essais, un échantillon de plaquettes forestières est prélevé pour déterminer leur granulométrie et l'humidité de départ.

4 Mesure de répartition granulométrique

La bibliographie ayant montré que la granulométrie a une influence non négligeable sur le séchage des plaquettes, nous avons également caractérisé ce paramètre. La mesure des différentes fractions granulométriques s'effectue à l'aide d'une machine vibrante sur laquelle différents tamis peuvent être utilisés (Figure 34).

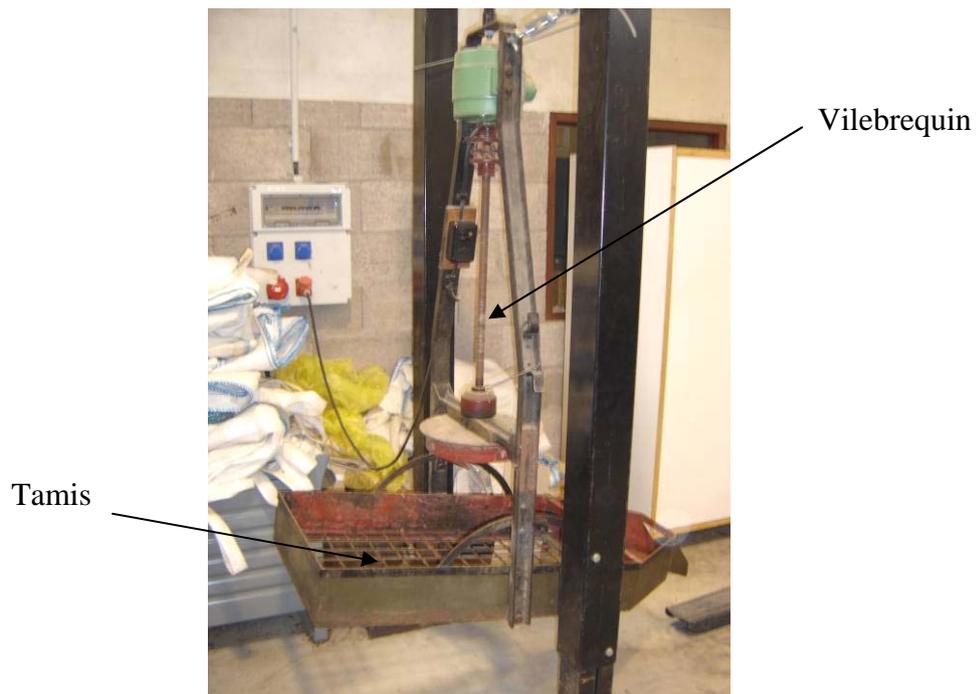


Figure 34 : Dispositif d'analyse de répartition granulométrique

Les tamis utilisés ont des mailles carrées dont les dimensions sont les suivantes :

- 6x6 cm
- 3x3 cm
- 1x1 cm
- 0,5x0,5 cm
- 0,2x0,2 cm
- 0,1x0,1 cm

Le dispositif permet de séparer les plaquettes par fractions granulométriques en utilisant des tamis de plus en plus petits. Chaque fraction granulométrique est pesée afin de connaître la masse par catégorie de tamis. La Figure 35 montre un exemple de répartition granulométrique pour des plaquettes forestières de taille moyenne à grossière (voir partie Granulométrie à la page 43), la proportion des plaquettes aux dimensions inférieures à 6x6cm et supérieures à 0,2x0,2 cm est représentative.

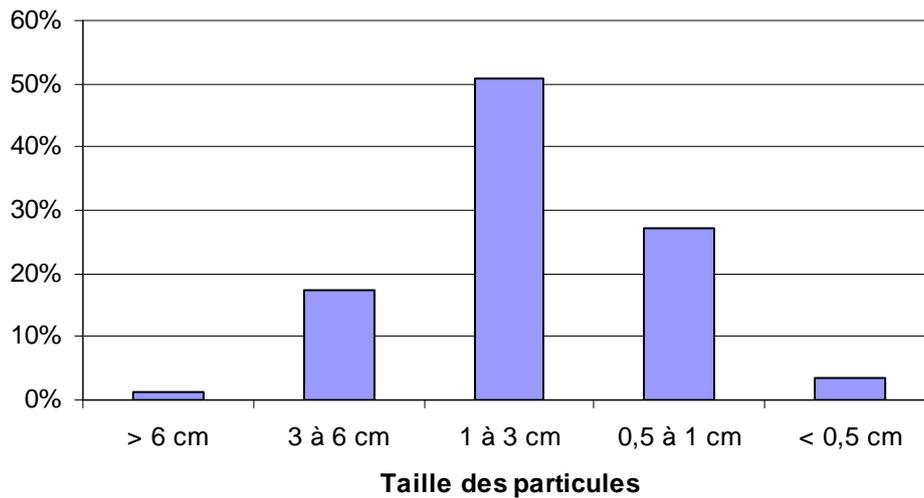


Figure 35 : Exemple de répartition granulométrique (1)

La Figure 36 quant à elle montre un exemple de répartition granulométrique pour des plaquettes forestières dont le type est compris entre les plaquettes fines et les plaquettes moyennes.

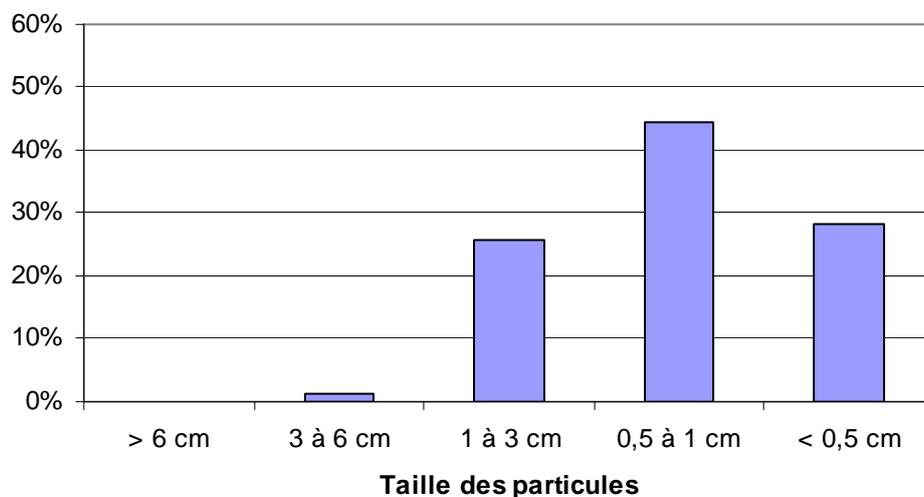


Figure 36 : Exemple de répartition granulométrique (2)

Lors de l'étude du séchage naturel des plaquettes forestières en tas, ces deux types de plaquettes forestières ont été utilisés.

5 Qualification des gaz effluents

Le séchage étant lié à une multitude d'actions biologiques et chimiques, des gaz sont émis. Il nous est apparu intéressant de qualifier ces gaz. Les composés recherchés étant des molécules aromatiques, des terpènes et des alcools, le système le plus approprié pour les prélèvements est le piégeage sur des cartouches adsorbantes, puis l'analyse par couplage GC-MS. Tenant compte de la composition des gaz, l'adsorbant Tenax GR a été choisi. Il est composé de 70% d'une résine polymérique poreuse (2,6-diphénylène-oxide) et de 30% de graphite. Cet adsorbant est régulièrement utilisé en désorption thermique pour des applications comme le piégeage de composés organiques volatils et il est particulièrement adapté aux milieux très humides, comme dans notre cas.

Pour les analyses, un système chromatographique en phase gazeuse Clarus 500 GC (Perkin-Elmer, Shelton, CT, USA) couplé avec un spectromètre de masse Clarus 500 MS quadripôle (Perkin-Elmer) a été utilisé. Le chromatographe est équipé d'un injecteur split/splitless contrôlé électroniquement (Figure 37).



Figure 37 : Vue d'ensemble du thermodésorbeur et du système d'analyse chromatographique

La chromatographie phase gaz est une technique analytique qui permet la séparation des constituants d'un mélange en phase homogène gazeuse. La séparation est basée sur

l'entraînement différentiel des gaz à travers la colonne : les temps de parcours de chaque constituant dépendent de leurs propriétés intrinsèques (taille, structure, ...) ou de leur affinité avec la phase stationnaire (polarité, ...). En bout de colonne, le détecteur (ici le spectromètre de masse) mesure en continu la quantité de chacun des constituants du mélange.

La spectrométrie de masse est une technique de détection extrêmement sensible qui permet de déterminer des structures moléculaires. Le principe de la spectrométrie de masse est le suivant : le composé introduit est ionisé par bombardement électronique. L'ion ainsi obtenu, appelé ion moléculaire, permet la détermination de la masse molaire du composé. Il peut y avoir des ruptures des liaisons chimiques au sein de l'ion moléculaire, formant ainsi des ions fragments caractéristiques puisque cette dissociation éventuelle ne se fait pas au hasard mais selon des mécanismes connus. Ces ions fragments sont ensuite séparés en fonction de leur rapport masse/charge par l'application d'un champ magnétique et/ou électrique, puis collectés par un détecteur. L'ensemble de ces ions fragments constitue le spectre de masse dont la lecture permet l'identification de la structure moléculaire.

Lors des mesures, la colonne utilisée pour la séparation des composés chimiques est une colonne capillaire Elite-5 ms (5 % diphenyl / 95 % dimethyl polysiloxane, 60 m x 0,25 mm, épaisseur de la phase de 0,25 μm , Perkin-Elmer). L'hélium (Alphagaz 2, Air Liquide, Nancy, France) est utilisé comme gaz vecteur.

Le spectromètre de masse est utilisé en mode ionisation (énergie d'ionisation de 70 eV). La source d'électrons et la ligne de transfert sont chauffées respectivement à 250 et 330°C. La détection des composés est réalisée en mode balayage avec un scan de m/z 20 à m/z 350.

L'analyse des composés adsorbés sur les tubes est réalisée à l'aide d'un désorbeur thermique TurboMatrix (Perkin-Elmer) couplé avec le système GC/MS (Clarus 500 GC/MS, Perkin-Elmer).

La désorption thermique des tubes est réalisée à 330°C durant 30 minutes avec un débit d'hélium de 50 $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$ (désorption primaire). Les composés chimiques désorbés du tube sont alors injectés (durant ces 30 minutes de désorption primaire) sur un piège froid de Tenax TA (phase adsorbante) maintenu à -25°C. A la fin de la désorption primaire, le piège froid est rapidement chauffé de -25°C à 330°C (désorption secondaire) puis maintenu à 330°C durant 30 minutes. Les composés chimiques sont alors injectés depuis le piège froid sur la colonne

capillaire Elite-5ms via une ligne de transfert chauffée à 250°C, avec un débit de split (seconde division) de 5mL.min⁻¹.

La programmation de température du four du chromatographe est la suivante : maintien à 30°C durant 5 minutes puis chauffage de 30°C à 330°C avec une vitesse de 5°C.min⁻¹ puis maintien à 330°C durant 10 minutes. Le débit de gaz vecteur (hélium) est approximativement de 1,2mL.min⁻¹ (1,72.10⁵ Pa à 20°C).

6 Mode opératoire

Avant chaque essai, le volume de bois à mettre en tas doit être connu afin d'évaluer sa taille finale. A partir de cette étape, l'emplacement des sondes est déterminé pour obtenir une configuration des sondes similaire à celle de la Figure 38.

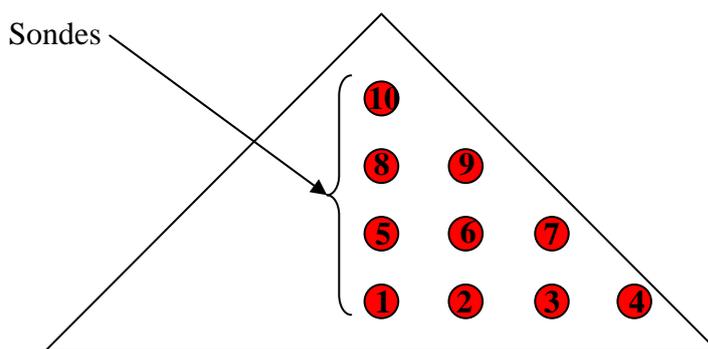


Figure 38 : Disposition des sondes au sein des plaquettes forestières

Cette configuration permet par symétrie de quadriller la totalité du tas. En effet, les tas de plaquettes forestières sont construits en forme de cône, ou en une forme ressemblant à un andain. Les deux distances caractéristiques de l'emplacement des sondes sont l'écartement entre celles-ci et la distance entre le sol et le premier niveau de sondes.

Le bois est livré soit par camion à fond mouvant, soit par camion benne. Le bois est déchargé juste à côté de la zone où l'on souhaite construire un tas de plaquettes instrumenté. Les plaquettes sont ensuite manipulées à l'aide d'un engin de manutention à bras manuscopique.

Les sondes ne peuvent être placées après la mise en tas des plaquettes forestières et doivent être disposées pendant la constitution de celui-ci. Les sondes sont préparées avant la mise en tas des plaquettes forestières et sont disposées au fur et à mesure de sa constitution par couches successives, les sondes étant placées entre ces différentes couches. La Figure 39 montre une étape intermédiaire de l'instrumentation d'un tas de plaquettes forestières. Les câbles sur le bas de la photo sont reliés aux 4 sondes de la partie basse du tas, les câbles apparaissant au dessus de la couche de plaquettes forestières sont reliés aux trois sondes de mesure du premier niveau du tas. La hauteur obtenue grâce à l'engin de manutention n'étant pas assez précise, l'utilisation d'une pelle à gravas permet ensuite d'obtenir la hauteur désirée.

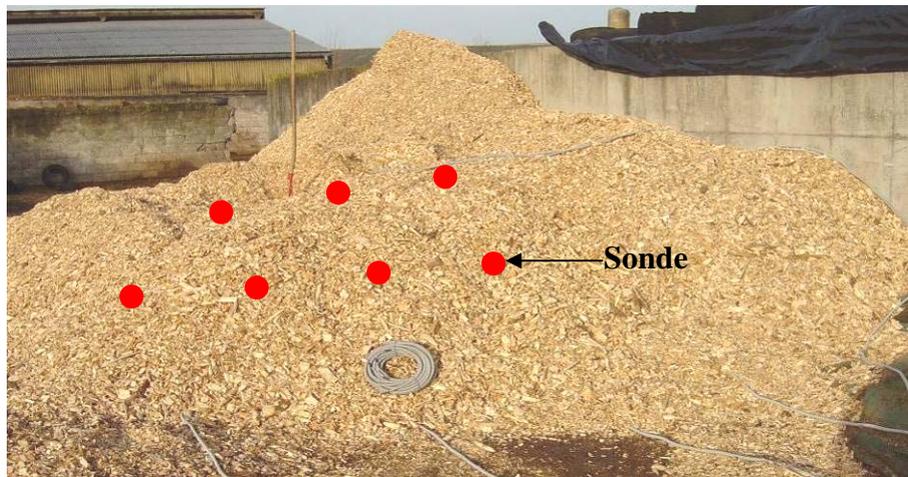


Figure 39 : Étape intermédiaire d'instrumentation

La Figure 40 montre un exemple de tas de plaquettes forestières instrumenté. Dans cet exemple, les sondes sont disposées dans la partie gauche du tas, qui n'est pas contre le mur. Le système d'acquisition est situé à proximité du tas dans un coffre à l'abri de l'humidité.



Figure 40 : Exemple de tas de plaquettes forestières instrumenté

Lors de la réception des plaquettes, un échantillon de quelques litres est prélevé afin de les caractériser en termes de répartition granulométrique et d'humidité. Les données suivantes sont répertoriées : type de bois, date de coupe, date de son broyage, de sa livraison et le type de stockage effectué.

L'acquisition des données est programmée pour s'effectuer toutes les heures, on obtient ainsi pour toutes les sondes la valeur de la température et de résistance électrique de chaque zone à intervalle régulier. Cela permet, après traitement des données, d'avoir une cartographie de l'évolution de l'humidité et de la température en différents endroits en fonction du temps. Les données acquises sont récupérées chaque semaine lors du changement de la batterie.

A la fin de la période de séchage, les sondes sont récupérées si possible. Les échantillons sont pesés et mis à l'étuve pour déterminer leur humidité. Ces mesures nous permettent de qualifier le degré de précision de nos mesures d'humidité par mesure de la résistance électrique et donc de valider notre calibration.

7 Conclusion

Les essais préliminaires de résistance électrique du bois ont permis de définir la plage de résistance électrique qu'il est nécessaire de pouvoir mesurer afin d'évaluer l'humidité du bois dans la plage considérée.

Le système de mesure mis au point utilise le principe du pont de Wheatstone. Cette méthode permet une mesure très précise de la résistance électrique du bois et ce en utilisant peu d'énergie. Le système de mesure de résistance électrique et de température développé est sobre en termes de consommation électrique et peut être utilisé sur batterie, loin de toute source d'énergie.

Les abaques mises au point ont été réalisées sur des résineux, les feuillus étant moins homogènes structurellement. Les essais réalisés sur du bois de Sapin et du bois d'Épicéa montrent que le comportement de ces deux bois est similaire concernant l'évolution de la résistance électrique en fonction de l'humidité. Néanmoins, pour chaque essai de séchage en tas, les échantillons utilisés pour le suivi de la résistance électrique proviennent de la même planche de bois et la corrélation utilisée pour relier la résistance électrique à l'humidité est

déterminée à partir d'échantillons de la même origine. Cette précaution permet d'obtenir une précision maximum pour les mesures.

Lors des essais, la répartition granulométrique du bois a été déterminée à l'aide d'un dispositif muni de tamis vibrants. Le séchage naturel en tas de plaquettes forestières de deux types de granulométries a été étudié : des plaquettes de tailles fines à moyennes ou bien des plaquettes forestières de tailles moyennes à grossières.

Lors de certains essais, des échantillons de gaz émis sont prélevés sur des cartouches adsorbantes. Les composés à capter étant principalement de la catégorie des terpènes, l'adsorbant Tenax GR a été choisi. L'analyse est ensuite réalisée à l'aide d'un système de chromatographie en phase gazeuse muni d'un spectromètre de masse. Ces analyses permettront de mieux comprendre les phénomènes physicochimiques se déroulant lors du séchage des plaquettes forestières en tas.

L'analyse des différents essais présentés dans la partie suivante permettra de mieux comprendre les aspects physiques et chimiques du séchage naturel en tas et d'essayer d'appréhender la variabilité des mesures afin de déterminer les paramètres les plus influents.

Chapitre III : Résultats et discussion

Le séchage naturel des plaquettes forestières dépend de nombreux paramètres, certains contrôlables et d'autres non. Parmi les paramètres de base, la modalité de stockage est relativement facile à maîtriser, les principales techniques étant les suivantes :

- Directement à l'air libre
- Sous bâche étanche
- Sous bâche respirante de type Toptex ou Lesto
- Sous abri (type hangar).

Durant la période de dimensionnement et de mise au point du système de mesure de l'humidité du bois, des essais de comparaison des différents modes de stockage ont été réalisés. Les relevés effectués concernent des températures au sein du tas et des mesures d'humidités en début et en fin d'essais. Ensuite, des essais plus complets ont été effectués et seront présentés dans la suite du chapitre.

1 Essais préliminaires concernant les modes de stockage

Cette première série d'essais a été faite pour vérifier le fonctionnement de la centrale d'acquisition sur batteries. Ainsi, seules les mesures de températures au sein du tas ont été réalisées. Pour ce faire, un tas d'une longueur de 30 m et d'une hauteur de 4 à 5 m, composé de bois de feuillus, a été divisé en 3 parties avec des modalités de stockage différentes (Figure 41) :

- Une zone couverte par une bâche respirante Toptex (couleur verte)
- Une zone couverte par une bâche agricole (couleur noire)
- Une zone sans bâche, directement à l'air libre

Le tas a été constitué durant l'hiver, des précipitations de neige ont eu lieu pendant la période de stockage.



Figure 41 : Essai préliminaire de comparaison des modes de stockage

Du point de vue de l'auto-échauffement, le comportement des parties à l'air libre et sous bâche Toptex est similaire, avec un temps de chauffe du tas d'environ 1,5 à 2 mois. Sous la partie couverte d'une bâche étanche, la montée en température se fait de manière plus lente mais la phase de chauffe dure plus longtemps (2 à 2,5 mois). La raison de cet échauffement plus long est certainement due à l'impossibilité qu'a la vapeur d'eau de s'échapper : celle-ci est arrêtée par la bâche et redescend dans le tas après condensation. Cette eau a pour effet d'alimenter la réaction de fermentation des plaquettes. Le but recherché ici étant de sécher les plaquettes, ce principe n'est pas satisfaisant, car il concourt plutôt à la production de compost, en diminuant fortement la masse de bois stocké.

Lors de cette expérience, les mesures d'humidité d'échantillons prélevés (à 50 cm sous la surface du tas à une hauteur de 2 mètres) après deux mois de stockage montrent peu de différences entre le mode de stockage à l'air libre et le mode de stockage sous bâche Toptex (Tableau 10). La faible pluviométrie pendant cette période, n'a engendré que peu de reprise d'humidité dans le tas. Sous la bâche agricole, les plaquettes ont peu ou pas séchées. Le stockage sous bâche agricole (imperméable) est donc à proscrire dans le cadre du séchage naturel.

	humidité (en %)
sans bâche	30,6
bâche Toptex	27,5
bâche agricole	39,3

Tableau 10 : Humidités sur brut obtenues selon le mode de stockage.

Les mesures obtenues grâce aux thermocouples laissent présager une production maximale de chaleur dans la zone centrale du tas. Ces résultats seront confirmés par les autres essais décrits ci-après.

Une seconde série de mesures du même type a été effectuée sur des plaquettes de résineux stockées en tas et sous un hangar. Des thermocouples ont alors été insérés dans des plaquettes ayant déjà été stockées en tas et pré-séchées. Cette expérience permet de voir l'influence d'un rebrassage sur un tas ayant déjà fini sa phase de fermentation. Le tas a été constitué grâce à un tracteur muni d'un godet, les plaquettes ne sont donc pas tassées. Dans cette expérience, la granulométrie des plaquettes était fine-moyenne.

Les mesures de température montrent une reprise de l'auto échauffement de l'ordre de 5 à 10°C. Les plaquettes étant broyées depuis plus de 3 mois, la production de chaleur ne peut pas être due à la respiration des cellules de bois. De plus, comme le tas était constitué de bois de résineux, le développement de champignon doit être réduit et ne pas être la cause principale de cet échauffement. Il semble donc que l'action de bactéries soit la principale cause à l'origine de la reprise de la production de chaleur au sein du tas.

Pour la suite des essais, le choix d'instrumenter des tas de plaquettes forestières stockés soit sous bâche Toptex, soit sous hangar a été fait. En effet, le bois étant vendu au kWh, l'objectif premier est de privilégier l'obtention d'un bois sec, ce qui ne peut être obtenu qu'avec ces techniques.

Après la mise au point du système de mesure, des essais ont été programmés selon un plan d'expérience. Pour construire le plan, les paramètres contrôlables ont été déterminés. Le paragraphe suivant passera en revue ces différents paramètres ayant une influence sur le séchage et proposera ceux retenus pour l'élaboration du plan d'expérience.

2 Paramètres du séchage en tas

L'analyse bibliographique a permis de répertorier les paramètres influents du séchage des plaquettes forestières en tas, à savoir :

- l'essence de bois utilisé,
- la fraîcheur du bois avant broyage, caractérisée par la durée entre l'abattage et le broyage,
- la granulométrie,
- l'humidité initiale du bois,

- la proportion d'écorce et de feuilles,
- (la pluviométrie),
- le taux de compaction du tas,
- la température extérieure,
- le volume de bois amoncelé ou la hauteur du tas.

Les paramètres faisant intervenir les conditions extérieures (pluviométrie et température extérieure) ne peuvent pas être contrôlés, même si l'abri ou la bâche atténue fortement l'effet de la pluviométrie. Ce sont donc des paramètres qui seront uniquement suivis.

L'humidité initiale du bois est également un paramètre non maîtrisable. Le taux de compaction dépend de l'outil de manutention utilisé et il est difficilement quantifiable. Il ne sera pas étudié comme un paramètre indépendant lors des essais mais sera décrit dans les caractéristiques d'essais.

L'essence de bois utilisée ainsi que la proportion de bois et d'écorces ne sont pas maîtrisées non plus sur les tas industriels. Ces conditions opératoires seront également décrites dans les caractéristiques de l'essai.

Le Tableau 11 recense les différents essais menés avec l'outil de mesure complet évaluant l'humidité du bois et la température dans le tas en détaillant les données liées aux conditions initiales de mise en tas ainsi que les paramètres listés ci-dessus.

référence	lieu	date	type de stockage	taille du tas	type de bois	granulométrie	humidité sur brut initiale
Essai 1	Mirecourt	15/01/2008	air libre sous Toptex	4 à 5 m	vieux résineux	moyenne-grosse	36
Essai 2	enstib	25/03/2008	air libre sous Toptex	2 à 3 m	feuillus frais	fine-moyenne	50
Essai 3	Mirecourt	25/06/2008	air libre sous Toptex	4 à 5 m	feuillus frais	moyenne-grosse	45
Essai 4	Vagney	10/07/2008	sous hangar	4 à 5 m	vieux résineux	fine-moyenne	45
Essai 5	enstib	19/12/2008	air libre sous Toptex	2 à 3 m	vieux feuillus	fine-moyenne	38,6
Essai 6	enstib	19/03/2009	air libre sous Toptex	2 à 3 m	feuillus frais	fine-moyenne	46,8

Tableau 11 : Essais menés avec suivi en continu de l'humidité et de la température

Dans le paragraphe suivant, chacun des essais sera décrit plus précisément.

3 Essais réalisés

3.1 Essai 1

Le tas constitué à Mirecourt le 15/01/2008 provient de bois de résineux stocké sous forme de bois rond en bord de route pendant plus de 6 mois. La quantité de bois utilisée lors de l'essai est de 90 m³ (soit la contenance d'un camion à fond mouvant) et a permis de construire un tas de 3 à 4 m de haut. A réception de la livraison, le bois était à une humidité moyenne de 36 % sur brut et la granulométrie moyenne à grosse.

Lors de l'instrumentation du tas, les sondes ont été positionnées dans la configuration décrite dans le chapitre « Mode opératoire » de la page 96. Le premier niveau de sondes est installé à 0,1 m du sol, l'écartement entre les sondes est de 1,2 m dans toutes les directions. Lors de la constitution du tas, l'outil de manutention à bras télescopique utilisé a légèrement tassé le tas en roulant sur le bois situé à la base. Le tas a été installé contre un mur, sur une dalle bétonnée puis recouvert d'une bâche Toptex.

L'auto-échauffement produit dans le tas était faible : la différence de température maximale par rapport à la température extérieure n'a pas dépassé 10°C. L'échauffement s'est produit au centre du tas mais les conditions extérieures clémentes et l'utilisation de la bâche ont peut-être plus d'influence que les actions microbiologiques. La Figure 42 montre le champ de température dans le tas de plaquettes forestières 49 jours après la mise en tas.

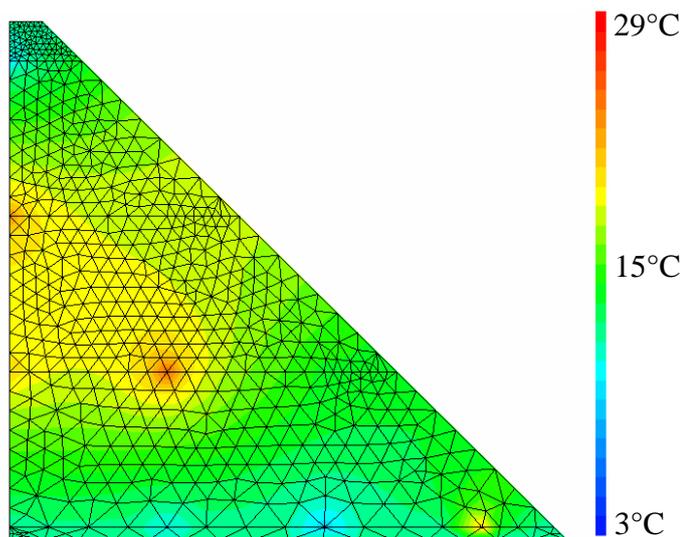


Figure 42 : Essai 1 - champ de températures à $t = 49$ jours

L'humidité du bois a en moyenne diminué de 6 % sauf dans la partie basse, vers l'extérieur du tas. Il y a en effet eu une reprise d'humidité par le sol due aux intempéries, la dalle bétonnée étant située en partie basse d'un terrain. La Figure 43 montre l'évolution du champ d'humidité dans le tas en début, milieu et fin d'essai. Le code couleur établi est : en rouge le bois le plus humide, en passant par le vert pour le bois humide et en bleu le bois le plus sec.

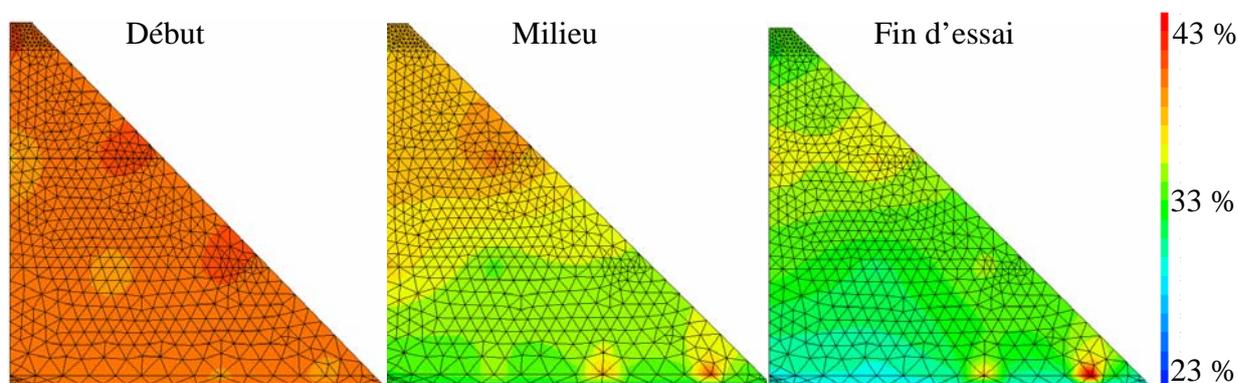


Figure 43 : Essai 1 - évolution du champ d'humidités lors de l'essai

L'humidité contenue dans le bois a tendance à se mouvoir du bas du tas vers le haut : les couches inférieures de bois sèchent en premier, le front d'humidité se déplaçant vers le haut.

Comme dans le cas des essais préliminaires, l'utilisation d'un bois stocké longtemps à l'avance pour faire un tas de plaquettes forestières entraîne un très faible auto-échauffement lors du stockage. Pour le séchage, ce très faible échauffement n'a pas permis une baisse importante du taux d'humidité moyen du bois qui est passé de 36 à 32 % d'humidité sur brut,

l'humidité minimale dans le tas est de 25 % au niveau de la sonde 6 et l'humidité maximale est de 43 % au niveau de la sonde 4 qui se situe au niveau du sol sur la partie périphérique du tas.

3.2 Essai 2

Le tas constitué à l'ENSTIB le 25/03/2008 provient de bois de feuillus fraîchement abattu puis broyé et livré une semaine après broyage. La quantité de bois utilisée lors de l'essai est de 45 m³, permettant de construire un tas de 2 à 3 m de haut. À la livraison, le bois était à une humidité de 50 % sur brut et la granulométrie fine à moyenne. Des champignons étaient présents dans le bois avant la mise en tas.

Lors de l'instrumentation, le premier niveau de sondes est installé à 0,1 m du sol, l'écartement entre les sondes étant de 0,8 m dans toutes les directions. Lors de la constitution du tas, l'outil de manutention utilisé était un outil de levage muni d'une benne. Le tas n'a donc pas été tassé et a été installé sur une surface plane bétonnée puis recouvert d'une bâche Toptex.

La température extérieure au moment de la constitution du tas était de 10°C. Dès lors, la montée en température a été assez rapide : augmentation de température dans le tas d'environ 40°C en 7 jours. La température a continué d'augmenter ensuite pour se stabiliser entre 50 et 80°C en fonction des zones. La température extérieure au mois d'avril était en moyenne de 10°C. La Figure 44 montre le champ de températures dans le tas de plaquettes forestières après 40 jours de stockage. Le code couleur est : en bleue une température de 40°C tandis qu'en rouge la température est de 90°C. Tout comme dans l'expérience précédente avec du bois ancien, l'auto-échauffement est plus intense au centre du tas.

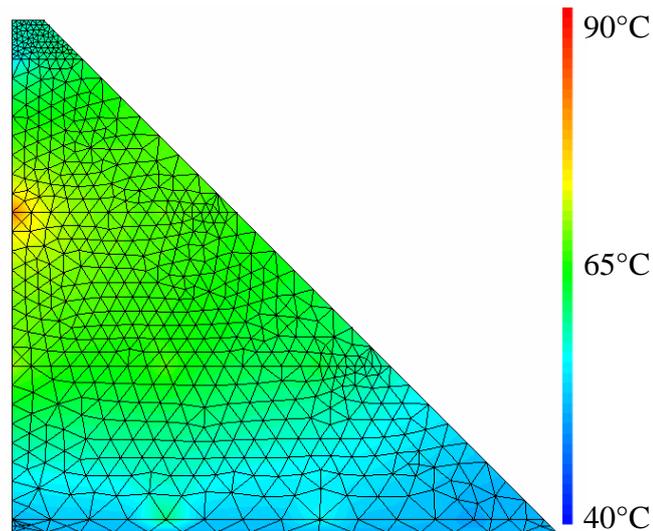


Figure 44 : Essai 2 - champ de températures à $t = 40$ jours

Le suivi de cet essai fut écourté, le bois devant être utilisé pour des essais de combustion. Notons cependant qu'il s'agissait de bois jeune composé de branchages, avec une proportion d'écorces élevée.

Du point de vue de l'humidité, malgré l'utilisation de bâche Toptex, les fortes pluies du mois d'avril n'ont pas favorisé le séchage. A la fin de l'essai, l'humidité moyenne du tas était comprise entre 40 et 45 % avec un minimum de 30 % d'humidité sur brut et un maximum de 60 % d'humidité sur brut. D'après cet essai, il semble que l'utilisation d'une granulométrie trop fine ralentit la migration de l'eau vapeur dans le lit de plaquettes forestières, d'où une augmentation du temps nécessaire au séchage malgré les températures assez élevées. Il est probable qu'une répartition granulométrique trop vaste ait pour effet une augmentation de la masse volumique et une diminution de la porosité du lit de plaquettes (les petites particules comblent la plupart des espaces entre les particules plus grosses), entraînant des difficultés de migration de l'humidité. Cette théorie n'a cependant pas pu être vérifiée.

3.3 Essai 3

Le tas constitué à Mirecourt le 25/06/2008 provient de bois de feuillus fraîchement abattu puis broyé et mis en tas tout de suite. La quantité de bois est de 90 m^3 , permettant de construire un tas de 4 à 5 m de haut. À la livraison, le bois était à une humidité de 45 % sur

brut et la granulométrie moyenne à grosse. Les plaquettes forestières contenaient beaucoup de petites brindilles et de feuilles.

L'emplacement des sondes est le même que lors du premier essai à Mirecourt, soit tous les 1,2 m, la première couche de sonde étant à 0,1 m du sol. Lors de cet essai, le tas était positionné sur un sol en terre. Après la mise en place des sondes, il a été recouvert d'une bâche Toptex.

La température extérieure au moment de la constitution du tas était de 20°C. La montée en température a été assez rapide : augmentation d'environ 35°C en un peu plus d'un jour. Après cette période de chauffe, la température au sein du tas se stabilise puis chute aux alentours du jour 10. A partir de ce moment, l'auto-échauffement est fortement réduit puis reprend à partir du jour 18. La production de chaleur dans le tas continue jusqu'à 35 à 40 jours puis s'arrête. La température dans le tas diminue ensuite lentement pour devenir homogène et se stabiliser entre 30 et 35°C. La Figure 45 montre les relevés de températures effectués au niveau des différentes sondes en fonction du temps. Les sondes, numérotées de 1 à 10 sont disposées selon la configuration de la Figure 38 (page 96).

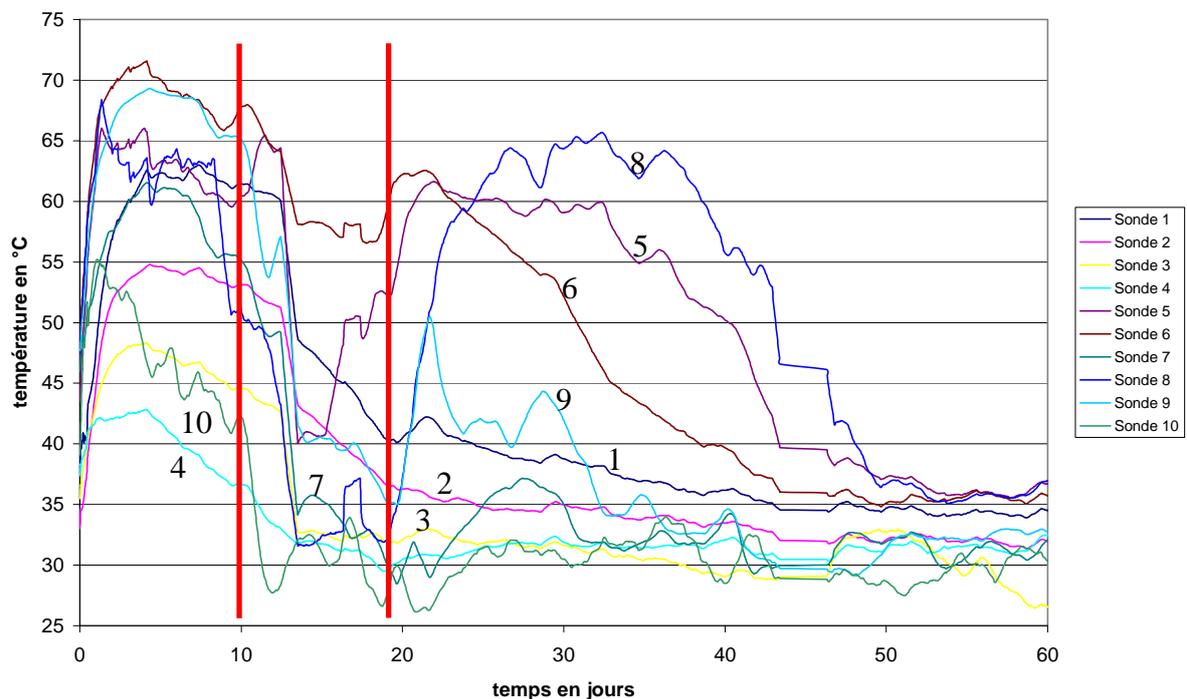


Figure 45 : Essai 3 - Relevé des températures dans le tas en fonction du temps

La Figure 46 et la Figure 47 représentent deux champs de températures pour des temps différents : la première correspond au champ de températures une journée après la mise en

tas : l'auto-échauffement se développe en priorité au centre du tas où les déperditions thermiques sont les moins importantes. La seconde figure correspond au champ de températures 25 jours après la mise en tas et elle est représentative de la seconde période de chauffe : un auto-échauffement maximum est également constaté dans la partie centrale du tas. Cependant, l'élévation de température dans le tas est moins importante que lors de la première période de chauffe.

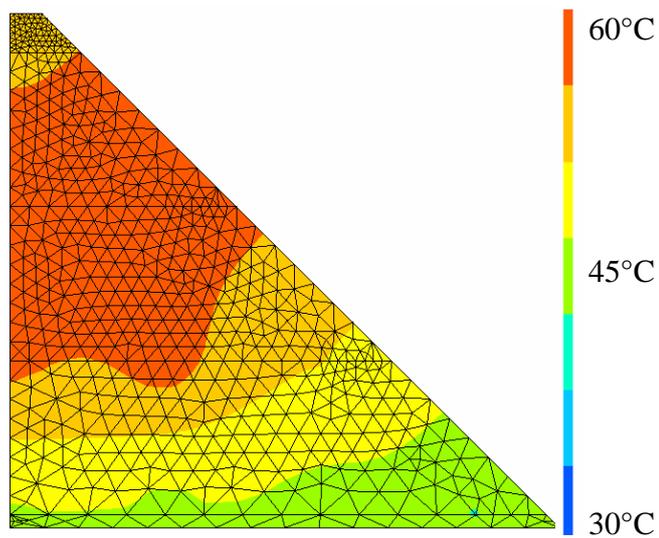


Figure 46 : Essai 3 - champ de température à $t = 1$ jour

Sur cette Figure 46, un seul jour après la mise en tas, la température est toujours supérieure à 40°C avec des températures maximales de l'ordre de 65 à 70°C au centre du tas.

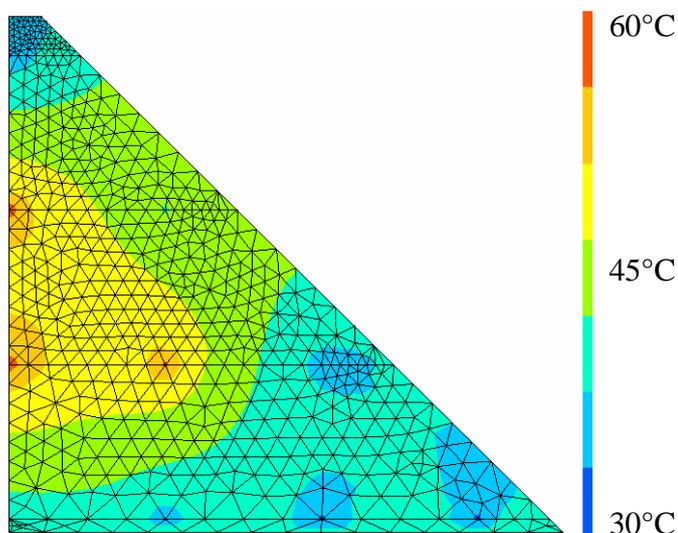


Figure 47 : Essai 3 - champ de température à $t = 25$ jours

Sur la Figure 47, les températures dans le tas restent inférieures à celles de la première période de chauffe : les températures maximales sont de l'ordre de 60-65°C au centre. L'arrêt de l'auto-échauffement observé au cours du séchage est dû à un ralentissement, voire à un arrêt de l'activité des micro-organismes. Comme il y a eu reprise de l'auto-échauffement par la suite, ce ralentissement de l'activité ne peut pas être dû à un problème de disponibilité de combustible pour les micro-organismes. Il semble alors possible que les bactéries, en majorité responsables de l'auto-échauffement, aient consommé l'oxygène dans le tas de plaquettes forestières de manière trop rapide et aient dû fonctionner en mode anaérobique (fermentation) jusqu'à l'arrivée nouvelle d'oxygène dans le tas. Cette hypothèse peut expliquer les deux périodes de chauffe distinctes, une diminution du nombre de micro-organismes suite à une montée en température trop importante pourrait en être une autre. Lors de la seconde période de chauffe, seules les zones au niveau des sondes 5, 6, 8, 9 qui se situent au centre du tas ont subi une élévation de température significative. Les autres zones du tas n'ont subi qu'une période de chauffe après laquelle leur température a diminué. Les micro-organismes n'ont certainement pas produit assez d'énergie pour contrecarrer les dissipations thermiques.

Concernant l'évolution de l'humidité au sein du tas de plaquettes forestières, elle se déroule par saccades. La Figure 48 montre cette évolution, les sondes étant numérotées de 1 à 10 et positionnées comme expliqué sur la Figure 38.

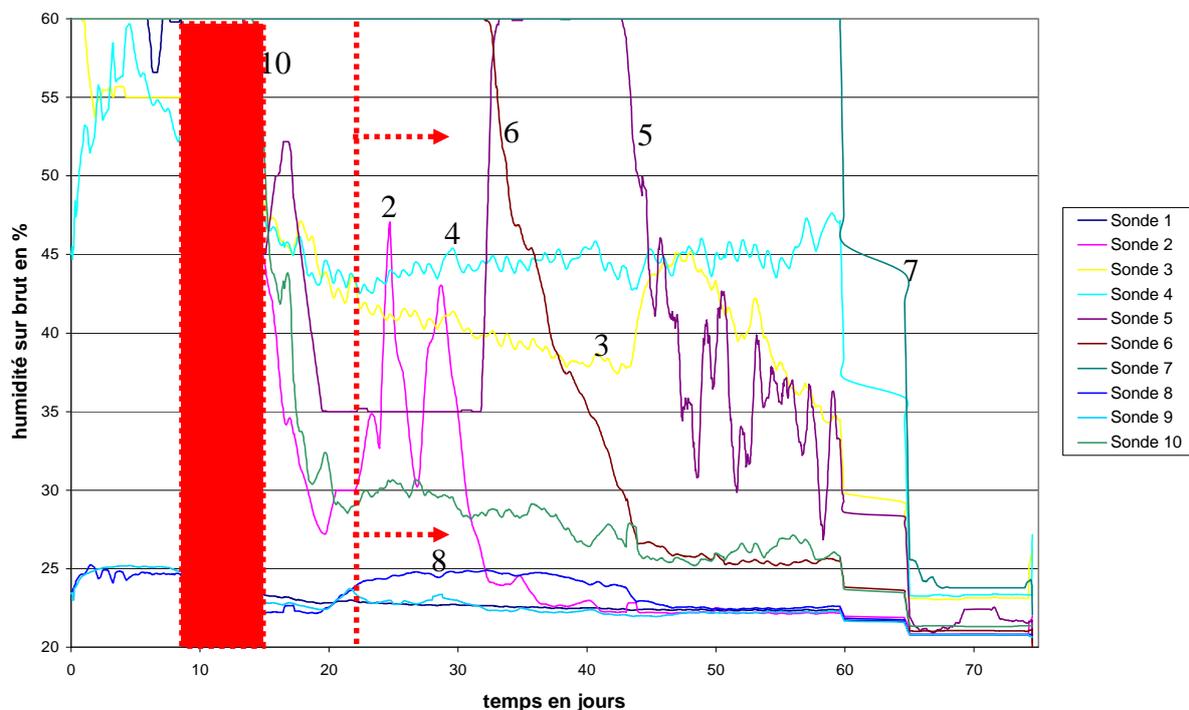


Figure 48 : Essai 3 - relevé des humidités sur brut dans le tas en fonction du temps

On remarque sur la Figure 48 des variations brutales de l'humidité indiquées par les sondes. En dehors des sondes 6 et 7, les premières chutes d'humidités débutent à partir des jours 8 à 15. Le temps $t = 15$ jours correspond au moment où la température chute brutalement dans le tas de plaquettes forestières. Au début de la seconde période de chauffe, l'humidité indiquée par les sondes 2 et 5 augmente (jour 22) puis semble diminuer à la fin de la seconde période de chauffe. Pour les sondes 5 et 6 la diminution d'humidité de l'échantillon est observée lorsque la température devient inférieure à 50°C dans ces zones où sont placées les sondes.

Les mesures d'humidités pour les sondes 8 et 9 semblent particulièrement basses au début de l'essai et ne sont pas expliquées. Au démantèlement du tas de plaquettes, quelques sondes ont pu être récupérées non détériorées. Après mise à l'étuve, les résultats ont permis d'évaluer la précision du système de mesure par résistance électrique. Le Tableau 12 compare les résultats de mesure d'humidité par étuvage et par mesure de résistance électrique.

	éprouvette 2	éprouvette 3	éprouvette 5	éprouvette 6	éprouvette 9
humidité sur brut obtenue par mesure de résistance électrique	22,79	57,22	23,11	24,79	22,79
humidité sur brut obtenue par étuvage	33,60	60,00	23,00	22,10	18,90
différence	10,81	2,78	0,11	2,69	3,89

Tableau 12 : Essai 3 - humidités sur brut obtenues par méthode de mesure de résistance électrique et par étuvage

En dehors de l'éprouvette 2, les résultats obtenus par mesure de résistance électrique sont fiables. Pour la sonde 9 dont l'humidité de départ semblait basse, l'humidité finale mesurée est cohérente avec celle issue des mesures en étuve. On peut donc penser que les résultats issus de ces mesures sont précis et peuvent être considérés comme tels pour les essais.

La Figure 49 représente quelques distributions de l'humidité sur brut dans le tas de plaquettes forestières. Le bleu foncé représente une humidité sur brut de 20 % et le jaune de 60 %.

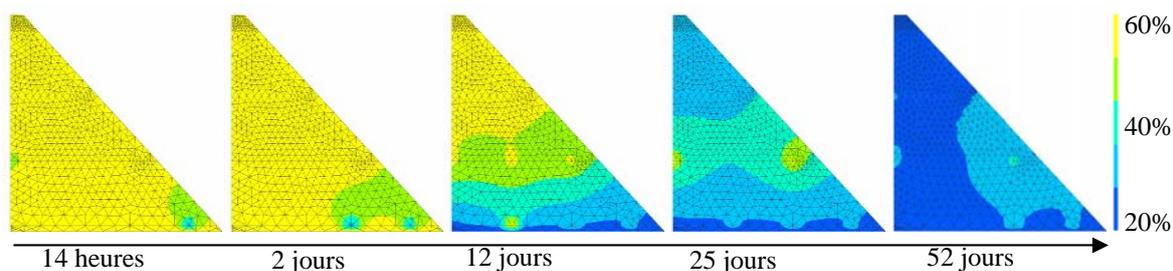


Figure 49 : Essai 3 - évolution du champ d'humidité dans le tas de plaquettes forestières

L'humidité dans le tas est élevée au début. Cela est lié à l'humidité des éprouvettes témoins qui sont conservées dans l'eau avant la mise en place. Par la suite, lorsque la température augmente, l'humidité diminue dans le tas en commençant par la base. Une diminution de l'humidité s'effectue ensuite simultanément par le bas et le haut du tas. Après 52 jours, la partie la moins sèche du tas de plaquettes se situe au centre du tas et vers l'extérieur, avec une humidité de l'ordre de 30 % sur brut. Dans le reste du tas, l'humidité sur brut est comprise entre 20 et 25 %.

En comparant les résultats d'humidité et de température, une interaction entre ces grandeurs apparaît clairement, en particulier lors des phases de chauffe. Une interprétation possible des phases de séchage peut être la suivante : lors de l'élévation rapide de la température, la vapeur d'eau liée à l'évaporation de l'eau contenue dans le bois crée au sein du tas une surpression. L'évacuation rapide de cet air chaud humide provoque une entrée d'air froid, d'où la diminution simultanée de l'humidité et de la température. Ce phénomène se reproduit mais de manière moins intense lors de la seconde période de chauffe, celle-ci étant beaucoup moins rapide que la première.

3.4 Essai 4

Le tas de plaquettes constitué à Vagney le 10/07/2008 provient de bois de résineux stocké en grumes pendant plus de 6 mois. La quantité de bois utilisée a permis la construction d'un tas de 4 à 5 m de haut. L'humidité sur brut initiale du bois était de 45 % et la granulométrie fine à moyenne.

Le tas a été mis en place avec un outil de manutention équipé d'un bras manuscopique : il n'a donc pas été tassé et installé sur une surface plane bétonnée sous hangar. Lors de cet essai, les sondes ont été placées selon le même type de configuration que pour les autres

essais. Cependant même si la forme du tas était bien conique au début, des plaquettes ont été ajoutées sous le hangar pour séchage et à la fin des relevés, le hangar était complètement rempli de plaquettes. Il faudra donc analyser les résultats en tenant compte que la quantité de bois autour de chaque sonde est très importante dans le sens horizontal. La Figure 50 montre le tas de plaquettes juste après sa constitution sous le hangar de stockage.

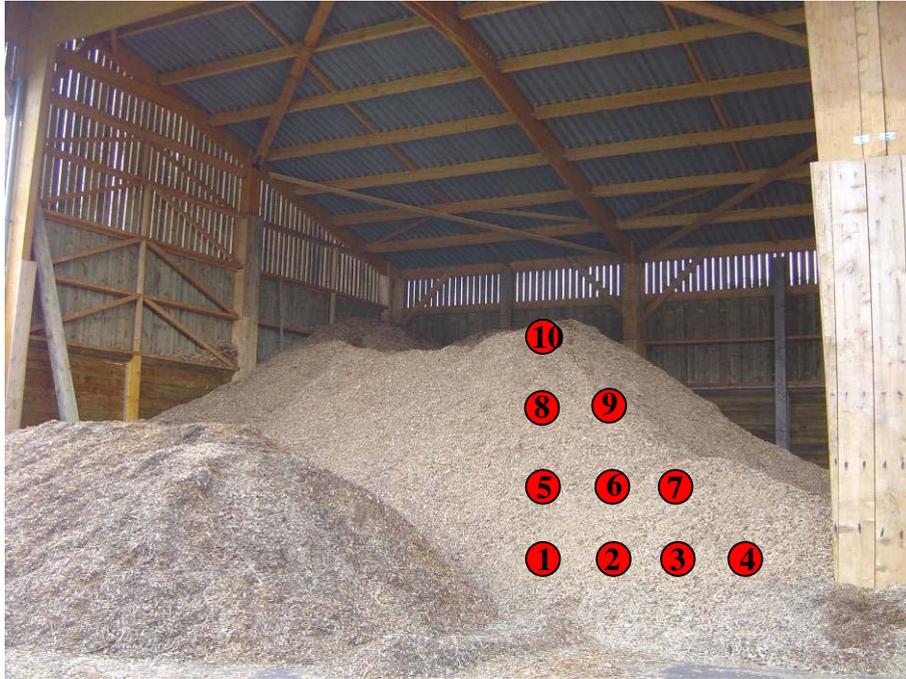


Figure 50 : Essai 4 – tas de plaquettes sous hangar de stockage

Au début de l'essai, le bois a été mis en tas sous une température extérieure de 25°C environ. Les premières mesures de températures n'ont pas pu être réalisées à cause d'une défaillance technique du système de mesure. Cependant la montée en température a été assez rapide : augmentation d'environ 35°C en 6 jours. Après ces 7 jours de chauffe, la température au sein du tas stagne pour quelques sondes et diminue pour d'autres. La Figure 51 montre le relevé de différentes températures en fonction du temps pour les sondes en état de fonctionnement. La courbe notée sonde 2 représente la température extérieure.

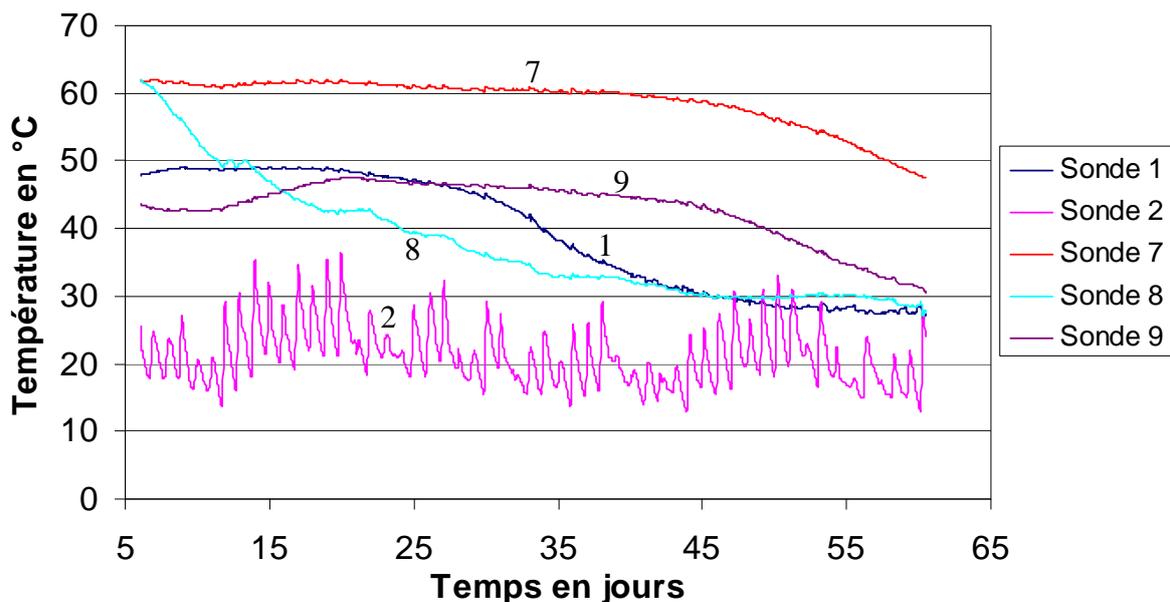


Figure 51 : Essai 4 - Évolution des températures dans le tas de plaquettes forestières

Au niveau du sol, la température de la sonde 1 a augmenté rapidement pour atteindre 50°C. La température a ensuite stagné : il semble que l'activité microbologique s'est stoppée à cet endroit du tas à partir des jours 35 à 40. La température dans le tas semble atteindre son maximum dans la partie centrale (sonde 7). Le tas étant de forme différente de celle utilisée dans les autres essais, les résultats des sondes 8 et 9 devraient être similaires, ce qui n'est pas le cas. Il semble que dans un tas très large, il puisse y avoir des zones où l'activité est plus importante. Néanmoins, le bois utilisé lors de cet essai étant abattu il y a plus de 6 mois, les réactions mises en jeu peuvent être différentes en fonction de la nature du bois dans la zone. L'allure des courbes de température pour les sondes 7 et 9 est similaire avec un décalage de températures de l'ordre de 10 à 15°C. Les valeurs de température pour ces deux sondes semblent liées.

Au niveau de l'humidité, les mesures mettent en évidence une diminution très rapide dès le début de l'essai avec des phases de ré humidification pour les sondes 7 et 9. En l'espace de 6 à 7 jours, l'humidité dans la majeure partie du tas atteint entre 20 et 30 %, l'humidité finale moyenne étant de 22 % sur brut.

Entre les zones de la sonde 7 et de la sonde 9, on observe un décalage sur la reprise d'humidité de quelques heures à un jour : l'échantillon de la zone de la sonde 9 reprend de l'humidité après la reprise d'humidité de l'échantillon de la zone de la sonde 7. La vapeur

d'eau évacuée par les couches inférieures humidifie les couches supérieures avant de subir un séchage par l'augmentation des températures.

Pour la sonde 8 dont la température a rapidement diminué après la première période de chauffe, aucune reprise d'humidité n'a été notée. La vapeur d'eau émise lors du séchage des plaquettes forestières semble ainsi avoir des chemins préférentiels pour sortir du tas : ces chemins sont souvent qualifiés de cheminées. Sur les tas coniques, la vapeur d'eau sort essentiellement par le sommet du tas. En revanche, dans le cas des plaquettes stockées sous hangar, il arrive fréquemment que le tas fasse toute la surface du hangar, il y a alors plusieurs cheminées d'évacuation de la vapeur. La Figure 52 présente la surface supérieure d'un tas de plaquettes forestières : la zone de bois plus foncée est du bois humide qui se trouve sur le chemin de la vapeur d'eau. Plusieurs zones humides sont observées, toutes étant situées dans les parties les plus hautes du tas.



Figure 52 : Essai 4 – cheminées d'évacuation de vapeur d'eau

Dans les tas stockés sous hangar, les zones humides traversant tout le tas dans sa hauteur sont retrouvées longtemps après la période d'auto-échauffement. Ces zones, d'un diamètre de 50 cm environ correspondent aux emplacements des cheminées. Ce phénomène peut être expliqué de la manière suivante : lorsque les substances nécessaires au

développement des micro-organismes sont épuisées, l'auto-échauffement s'arrête. La température diminuant, la vapeur d'eau présente dans la cheminée se condense et ré-humidifie le bois. Sans auto-échauffement, le bois ne sèche plus et il reste des colonnes de bois humide dans le tas.

3.5 Essai 5

Le tas constitué à l'ENSTIB le 19/12/2008 provient de bois de feuillu abattu 6 mois auparavant, celui-ci a été broyé puis immédiatement livré. La quantité de bois utilisée lors de l'essai est de 45 m³, permettant de construire un tas de 2 à 3 m de haut. À la livraison, le bois était à une humidité de 38,6 % sur brut et la granulométrie fine à moyenne.

Lors de l'instrumentation du tas, le premier niveau de sondes est installé à 0,1 m du sol, avec un écartement entre les sondes de 0,8 m. Lors de la constitution du tas, l'outil de manutention utilisé était un outil de levage avec benne. Le tas n'a donc pas été tassé et installé sur une surface plane bétonnée puis recouvert d'une bâche Toptex.

Au début de l'essai, le bois a été mis en tas sous des températures extérieures proches de 0°C. La montée en température ne s'est pas produite au début de l'essai à cause de ces températures basses. L'auto-échauffement a commencé après 20 jours de stockage, lorsque les températures sont devenues plus clémentes. La Figure 53 représente l'évolution des températures dans le tas de plaquettes. La courbe en rouge représente la température extérieure, la centrale d'acquisition était située dans un coffre à l'abri du vent placé entre des bâtiments chauffés, les températures sont donc plus élevées que celles au niveau du tas.

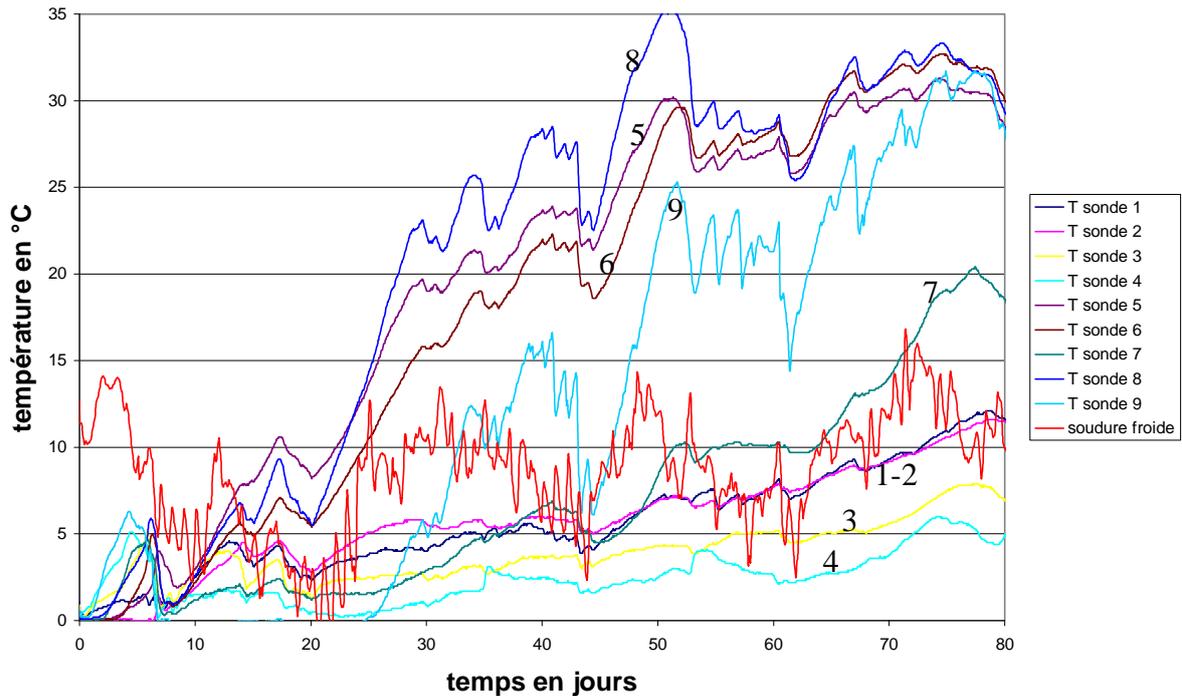


Figure 53 : Essai 5 – évolution des températures dans le tas

Après démarrage de l’auto-échauffement (au jour 20), la température dans le tas a augmenté de 30°C en 30 jours. Il semble cependant qu’un rapport existe entre les baisses de température extérieures et les baisses de température dans le tas : aux jours 43 et 62, une baisse de température extérieure de 7 à 8 °C entraîne une baisse de température sensiblement identique dans le tas. Les températures extérieures semblent dans ce cas avoir une influence non négligeable sur l’auto-échauffement. La Figure 54 représente la distribution de températures dans le tas à $t = 37$ jours, le rouge correspondant à une température de 35°C, le vert à 15°C et le bleu foncé à 0°C.

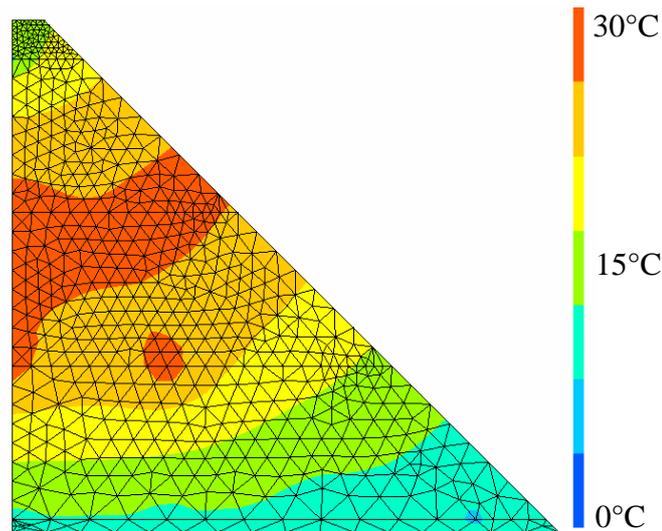


Figure 54 : Essai 5 – champ des températures dans le tas à $t = 37$ jours

La température maximale est située au centre du tas, une partie périphérique du tas (sonde 9) est aussi à une température haute. Cela est peut-être dû au passage de la vapeur d'eau produite lors du séchage mais l'hypothèse d'une élévation de température due au soleil sur la bâche Toptex (vert foncé) paraît plus réaliste.

À la fin de l'essai 5 d'une durée de trois mois, la température dans le tas n'avait pas changé. De plus, la présence de neige sur la bâche Toptex a entraîné une ré humidification du bois. Ainsi, les principales conclusions qui peuvent être données sont les suivantes :

- l'auto-échauffement démarre difficilement si le tas est constitué lorsque les températures extérieures sont négatives,
- une fois l'auto-échauffement initié celui-ci continue même en cas de températures très basses
- l'utilisation d'une bâche Toptex en hiver ne semble pas efficace en cas de neige : la vapeur d'eau ne peut alors pas s'échapper et l'eau provenant de la neige qui fond s'infiltre lentement dans le tas par percolation pour ré-humidifier le bois ; il semble donc préférable dans ces conditions de stocker le bois sous abri.

Ces conclusions pourraient être différentes si le bois est broyé tout de suite après l'abattage. On peut penser que dans ce cas l'auto-échauffement peut se produire même en présence de températures extérieures négatives. Ce point n'a cependant pas pu être vérifié.

3.6 Essai 6

Le tas constitué à l'ENSTIB le 19/03/2009 provient de bois de peuplier issu de jeunes arbres coupés 4 jours avant et broyés la veille de la mise en tas. La quantité de bois utilisée lors de l'essai est de 45 m³, permettant de construire un tas de 2 à 3 m de haut. À la livraison, le bois était à une humidité de 46,8 % sur brut et la granulométrie fine à moyenne. Les plaquettes forestières contenaient des traces de terre et d'herbes avant la mise en tas et des actions microbiologiques avaient également débutées. De plus, comme il s'agit de bois jeunes et de branchages, la teneur en écorce est assez importante.

Lors de l'instrumentation du tas, le premier niveau de sondes est installé à 0,2 m du sol, pour un écartement entre les sondes de 0,8 m. L'outil de manutention utilisé était un outil de levage muni d'une benne : le tas n'a donc pas été tassé et a été installé sur une surface plane bétonnée puis recouvert d'une bâche Toptex.

Au début de l'essai, le bois a été mis en tas avec des températures extérieures de l'ordre de 10 à 15°C. La montée en température s'est produite immédiatement dans l'ensemble du tas. La Figure 55 représente l'évolution des températures au sein des plaquettes, la courbe en rouge présentant la température extérieure.

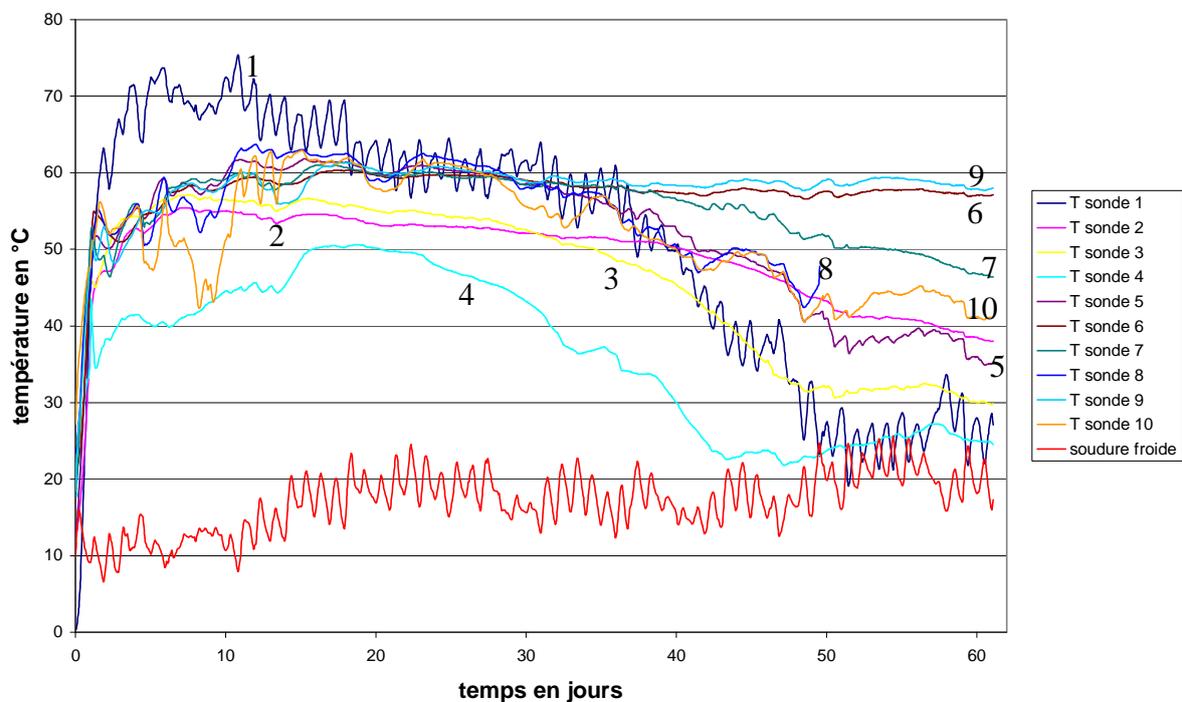


Figure 55 : Essai 6 – évolution des températures dans le tas

L'élévation maximum de température se produit au niveau de la sonde 1 : température supérieure à 65°C à la température extérieure. Après un peu plus d'une journée, la température dans le tas a dépassé 45°C excepté au niveau de la sonde 4 qui se situe au niveau du sol près de l'extérieur. L'essai, d'une période de 60 jours, révèle des températures élevées dans le tas même à la fin. Il apparaît ainsi que les actions microbiologiques n'étaient pas terminées après 2 mois de stockage. Après ces deux mois, la température au niveau des sondes 6 et 9 se situe toujours à environ 60°C. L'auto-échauffement semble s'être arrêté aux alentours du jour 50 : le premier niveau de sondes (1 à 4) diminue à partir de ce moment et les mesures des autres sondes sont en diminution au fur et à mesure. Les températures dans le tas sont relativement uniformes pendant une période de 40 jours. À partir de cet instant, l'activité dans le tas décroît et se stoppe dans certaines zones. La Figure 56 représente la distribution de températures dans le tas peu avant la fin de l'essai. La température dans le tas est maximale au niveau des sondes 6 et 9 : ces résultats montrent que la température est relativement élevée dans la partie haute du tas et froide dans sa partie basse.

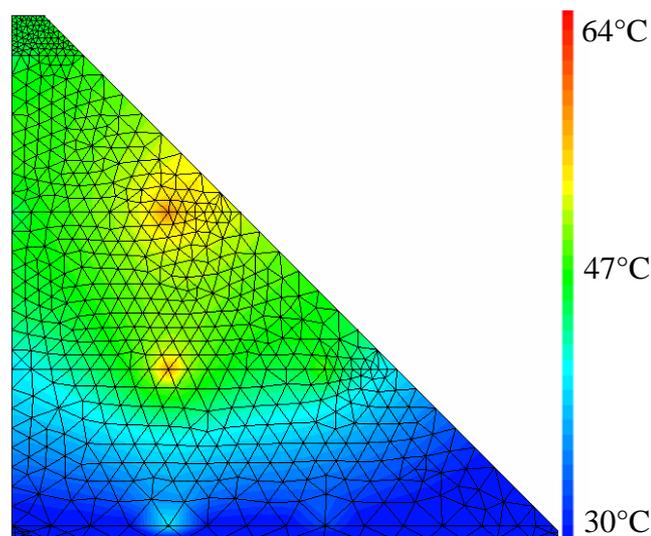


Figure 56 : Essai 6 – champ de températures dans le tas à $t = 55$ jours

Lors des précédents essais, la température était maximale dans le centre du tas à la fin de l'essai. Ce n'est pas le cas ici : l'herbe présente au début de l'essai et la forte teneur en écorces peuvent être une explication à ces résultats un peu différents. Ainsi, il est possible qu'aux niveaux des sondes 6 et 9 des touffes d'herbe apportent plus de nutriments nécessaires aux actions microbiologiques ayant pour conséquence une quantité de chaleur produite plus importante.

À la fin de l'essai, toutes les sondes ont pu être récupérées, le Tableau 13 montre les résultats d'humidités obtenues par mesure de résistance électrique et par séchage en étuve. Ces résultats montrent que les valeurs relevées au niveau des sondes 7 et 10 sont erronées. Les résultats des sondes 5, 6 et 9 sont peu précis. Pour les autres sondes, les valeurs indiquées sont très précises (à plus ou moins 2 % d'humidité sur brut).

	éprouvette 1	éprouvette 2	éprouvette 3	éprouvette 4	éprouvette 5	éprouvette 6	éprouvette 7	éprouvette 8	éprouvette 9	éprouvette 10
humidité sur brut obtenue par mesure de résistance électrique	25,5	21,4	20,9	25,7	22,3	18,9	22,4	60,0	18,9	20,8
humidité sur brut obtenue par étuvage	27,1	22,9	21,0	23,9	32,5	34,6	52,7	58,7	35,9	63,0
différence	1,62	1,42	0,11	1,79	10,22	15,69	30,33	1,30	17,07	42,22

Tableau 13 : Essai 6 - humidités sur brut obtenues par méthode de mesure de résistance électrique et par étuvage

Lors de la récupération des sondes, les pointes inox des sondes des niveaux supérieurs (5 à 9) étaient fortement oxydées. Il semble que dans le cas des plaquettes forestières fraîches et de granulométrie fine à moyenne, les substances chimiques produites corrodent rapidement le métal et rendent la méthode de mesure moins précise. La Figure 57 montre une pointe dégradée suite à l'essai.



Figure 57 : Pointe inox dégradée suite à l'essai

La pointe sur la Figure 57 est devenue poreuse lors de l'essai, l'inox n'ayant pas résisté à ces conditions. De plus, la mesure de résistance nécessite d'appliquer un potentiel électrique entre les pointes, les transformant en anode et cathode. Même si la tension appliquée est faible, le transfert de charge entre l'anode et la cathode doit fragiliser la pointe anodique. Pour pallier ce problème et ralentir la fragilisation des pointes, il faudrait effectuer la mesure en changeant le sens du courant pour chaque essai ou utiliser un courant alternatif.

Enfin, au début et à la fin de l'essai, deux échantillons de plaquettes ont été prélevés :

- Le premier échantillon a été prélevé à la livraison et ne contenait ni herbe, ni terre.
- Le second a été prélevé à la fin de l'essai au centre du tas, là où l'auto-échauffement était le plus important.

Des mesures de pouvoir calorifique supérieur ont été réalisées : les résultats ne montrent pas de différence significative entre les deux échantillons. Le Tableau 14 présente les valeurs obtenues.

	mesure 1	mesure 2	mesure 3	moyenne
PCS anhydre au début de l'essai en kJ.kg^{-1}	18760	18785	18525	18690
PCS anhydre en fin d'essai en kJ.kg^{-1}	18910	18840	19205	18985

Tableau 14 : Essai 6 – Pouvoirs calorifiques supérieurs du bois anhydre avant et après stockage en tas

Il semble donc que le séchage en tas n'influence pas le pouvoir calorifique supérieur, ce qui revient à dire que la perte de masse ne modifie pas la composition chimique élémentaire moyenne du bois.

Les essais réalisés permettent d'étudier le séchage des plaquettes forestières en fonction de divers paramètres opératoires et d'en extraire des informations qui serviront à l'établissement de modèles et la rédaction d'une fiche de synthèse sur les bonnes pratiques pour sécher des plaquettes en tas. Après avoir étudié les actions d'auto-échauffement et le séchage des plaquettes, la suite du chapitre aborde le thème des émissions de composés organiques durant le séchage.

4 Analyse des gaz effluents

Lors de différents essais, un échantillonnage des espèces chimiques présentes a été réalisé via des tubes contenant de l'adsorbant Tenax GR. L'objectif de ces analyses est de qualifier les espèces chimiques présentes dans le gaz afin de déterminer le type d'actions microbiologiques présentes.

La Figure 58 représente le spectre de masse des composés présents lors d'un essai type pour des plaquettes de résineux.

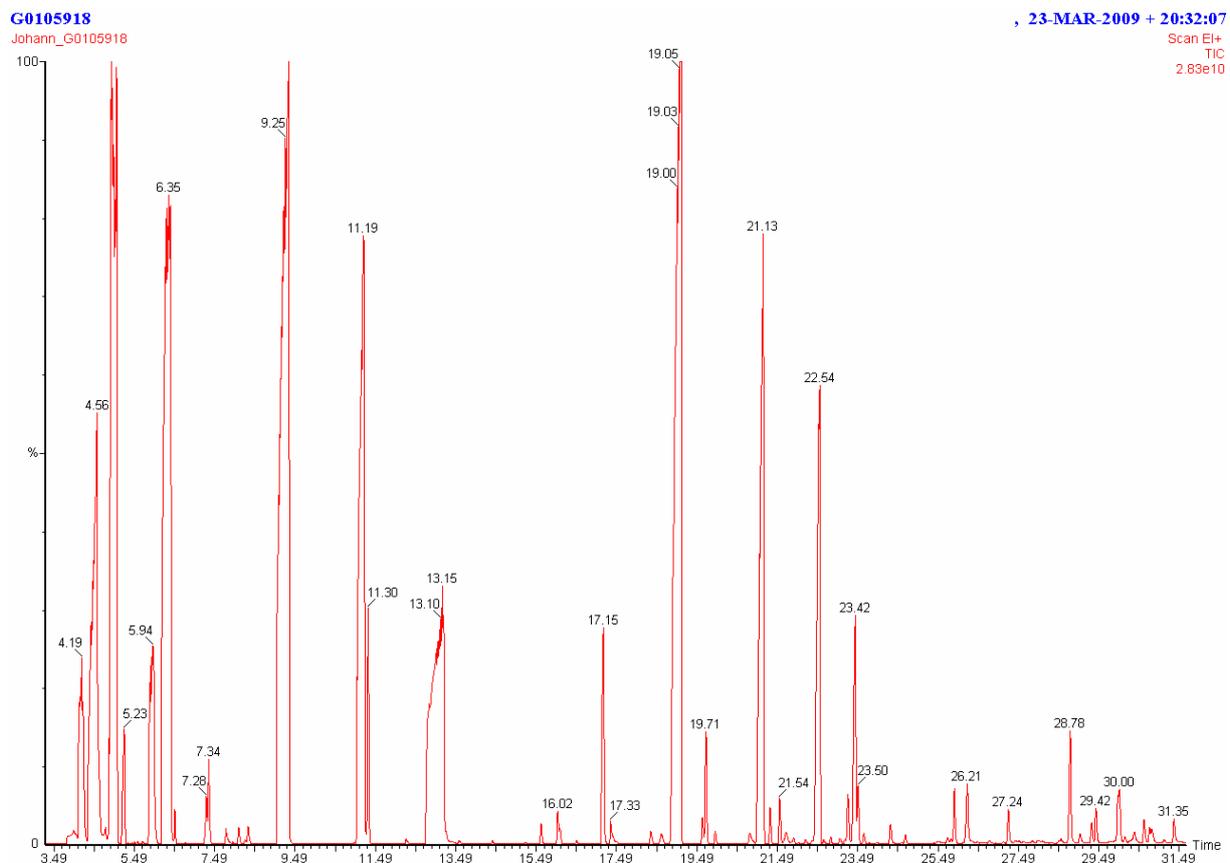


Figure 58 : Spectre de masse de gaz effluents lors d'un essai de séchage en tas

Le graphe présente de nombreux pics montrant la présence d'une multitude de composés :

- De 0 à 4,6 minutes, les composés présents sont le méthanol et l'éthanol,
- De 4,6 à 17,5 minutes, les composés présents proviennent de pollutions résiduelles déjà présentes dans la colonne d'analyse avant le passage de nos prélèvements
- Après 17,5 minutes, on retrouve toute une série de terpènes.

Parmi les terpènes, qui sortent entre 19 et 30 minutes, on retrouve par ordre quantitatif l'alpha-pinène, le beta-pinène, le 1-R-alpha-pinène, le limonène, le camphène et le camphor. Après 30 minutes, les composés analysés sont également des terpènes qui ont une structure ressemblant à une unité de base de la lignine : ces composés sont potentiellement issus de la dégradation de cette molécule. Dans cette analyse, les résultats ne révèlent pas de traces

d'acide acétique qui est pourtant un des produits de base que l'on peut retrouver lors de la fermentation.

Même si ces résultats ne permettent pas de tirer une conclusion précise sur les types d'actions microbiologiques se déroulant au sein d'un tas de plaquettes forestières, la présence d'éthanol laisse penser à un fonctionnement anaérobique de cellules végétales, de bactéries ou de levures. Ce résultat est semblable à ceux présentés dans le chapitre 3.1.3.

5 Discussion

Les six essais de séchage de plaquettes forestières en tas permettent une meilleure compréhension du phénomène d'auto-échauffement. Ils permettent de fournir des informations et des recommandations utiles pour utiliser ce mode de séchage. Ces informations concernent tant le matériau bois que les modalités de stockage ou l'impact de l'environnement extérieur sur le séchage. Cette discussion sera développée en deux étapes :

- La première sera une synthèse des informations importantes mises en évidence lors des essais,
- La seconde consistera à utiliser ces données et celles d'essais complémentaires pour quantifier l'impact des principaux paramètres opératoires sur le procédé de séchage des plaquettes forestières en tas.

Ces analyses seront confrontées aux données bibliographiques pour en extraire les conclusions les plus importantes.

5.1 Synthèse des informations expérimentales

Les premières recommandations concernent les modalités de stockage qui donnent lieu à des résultats différents en fonction des paramètres extérieurs tels que la pluviométrie.

Le stockage des plaquettes forestières à l'air libre fonctionne aussi bien que le stockage sous hangar lorsque les précipitations sont inexistantes. Les précipitations ont pour conséquence la ré-humidification du bois par le sol ainsi que par les côtés du tas. Ce mode de séchage pourrait être une bonne solution en été ou dans les zones à faible pluviométrie si le

tas est par la suite couvert après la période d'auto-échauffement. Elle est cependant peu recommandée dans le cas d'un approvisionnement industriel car peu sûre en terme de qualité.

Le stockage des plaquettes forestières en tas sous bâche agricole est à éviter lorsque les plaquettes n'ont pas encore subi d'auto-échauffement. En effet, si une production de chaleur se développe, l'eau évaporée se condense contre la bâche et ré-humidifie le bois. Les essais, dans ces conditions, ont montré que le bois a tendance à noircir et qu'un phénomène pouvant s'apparenter à du compostage se produit. Au final, quasiment aucun séchage n'a lieu avec ce type de stockage.

Le stockage des plaquettes sous bâche « respirante » de type Toptex est une solution intéressante lorsque l'on ne dispose pas d'un hangar de stockage. Ce type de bâche permet à la vapeur d'eau de s'échapper du tas lors du séchage et limiter la pénétration d'eau liquide lors de précipitations. La pluie peut toutefois ré-humidifier le bois par la base. De plus, la mise en place de la bâche est très importante pour obtenir les meilleurs résultats : elle doit être positionnée sans former de creux sur le tas qui pourraient créer un endroit où de l'eau stagne et peut alors migrer à travers la bâche pour entrer dans le tas. Ce type de stockage a néanmoins des limites : lorsqu'il neige, l'eau sous forme vapeur issue du bois se condense au niveau de la bâche et retourne dans le tas. De plus, lors de la fonte de la neige, une quantité d'eau importante entre dans le tas par percolation à travers la bâche. Dans ces conditions, la bâche Toptex agit comme une bâche agricole et devient imperméable, ce qui mène à du compostage et non plus à du séchage. De même, lorsque la pluviométrie est importante, la bâche est gorgée d'eau et empêche la vapeur d'eau de quitter correctement le tas. Il semble donc que l'utilisation de bâches « respirantes » soit viable en dehors de l'hiver, à moins que durant cette période les précipitations de pluie et de neige ne soient pas trop importantes.

Le stockage des plaquettes forestières sous hangar semble très intéressant, son principal défaut étant le coût de fabrication. Le séchage est efficace car le tas ne subit pas de ré-humidification par le sol ou les côtés et la vapeur d'eau peut s'échapper sans avoir à traverser une bâche. Il faudra néanmoins prévoir des ouvertures dans le hangar de stockage vers l'extérieur afin d'éviter l'accumulation de vapeur d'eau. Un hangar possédant uniquement un toit (Figure 59) ou un toit avec au moins un côté ouvert (Figure 60) semble la meilleure solution.



*Figure 59 : hangar possédant uniquement un toit (à gauche)
Figure 60 : hangar possédant un toit et un côté ouvert (à droite)*

Concernant les modalités de stockage, les expériences réalisées permettent d'estimer une valeur moyenne de l'humidité du bois en fin du cycle de séchage. Pour le séchage à l'air libre, l'humidité sur brut moyenne minimale est de 35 %. Le séchage sous bâche de type Toptex permet d'atteindre au mieux des humidités de 25 % sur brut. Enfin, le séchage sous hangar permet d'obtenir des humidités de 20 % sur brut. Ces valeurs seront utilisées par la suite dans la partie dédiée aux calculs économiques.

La zone d'élévation de la température au début de l'auto-échauffement semble être identique pour les différents modes de stockage. Ainsi, la température dans le tas est maximale en son centre en raison du caractère isolant du bois en périphérie. L'utilisation de bois fraîchement abattu et/ou d'une granulométrie fine ont pour effet d'accroître la température maximale observée dans le tas. En revanche, l'utilisation de bois ayant préalablement subi un auto-échauffement, de bois stockés plus de 6 mois en grume et de plaquettes de granulométrie plus importante ont pour effet de diminuer la température maximale au sein du tas. Ce premier résultat tend à montrer que c'est la respiration des cellules vivantes du bois qui crée le premier échauffement au sein du tas.

L'humidité quant à elle semble diminuer en premier lieu depuis les couches inférieures du tas, cette diminution d'humidité se déplaçant vers le haut. Lors de la migration de l'humidité, les résultats montrent clairement un déphasage de quelques heures à un jour entre la diminution d'humidité dans un niveau et l'augmentation de l'humidité au niveau supérieur. La vapeur d'eau émise lors du séchage semble également suivre des chemins préférentiels et former des cheminées. À la fin de l'auto-échauffement, ces cheminées de bois humide peuvent être retrouvées telles quelles. Des zones humides similaires à celles décrites sur la

Figure 15 (page 53) ont également été observées dans le cas de séchage sous bâche ou sous hangar. L'utilisation d'une granulométrie fine rend la migration de l'humidité dans le tas plus difficile, augmentant le temps d'auto-échauffement et le temps de séchage.

Les températures extérieures ont une influence importante sur le séchage : il est ainsi déconseillé de construire un tas de plaquettes forestières avec du bois gelé ou sous des températures extérieures négatives. En effet, tant que la température est trop basse, l'auto-échauffement ne se produit pas ou peu et le tas de plaquettes demeure « inerte ». L'utilisation de bâche de type Toptex (vert foncé) couplée à du soleil peut alors avoir un effet bénéfique pour initier la phase de séchage, la température extérieure permettant de faire démarrer certains processus de dégagement de chaleur.

Des essais sur des plaquettes forestières avant et après avoir subi une fermentation ne montrent pas de variation de pouvoir calorifique supérieur : il semble donc que les pertes de masse sèche rapportées par la bibliographie se déroulent de manière stœchiométrique vis-à-vis de la composition du bois. Les analyses de gaz sortant des tas de plaquettes forestières révèlent une quantité importante de terpènes. Cette donnée est en accord avec la bibliographie qui évalue la perte de terpènes dans les plaquettes forestières au cours du stockage à environ 70 %. Les analyses révèlent également la présence d'éthanol : celui-ci peut provenir du fonctionnement de cellules végétales ou de bactéries en anaérobie. Les actions microbiologiques dans le tas s'effectuent donc en anaérobiose partielle, c'est-à-dire en mode de respiration et de fermentation. Ces données sont en accord avec la bibliographie.

Enfin, les essais montrent que la méthode de mesure développée fonctionne très correctement et permet de suivre en continu la teneur en humidité au sein d'un tas de plaquettes forestières. Nous avons cependant pu relever des dysfonctionnements lorsque les actions microbiologiques sont très importantes. En effet, les pointes sont alors corrodées à cause des acides produits lors de l'auto-échauffement et du potentiel électrique appliqué aux pointes lors de la mesure. Des solutions envisageables pour augmenter la durée de vie des pointes seraient alors de modifier le sens du courant appliqué aux pointes à chaque mesure et/ou d'utiliser une alimentation en courant alternatif.

5.2 Quantification de l'influence des paramètres opératoires sur le séchage en tas

L'influence des paramètres sur le séchage sera examinée en plusieurs étapes. Dans un premier temps, les paramètres : fraîcheur du bois, hauteur de tas et granulométrie seront comparés entre eux. En effet, d'après la bibliographie et les retours d'expériences des coopératives forestières, ces trois paramètres sont les plus importants. Ensuite, l'influence du mode de stockage (air libre, sous bâche Toptex, sous hangar) sera étudiée. Enfin, l'influence de la saison de stockage sur le séchage sera déterminée. Afin de réaliser un plan d'expérience complet avec les 3 paramètres principaux choisis, ayant chacun deux états, il est nécessaire de faire 2^3 soit 8 essais. Le Tableau 15 présente un récapitulatif des essais décrits précédemment et d'essais menés par des coopératives forestières. Les paramètres de mise en tas et les résultats des essais y sont indiqués.

La quantification de l'influence des divers paramètres se fera à l'aide de deux résultats du séchage. Le premier ou réponse thermique du système est la différence maximale de température entre une zone du tas et la température extérieure, soit ΔT . La seconde réponse caractéristique de l'efficacité du séchage est la différence entre l'humidité initiale du bois et l'humidité moyenne finale relevée, soit ΔHB . Par extrapolation, ΔT peut être considéré comme une production de chaleur. Les données récoltées proviennent parfois d'essais ayant des paramètres opératoires similaires. Lors de l'exploitation des résultats, la moyenne des valeurs de ΔT et de ΔHB de ces essais sera considérée.

titre	lieu	date	type de stockage	hauteur du tas	type de bois	granulométrie	humidité initiale	humidité finale	ΔT
essais préliminaires	Marbéville	hiver 2006	air libre	4 à 5 m	feuillus frais	moyenne-grosse	50	30,6	40,5
essais préliminaires	Marbéville	hiver 2006	air libre sous bâche	4 à 5 m	feuillus frais	moyenne-grosse	50	39,3	50,4
essais préliminaires	Marbéville	hiver 2006	air libre sous Toptex	4 à 5 m	feuillus frais	moyenne-grosse	50	27,5	45,1
essais préliminaires	Vagney	15/04/2006	sous hangar	4 à 5 m	résineux rebrassé	fine-moyenne			20
essais préliminaires	Vagney	15/04/2006	sous hangar	4 à 5 m	résineux frais	fine-moyenne			55
essai 1	Mirecourt	15/01/2008	air libre sous Toptex	4 à 5 m	vieux résineux	moyenne-grosse	36	32	23,5
essai 2	enstib	25/03/2008	air libre sous Toptex	2 à 3 m	feuillus frais	fine-moyenne	50	essai non terminé	77,3
essai 3	Mirecourt	25/06/2008	air libre sous Toptex	4 à 5 m	feuillus frais	moyenne-grosse	45	23,5	61,6
essai 4	Vagney	10/07/2008	sous hangar	4 à 5 m	vieux résineux	fine-moyenne	45	22	42
essai 5	enstib	19/12/2008	air libre sous Toptex	2 à 3 m	vieux feuillus	fine-moyenne	38,6	ré-humidification	25,2
essai 6	enstib	19/03/2009	air libre sous Toptex	2 à 3 m	feuillus frais	fine-moyenne	46,8	25	63,4
essais non menés par nos soins	coforet	semaine 23 2005	air libre sous Toptex	2 à 3 m	résineux frais	moyenne-grosse	27,5	13,5	
	polyfelt	15/11/2004	air libre sous Toptex	2 à 3 m	feuillus frais	moyenne-grosse	60	23	45
	polyfelt	16/11/2004	air libre	2 à 3 m	feuillus frais	moyenne-grosse	60	70	
	BE66 Vinça	sept-05	air libre sous Toptex	4 à 5 m	feuillus frais	moyenne-grosse	44	26	
	BE66 Vinça	sept-05	air libre	4 à 5 m	feuillus frais	moyenne-grosse	44	35	
	BE66 Matemale	juil-05	air libre sous Toptex	4 à 5 m	résineux frais	moyenne-grosse	48	25	
	BE66 Matemale	juil-05	air libre	4 à 5 m	résineux frais	moyenne-grosse	48	40	
	BE66 Vinça	août-04	air libre sous Toptex	2 à 3 m	vieux chataignier	fine-moyenne	19	16	
	BE66 Vinça	août-04	air libre	2 à 3 m	vieux chataignier	fine-moyenne	19	35	

Tableau 15 : Récapitulatif des essais répertoriés, de leurs paramètres et des résultats enregistrés

5.2.1 Influence des principaux paramètres

Les paramètres de séchage pris en compte dans ce paragraphe sont la fraîcheur du bois, la taille du tas et la granulométrie. Pour chacun de ces paramètres, deux états sont considérés. Dans le cas de la fraîcheur du bois, les plaquettes peuvent provenir de bois abattu depuis moins de 6 mois (état -1) ou depuis plus de 6 mois (état 1). La taille du tas peut être de 2 à 3 m (état -1) ou de 4 à 5 m (état 1). Enfin, la granulométrie des plaquettes forestières peut être fine à moyenne (état -1) ou bien moyenne à grosse (état 1). Le Tableau 16 décrit le plan d'expérience complet ainsi que les réponses du système lors des essais.

taille du tas	type de bois	granulométrie	ΔT	ΔHB
-1	-1	-1	70,4	21,8
-1	-1	1	45,0	25,5
-1	1	-1	25,2	0,0
-1	1	1	20,0	0,0
1	-1	-1	55,0	22,0
1	-1	1	53,4	20,8
1	1	-1	31,0	23,0
1	1	1	23,5	4,0

Tableau 16 : Plan d'expérience complet pour les 3 paramètres étudiés et résultats correspondants

Les valeurs répertoriées en jaune ne proviennent pas d'expériences : elles ont été évaluées en fonction des essais menés auparavant et de discussions avec des personnes de coopératives forestières séchant le bois de manière naturelle. De plus, une variation de ces données (10°C pour la température ou 5 % pour l'humidité) n'entraîne pas de variation importante sur le calcul de l'influence des paramètres. Les influences sont calculées par la différence $\sigma\Delta T$ et $\sigma\Delta HB$ entre la réponse du système pour un état du paramètre considéré et la moyenne de toutes les réponses. On calcule ainsi l'impact des paramètres par rapport à la moyenne des essais. La Figure 61 représente cette influence sur $\sigma\Delta T$ ainsi que l'importance des interactions. Les termes I12, I23 et I13 représentent les interactions entre les 3 paramètres ; 1 représente la taille du tas, 2 la fraîcheur du bois et 3 la granulométrie.

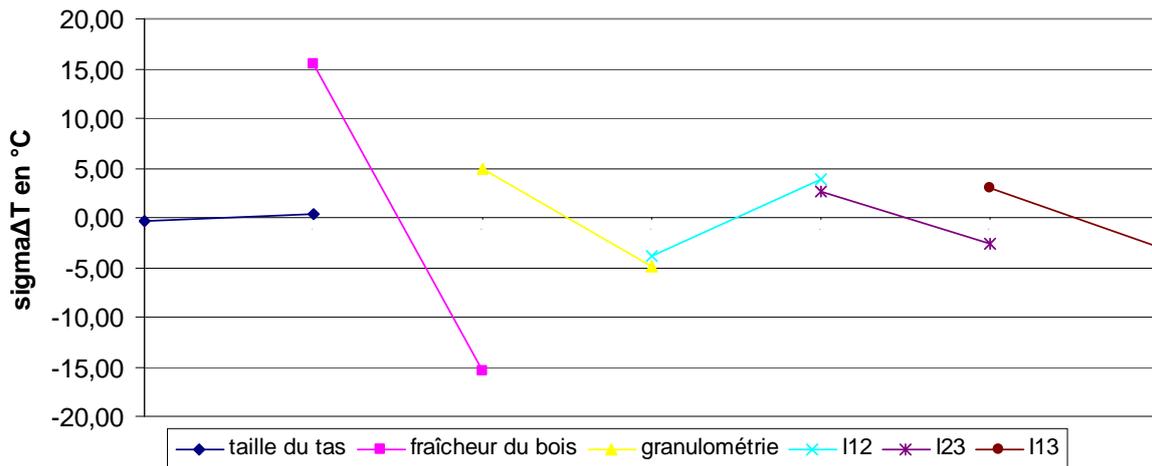


Figure 61 : Influence des 3 paramètres considérés sur la production de chaleur et importance des interactions

Le paramètre le plus influant sur la production de chaleur est la fraîcheur du bois suivi par la granulométrie. La taille du tas semble avoir peu d'influence pour les hauteurs considérées : ce résultat est étonnant mais il est probable que pour des hauteurs beaucoup plus importantes l'impact de ce facteur augmente. La bibliographie montre que pour l'auto-échauffement, la granulométrie est un paramètre plus influent sur l'élévation et la stagnation de la température que la hauteur du tas. Nos résultats sont en accord avec ces données mais dans le cas des plaquettes forestières, la fraîcheur du bois a encore plus d'influence. En conclusion, plus le bois est frais, plus la granulométrie est petite et plus la taille du tas est importante, plus la température dans le tas augmente. Les interactions entre les paramètres semblent également avoir une importance réelle.

La Figure 62 représente l'influence des paramètres considérés sur $\sigma\Delta HB$ ainsi que l'importance des interactions.

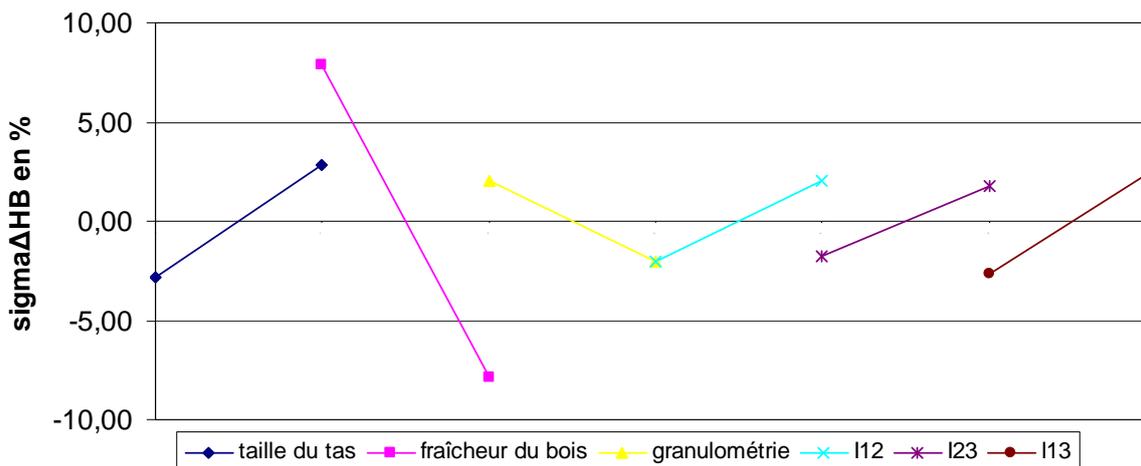


Figure 62 : Influence des 3 paramètres considérés sur la capacité de séchage et importance des interactions

L'influence de la fraîcheur du bois est prépondérante sur l'efficacité de séchage. En revanche, la taille du tas et la granulométrie ont sensiblement la même influence sur l'efficacité de séchage. L'influence de la taille du tas sur l'humidité est tout à fait en accord avec la bibliographie : plus le tas est grand, plus la proportion de bois humide dans le tas devient faible car la quantité de bois au cœur du tas (zone la plus sèche) est plus importante (Figure 13 à la page 52). Une granulométrie fine aura tendance à augmenter la valeur de ΔHB mais le temps de séchage pour obtenir l'humidité finale sera plus long qu'avec une granulométrie plus importante. Les interactions entre les paramètres semblent également être importantes.

Lors de l'utilisation des plans d'expérience, la réponse du système en fonction de l'action des paramètres étudiés est considérée comme linéaire. D'après les résultats précédents, nous pouvons écrire une équation pour traduire ΔT et une équation pour traduire ΔHB en fonction des paramètres et de leurs interactions. La différence maximale de température entre une zone du tas et la température extérieure, notée ΔT (en °C) peut s'écrire :

$$\Delta T = 40,43 + 0,29.F1 - 15,5.F2 - 4,96.F3 + 2,04.F1.F2 + 1,79.F2.F3 + 2,68.F1.F3 - 3,25.F1.F2.F3$$

De la même manière, la différence entre l'humidité initiale du bois et l'humidité moyenne finale relevée, notée ΔHB (en %) peut s'écrire :

$$\Delta HB = 14,64 + 2,82.F1 - 7,89.F2 - 2,06.F3 + 3,93.F1.F2 - 2,69.F2.F3 - 2,98.F1.F3 - 1,77.F1.F2.F3$$

Avec :

- *F1, le facteur taille de tas (-1 pour un tas de 2 à 3 m, 1 pour un tas de 4 à 5 m)*
- *F2, le facteur type de bois (-1 pour du bois abattu depuis moins de 6 mois, 1 pour du bois abattu depuis plus de 6 mois)*
- *F3, le facteur granulométrie (-1 pour une granulométrie fine à moyenne, 1 pour une granulométrie moyenne à grosse)*

Ces équations permettent ainsi d'évaluer la production de chaleur ainsi que l'efficacité de séchage pour un tas de plaquettes forestières dont les paramètres sont dans la gamme des essais réalisés. Le Tableau 17 permet de comparer les valeurs expérimentales de ΔT et ΔHB avec les valeurs calculées grâce aux équations données précédemment.

taille du tas	type de bois	granulométrie	Expérimental		Calculé	
			ΔT	ΔHB	dT	dHB
1	1	1	70,4	21,8	70,4	21,8
1	1	2	45,0	25,5	45,0	29,6
1	2	1	25,2	0,0	25,2	-4,1
1	2	2	20,0	0,0	20,0	0,0
2	1	1	55,0	22,0	55,0	22,0
2	1	2	53,4	20,8	53,4	25,0
2	2	1	31,0	23,0	31,0	18,9
2	2	2	23,5	4,0	23,5	4,0

Tableau 17 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées de ΔT et ΔHB .

La différence entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées sont peu importantes dans le cas du calcul de ΔHB . Le calcul de ΔT donne exactement le résultat expérimental. Ces équations permettent donc d'évaluer correctement ΔT et ΔHB .

5.2.2 Influence du type de stockage

Dans ce paragraphe, le paramètre pris en compte est le type de stockage. Les plaquettes forestières peuvent être stockées à l'air libre (état 1), sous bâche Toptex (état 2) ou bien sous hangar (état 3). Il existe ainsi 3 possibilités pour ce paramètre, la Figure 63 montre l'influence du mode de stockage sur l'élévation de température et l'efficacité de séchage.

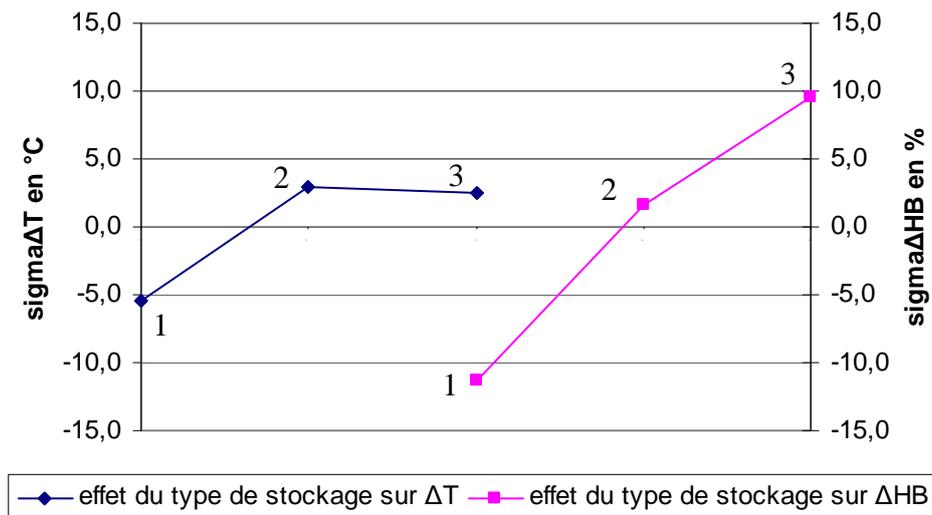


Figure 63 : Influence du type de stockage sur $\sigma\Delta T$ et $\sigma\Delta HB$

Le séchage à l'air libre est la solution la moins efficace. Au niveau de l'élévation de température, le séchage sous bâche et sous hangar donnent des résultats identiques. Cependant, pour l'efficacité de séchage, le stockage sous hangar est une bien meilleure solution que le séchage sous bâche Toptex. Globalement, à l'issue de l'ensemble des essais, la valeur moyenne de l'humidité du bois lors du stockage sous hangar est de 25 % (des valeurs plus basses ont été obtenues). Dans le cas du stockage sous bâche Toptex, la valeur minimale est de 30 % sur brut ou moins et dans le cas de stockage à l'air libre, on atteint une humidité moyenne de 35 % sur brut, cette valeur dépendant beaucoup de la pluviométrie et donc des reprises d'humidité. Ces valeurs d'humidité atteintes lors du séchage seront utilisées dans la partie traitant de l'approche technico-économique du séchage des plaquettes forestières.

5.2.3 Influence de la saison de stockage

Nous avons déjà indiqué l'importance de la fraîcheur du bois utilisé dans les tas de plaquettes. Le bois peut être mis en tas également lors de la saison froide d'octobre à mars (état 1) ou bien lors de la saison chaude, le reste de l'année (état 2). Les essais effectués ont permis de mettre en évidence l'impact des changements de température extérieure sur la température dans le tas. La Figure 64 montre l'influence de la saison de stockage sur les réponses $\sigma\Delta T$ et $\sigma\Delta HB$.

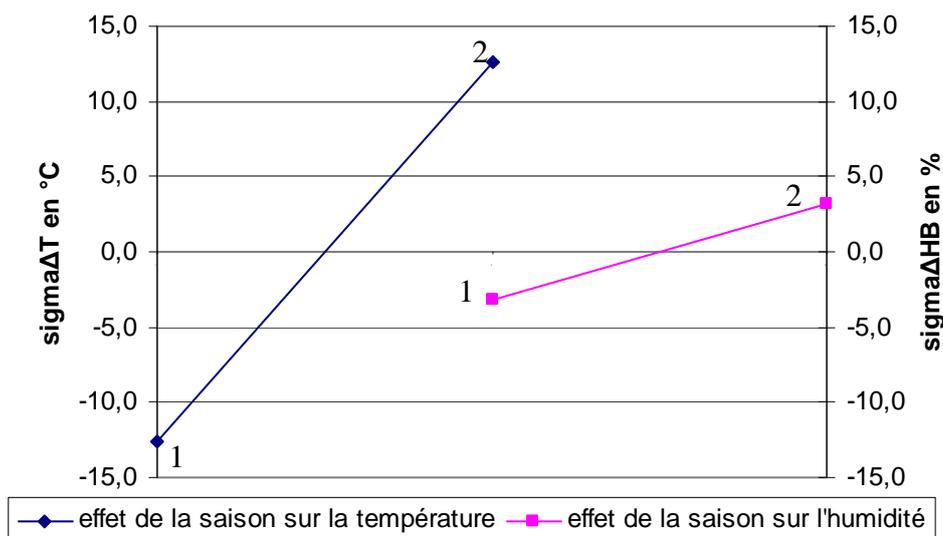


Figure 64 : Influence de la saison de stockage sur $\sigma\Delta T$ et $\sigma\Delta HB$

La saison chaude (de mai à septembre) est plus propice à l'élévation de température dans les tas de plaquettes forestières et à l'efficacité de séchage. Il semble donc préférable de faire des stocks en été plutôt qu'en hiver, ce qui paraît logique car les niveaux de température en France restent modérés, permettant ainsi l'action des bactéries et des champignons.

D'une manière générale, les paramètres qui favorisent la production de chaleur améliorent également l'efficacité du séchage. Cela montre qu'il existe une corrélation forte entre ces deux grandeurs. Pour favoriser le séchage des plaquettes forestières, il semble donc judicieux d'utiliser du bois fraîchement abattu, de faire des tas de tailles importantes et de construire les tas pendant la saison chaude. Du point de vue des modalités de stockage, l'utilisation d'un hangar reste la meilleure solution mais il est nécessaire de faire un calcul de rentabilité pour savoir si l'investissement est viable économiquement. L'étude économique détaillée ci après permettra d'apporter une réponse à ce questionnement. Du point de vue granulométrique, les plaquettes forestières fines sont préférables pour atteindre une faible humidité mais le temps de séchage sera plus long : environ 2 mois pour une granulométrie moyenne à grosse et 3 mois pour une granulométrie fine à moyenne pour une même humidité finale. Une granulométrie plus faible permettra cependant de mieux sécher les plaquettes.

Les analyses sur l'influence des principaux paramètres ont permis d'obtenir une équation de comportement du système. Cette équation sera utilisée pour valider les résultats obtenus lors de la modélisation du séchage en tas.

6 Conclusion

Les essais réalisés ont permis de mieux comprendre les variations de température et d'humidité observées dans un tas de plaquettes forestières lors de son stockage. Grâce à ces essais, un mémento des bonnes pratiques à mettre en œuvre lors du séchage en tas a été réalisé. Ce document, accessible à tous pourra être utilisé par les coopératives forestières pour éviter les mauvaises pratiques et permettre la fabrication des tas de plaquettes dans de bonnes conditions.

Les analyses des gaz évacués des tas de plaquettes forestières comportent des composés terpéniques, principalement de type pinène, limonène, camphène mais ne permettent pas de manière certaine de définir le type d'action microbiologique se déroulant dans le tas. La présence d'éthanol dans les gaz effluents laisse penser à une respiration anaérobie de cellules de bois ou des bactéries.

Le plan d'expériences appliqué aux essais a permis de préciser les paramètres influents sur le séchage en tas. Ainsi, la « granulométrie », la « taille de tas » et la « fraîcheur du bois » ont pu être confrontés en fonction de leurs états respectifs. Dans notre cas, la fraîcheur du bois est le paramètre le plus influent. La taille du tas et la granulométrie sont d'importances similaires. Deux équations de prédiction de la température maximale au sein du tas, de l'humidité finale dans le tas ont pu être proposées. Les paramètres « type de stockage » et « saison de stockage » ont également été étudiés et montrent que le séchage se déroule mieux sous hangar et durant les périodes où les températures extérieures sont chaudes (mai à septembre).

Chapitre IV : Modélisation du séchage des plaquettes forestières

Comme nous avons pu le voir dans les chapitres précédents, le séchage des plaquettes forestières peut s'effectuer de manière naturelle en tas ou bien de manière artificielle. Parmi les solutions de séchage artificiel, le séchage en séchoir tunnel et en séchoir rotatif sont des procédés assez bien connus et bien adaptés à nos conditions, mais dont le coût relativement important rend l'utilisation difficilement rentable économiquement. Le séchage en lit fixe mobile quant à lui est encore peu ou pas utilisé et peut être rentable au niveau économique. Son optimisation passe cependant par l'élaboration d'un modèle de comportement pour le dimensionnement et la conduite de séchage. Ce type de séchage a l'intérêt principal de pouvoir utiliser le silo de stockage en amont d'une chaudière comme réacteur de séchage, l'énergie généralement perdue dans les fumées pouvant aussi être récupérée et utilisée pour le séchage. Cependant, pour écrire un modèle, il est nécessaire de connaître le comportement des plaquettes forestières en contact avec de l'air chaud et plus ou moins humide. Des essais ont ainsi été menés en laboratoire afin de déterminer une relation permettant d'évaluer le coefficient de transfert global caractérisant le transfert d'eau entre les particules de bois et le milieu gazeux environnant en fonction des principales grandeurs opératoires relatives au séchage : température, humidité de l'air, vitesse de la phase gazeuse, dimensions caractéristiques des plaquettes. Ce coefficient de transfert global prend alors en compte la résistance interne (migration de l'eau dans les particules), ainsi que la résistance externe (retrait de l'eau à la surface de la particule par l'air) lors du séchage. Lors du séchage en lit fixe ou en tas, les vitesses d'air étant très faibles, la résistance interne devient alors prépondérante et la résistance externe négligeable. Pour définir le coefficient de transfert global, nous avons donc choisi d'effectuer des essais en enceinte climatique pour des vitesses d'air également réduites. Le coefficient déterminé ainsi doit donc être très proche de ce que nous obtenons en lit fixe.

1 Détermination du coefficient de transfert global

1.1 Objectif et protocole

La détermination du coefficient de transfert global est réalisée dans une enceinte climatique où l'humidité et la température de la phase gazeuse sont parfaitement maîtrisées. La cinétique du séchage est suivie par la perte de masse (environ 100 grammes à 50% d'humidité sur brut) dans une atmosphère contrôlée. La masse de particules est suffisamment faible pour ne pas influencer la cinétique de séchage.

La Figure 65 présente le dispositif expérimental de mesure de perte de masse en enceinte climatique. Une nacelle où est disposée une couche de plaquettes forestières broyées est suspendue dans l'enceinte pour y être pesée toutes les 15 secondes. Les morceaux de plaquettes forestières broyées sont disposés pour éviter leur chevauchement : ils sont entourés principalement d'air humide, excepté les parties en contact avec la nacelle en grillage. La maille du grillage composant la nacelle est de 4 mm et les particules utilisées sont celles obtenues par tamisage sur grilles à maille carrée de 10 mm et retenues sur une grille à maille carrée de 5 mm.



Figure 65 : Dispositif expérimental de séchage en enceinte climatique.

1.2 Résultats

Les mesures sont effectuées à différentes températures : 40, 60 et 80°C. Pour chaque niveau de température, l'humidité relative de l'air a été fixée à des valeurs comprises entre 30

et 90 %. La Figure 66 présente les résultats des essais menés à 40°C, les humidités relatives étudiées étant respectivement de 30, 50, 70 et 90%.

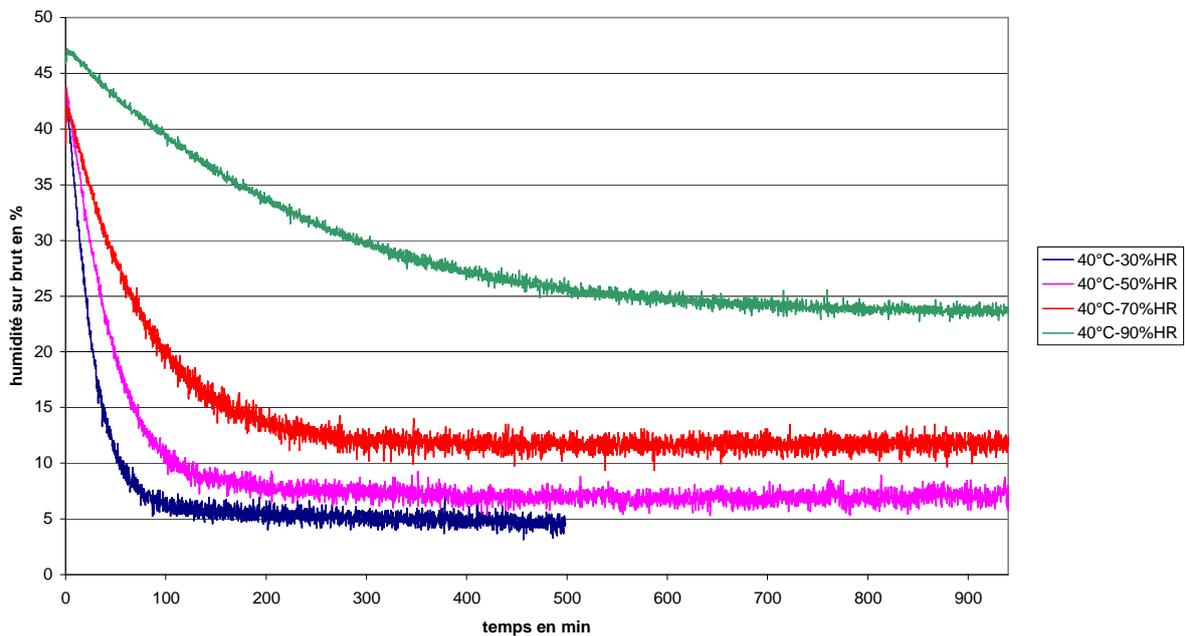


Figure 66 : Séchage en enceinte climatique à 40°C pour différentes humidités relatives.

Il apparaît clairement que la vitesse de séchage diminue avec un accroissement de l'humidité de l'air extérieur. Cette évolution est tout à fait logique dans la mesure où le transfert d'eau ne peut que diminuer avec l'accroissement de l'humidité de l'air extérieur.

1.3 Coefficients globaux de transfert

Les courbes de séchage obtenues précédemment peuvent être modélisées simplement afin d'obtenir un coefficient global de transfert de matière (k_X) caractéristique de l'échange d'eau. Le flux d'eau transféré peut être exprimé sous la forme :

$$\varphi = k_X \cdot (X - X^*) \quad (3)$$

Avec :

- k_X le coefficient global de transfert de matière,
- X l'humidité absolue du bois
- X^* l'humidité absolue du bois en équilibre thermodynamique avec l'humidité de l'air

Ainsi, le bilan de l'eau au niveau de la particule s'écrit à l'instant t :

$$m_0 \frac{dX}{dt} = -k_x \cdot S \cdot (X - X^*) \quad (4)$$

Avec :

- m_0 la masse des plaquettes anhydres
- S surface extérieure des plaquettes en contact avec l'air extérieur

En posant $k_x \cdot S = K$ (conductance globale de transfert) et en supposant $k_x \cdot S$ constant au cours du temps, l'intégration de $(4) \quad m_0 \frac{dX}{dt} = -k_x \cdot S \cdot (X - X^*)$ (4) conduit à la relation (5) :

$$-Ln \frac{X - X^*}{X_0 - X^*} = \frac{K}{m_0} t \quad (5)$$

Le tracé de $-Ln \frac{X - X^*}{X_0 - X^*}$ en fonction du temps (Figure 67) conduit bien à des relations

linéaires, confirmant ainsi que la modélisation préconisée est suffisante pour représenter le séchage dans ces conditions opératoires. Elle permet donc d'aboutir à la valeur de la pente K/m_0 qui est caractéristique du séchage dans nos conditions.

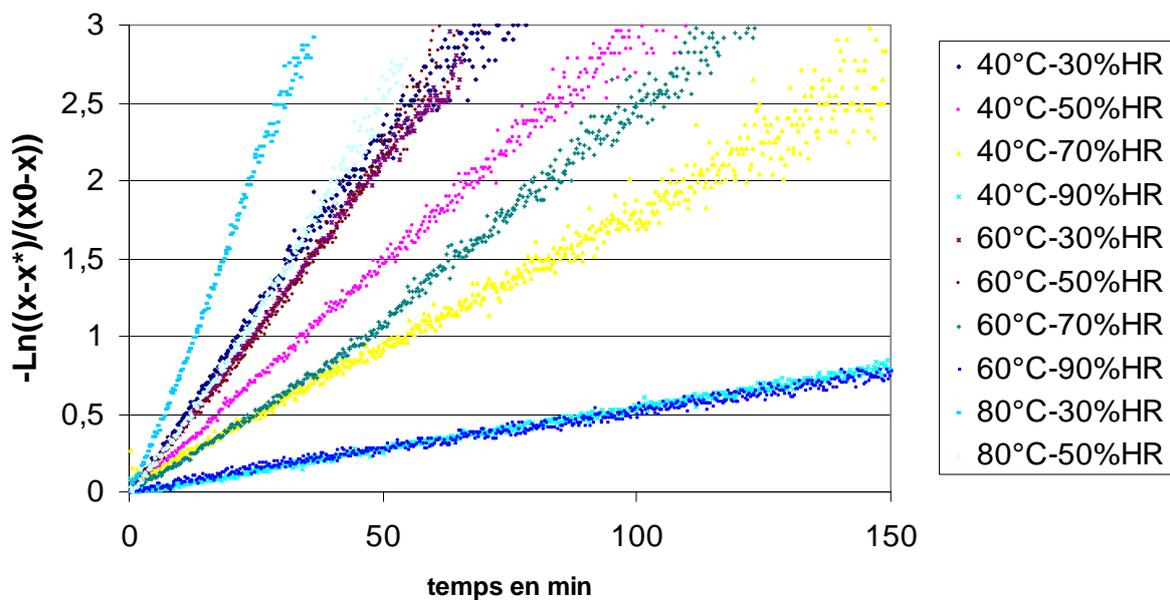


Figure 67 : Traitement des données obtenues lors du séchage en enceinte climatique.

Les résultats obtenus correspondent à une certaine granulométrie : le facteur K/m_0 est dépendant du rapport entre la surface d'échange et la masse d'une particule. Si l'on souhaite élargir l'écriture à diverses granulométries, il faut revenir à un coefficient k_X indépendant de la surface. À partir de la pente des relations linéaires, la valeur de k_X peut être obtenue par la relation :

$$\frac{K}{m_0} = \frac{k_X}{m_0} \times S = k_X \frac{V}{m_0} \cdot \frac{S}{V} = k_X \frac{a}{\rho_0} \quad (6)$$

Avec :

- $a=S/V$ la surface spécifique des particules en m^{-1} ,
- ρ_0 la masse volumique anhydre des plaquettes forestières,

Dans nos essais, les particules de plaquettes forestières ont une surface spécifique d'environ $770 m^{-1}$. La valeur de ρ_0 a été mesurée sur différents échantillons et peut être considérée égale à $430 kg.m^{-3}$. Le Tableau 18 résume les valeurs de k_X obtenues en fonction des essais.

	température				
humidité	40°C	55°C	60°C	71°C	80°C
10				7,85E-04	
15		5,97E-04			
30	4,01E-04				7,67E-04
50	2,77E-04		4,18E-04		4,55E-04
70	1,69E-04		2,28E-04		
90	5,03E-05		4,47E-05		

Tableau 18 : Coefficient k_X estimé en fonction des essais en $kg.m^{-2}.s^{-1}$.

Ces valeurs dépendent de la température et de l'humidité relative de l'air. Pour chercher la relation liant cette valeur à ces paramètres, il est envisageable de tracer l'évolution des valeurs de k_X obtenues en fonction de l'humidité relative de l'air pour les différentes températures étudiées. L'évolution du coefficient k_X en fonction de l'humidité relative de l'air semble alors linéaire. De plus, ces courbes semblent converger vers 0 lorsque l'humidité relative de l'air est à 100%, ce qui est tout à fait logique, l'air saturé n'ayant plus aucun pouvoir séchant.

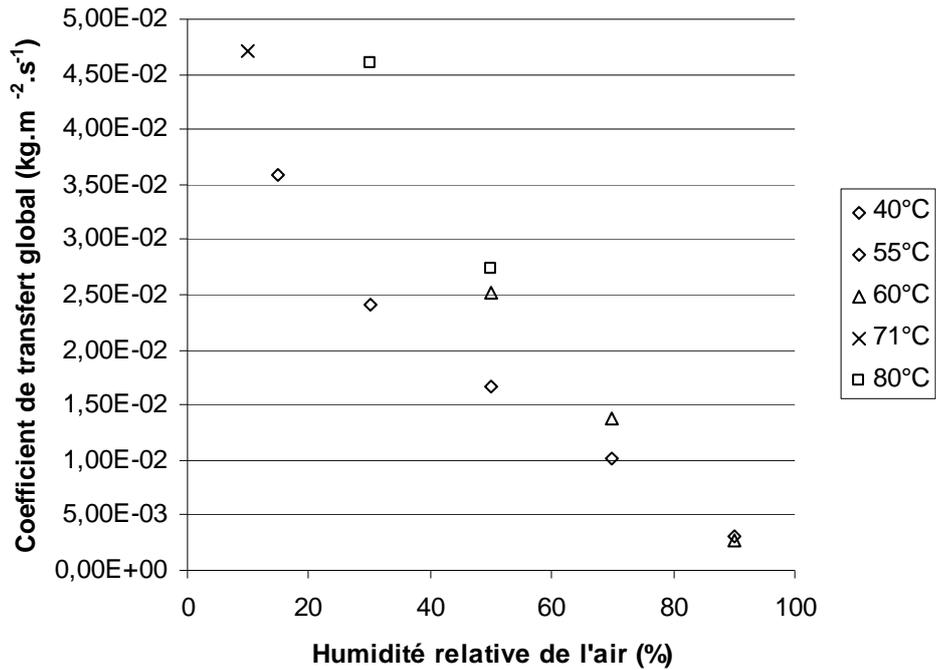


Figure 68 : Coefficient k_x en fonction des essais.

Pour chaque niveau de température, il apparaît que le coefficient directeur des droites est différent. En traçant l'évolution de ce coefficient directeur en fonction de la température, on obtient de nouveau une courbe à l'allure linéaire.

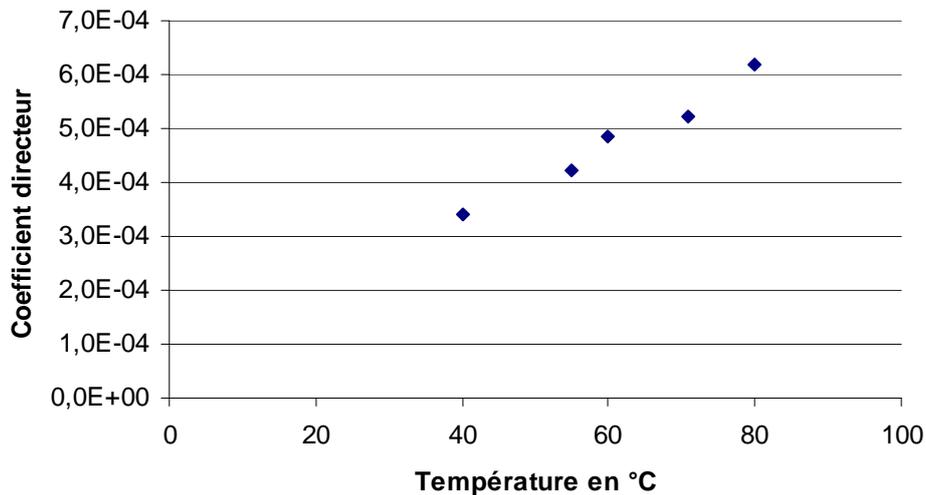


Figure 69 : Coefficient directeur des courbes d'évolution de k en fonction de l'humidité relative de l'air en fonction de la température.

En admettant que l'allure des courbes est linéaire, le coefficient global de transfert k_x en fonction de la température et de l'humidité relative de l'air peut être représenté par une

relation du type $k_x = (a.T + b).(1 - HR).c$. À partir de nos résultats, nous pouvons déterminer les valeurs de a, b et c. On obtient alors :

$$k_x = (6,814.10^{-6}.(T - 273) + 6,027.10^{-5}).(1 - HR).100/60 \text{ en } \text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1} \quad (7)$$

Avec :

- *HR l'humidité relative de l'air,*
- *T la température de l'air en K.*

Cette équation sera utilisée dans la suite pour dimensionner un séchoir silo (lit fixe mobile). Cette représentation mathématique relativement simple peut cependant être améliorée car elle ne prend pas en compte certaines grandeurs opératoires : les études menées par L. Chrusciel montrent par exemple l'influence de la surface spécifique des particules et de la vitesse de l'air de séchage sur le coefficient de transfert global [66]. L'équation établie lors de ces travaux était représentative du séchage de planches de bois et non de plaquettes forestières, dont les dimensions sont différentes. Nous avons choisi d'utiliser une relation de même forme en modifiant les coefficients à partir des résultats de nos essais. La relation obtenue est alors :

$$\frac{1}{k_x} = a_0 \cdot \exp\left(\frac{c_0}{T}\right) \cdot e + b_0 \cdot \exp\left(\frac{c_0}{T}\right) \cdot u^{-n} \cdot \exp\left[\frac{-(1 - HR)}{(0,3 - X^*)}\right] \quad (8)$$

Dans cette équation, k est exprimé en $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, avec :

- *a_0, b_0, c_0, n pris respectivement à $0,12 \text{ ms.kg}^{-1}, 23,9 \text{ m}^2.\text{kg}^{-1}, 2250 \text{ K}$ et $0,5$ à partir de nos résultats,*
- *e, l'inverse de la surface spécifique des particules en mm,*
- *HR, l'humidité relative de l'air,*
- *T, la température de l'air en K,*
- *u, la vitesse de l'air en m.s^{-1} ,*
- *X^* , l'humidité du bois à l'équilibre avec l'air.*

La relation (5) sera utilisée pour modéliser le séchage en lit fixe mobile. La description et le dimensionnement d'un séchoir à lit fixe mobile développés ci après seront réalisés à l'aide de deux modèles. Le premier sera un modèle simplifié et le second un modèle plus complet.

2 Modélisation du séchage en lit fixe mobile à contre-courant

A partir des valeurs du coefficient global de transfert et des caractéristiques des plaquettes forestières, le dimensionnement d'un séchoir peut être réalisé selon plusieurs méthodes de résolution. Dans notre cas, nous avons sélectionné deux modes :

- Par un modèle simplifié, le lit étant découpé en zones de dimension finie et en utilisant la relation mathématique donnée en (4),
- Par un modèle plus complet en résolvant les équations de bilans de matière et d'énergie écrites au niveau d'une épaisseur différentielle du lit.

Les dimensionnements proposés dans la suite de ce chapitre utilisent les équations de coefficient d'échange global k_x déterminées précédemment. Les deux parties suivantes traiteront successivement des deux modèles mis au point.

2.1 *Modèle simplifié*

Le modèle proposé dans cette partie est réalisé par l'intermédiaire d'une feuille de calcul et nécessite l'utilisation d'un tableur. Le modèle permet de dimensionner un séchoir en fonction des données d'entrées suivantes :

- L'humidité sur brut initiale
- L'humidité sur brut souhaitée
- Le débit de solide sec à sécher
- La masse volumique apparente des plaquettes forestières
- La masse volumique réelle du bois composant les plaquettes forestières
- La surface spécifique des plaquettes forestières
- La surface du silo de séchage

Le modèle permet soit de calculer la température d'air en entrée du séchoir (connaissant le débit d'air), soit de calculer le débit d'air (connaissant la température d'air en entrée du séchoir).

Le modèle repose sur une équation de conservation de masse, une équation de conservation d'énergie, une équation traduisant le coefficient global de transfert et une équation donnant l'humidité d'équilibre du bois en fonction des caractéristiques de l'air. L'équation de conservation de masse utilisée est :

$$-Ln \frac{X - X^*}{X_0 - X^*} = \frac{k_x \cdot a}{\rho_0} t \quad (9)$$

Avec :

- a la surface spécifique des plaquettes forestières en m^{-1} ,
- k_x la constante globale de transfert en $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,
- ρ_0 la masse volumique réelle anhydre des plaquettes forestières,
- t le temps en s,
- X l'humidité absolue des plaquettes forestières,
- X^* l'humidité absolue d'équilibre des plaquettes forestières,
- X_0 l'humidité initiale absolue des plaquettes forestières.

L'expression donnant la formule de la constante globale de transfert utilisée dans ce modèle est la relation (7) :

$$k_x = (6,814 \cdot 10^{-6} \cdot (T - 273) + 6,027 \cdot 10^{-5}) \cdot (1 - HR) \cdot 100 / 60$$

Avec :

- HR l'humidité relative de l'air,
- T la température de l'air en K.

L'évaluation de l'humidité absolue d'équilibre du bois est obtenue à l'aide de la corrélation proposée par Lartigue et Puiggali [65] :

A, B, C, Q : coefficients de la corrélation proposée par Lartigue et Puiggali

HR : humidité relative de l'air

T : température de l'air en Kelvin

X^* : humidité absolue d'équilibre du bois en kg d'eau par kg de bois sec

$$X^* = \frac{\text{Ln}(Q)}{100.\text{Ln}(B)} \quad (10)$$

Avec :

- $Q = \frac{C - \text{Ln}(HR)}{A}$
- $A = - 2,86.10^{-5}.T^2 - 1,075.10^{-2}.T + 10,238$
- $B = - 5,414.10^{-4}.T + 1,0134$
- $C = 4,97.10^{-6}.T^2 - 2,667.10^{-3}.T + 0,3548$

Pour les calculs, l'équation a été discrétisée en fonction de la position dans le lit. On calcule pour chaque zone du lit les valeurs suivantes :

- L'humidité absolue des plaquettes forestières X
- L'humidité d'équilibre des plaquettes forestières X*
- L'humidité initiale des plaquettes forestières X₀ qui est égale à la valeur de X dans la partie précédente
- La valeur de k_X en fonction de la température et de l'humidité de l'air.

La valeur de t pour chaque partie correspond au temps de passage des plaquettes forestières dans la zone considérée, elle dépend du débit de solide anhydre et de la surface du silo. Le réacteur est discrétisé en zone de 0,1 cm comme schématisé sur la Figure 70.

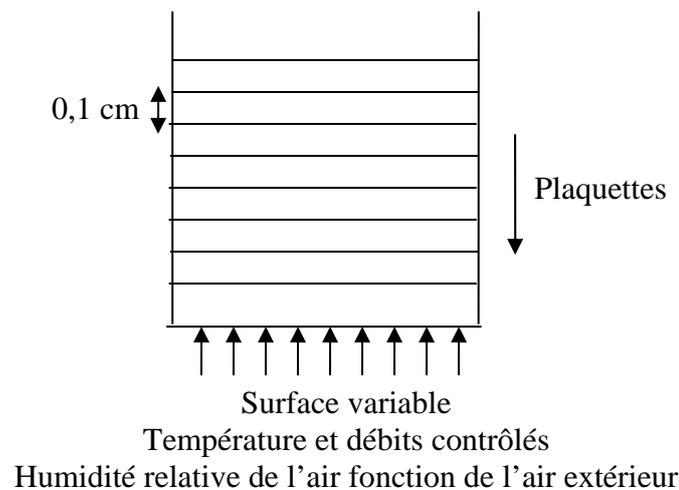


Figure 70 : Représentation d'un lit fixe mobile.

A partir du premier pas de calcul où l'on connaît les caractéristiques de l'air et du solide, le bilan matière (9) permet de connaître l'humidité absolue du bois dans la zone suivante du lit. On peut ainsi évaluer la quantité d'eau évaporée et donc la nouvelle humidité absolue de l'air qui entre dans la zone suivante.

Pour le calcul de la température de l'air à la sortie de chaque section le bilan d'énergie suivant est posé pour un pas de temps donné :

$$M_{air} \cdot C_{p_a} \cdot T_{entrée} + M_{eau\ entrée} \cdot C_{p_e}^l \cdot T_{entrée} = M_{air} \cdot C_{p_a} \cdot T_{sortie} + M_{eau\ sortie} \cdot C_{p_e}^l \cdot T_{sortie} + \Lambda(0) \cdot (M_{eau\ sortie} - M_{eau\ entrée}) \quad (11)$$

Avec :

- $C_{p_e}^v$ et C_{p_a} les chaleurs spécifiques de l'eau vapeur et de l'air en $J.kg^{-1}.K^{-1}$,
- $\Lambda(0)$ la chaleur latente de vaporisation de l'eau à $0^\circ C$,
- M_{air} la masse d'air qui passe dans une portion du lit pendant le pas de temps défini en kg,
- $M_{eau\ entrée}$ et $M_{eau\ sortie}$ les masses d'eau entrant et sortant de la portion de lit considérée en kg,
- $T_{entrée}$ et T_{sortie} les températures de l'air en entrée et en sortie de la partie de lit de plaquettes forestières considérée, en K.

Ce bilan est appliqué à chaque section du lit pour déterminer les niveaux de température et d'humidité relative.

Ces calculs permettent d'évaluer la température et l'humidité relative de l'air ainsi que l'humidité absolue des plaquettes dans les différentes zones du lit.

2.2 Modèle plus complet

Le modèle proposé ici a été programmé sur Octave qui est un logiciel de calcul numérique dont le fonctionnement est proche de Matlab. Le modèle est basé sur les équations de conservation de masse, les équations de conservation de l'énergie, la relation permettant d'évaluer le coefficient global de transfert et la relation donnant l'humidité d'équilibre du bois en fonction des caractéristiques de l'air. L'écoulement des phases gazeuses et solides dans le

lit est supposé du type piston à contre-courant. Les équations de bilan peuvent être écrites sur le gaz et sur le solide.

Les équations de bilan de matière en régime permanent sont :

$$G \cdot \frac{dW}{dz} = k_x \cdot a \cdot V \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (X - X^*) \quad (12)$$

$$G \cdot (W - W_e) = M_s (X - X_s) \quad (13)$$

Les équations de conservation de l'énergie utilisées sont :

$$G \cdot [C_{pa} + W \cdot C_{pe}^v] \cdot \frac{dT_g}{dz} + k_x \cdot a \cdot V \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (X - X^*) \cdot C_{pe}^v \cdot (T_g - T_s) = h \cdot a \cdot V (T_s - T_g) \quad (14)$$

$$M_s \cdot [C_{p_B} + X \cdot C_{pe}^l] \cdot \frac{dT_s}{dz} + k_x \cdot a \cdot V \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (X - X^*) \cdot [\Lambda(0) + (C_{pe}^v - C_{pe}^l) \cdot (T_s - 273)] = h \cdot a \cdot V (T_g - T_s) \quad (15)$$

Avec :

- a la surface spécifique des plaquettes forestières en m^{-1} ,
- C_{pa} la chaleur spécifique de l'air en $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$,
- C_{p_B} la chaleur spécifique des plaquettes forestières en $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$,
- C_{pe}^l la chaleur spécifique de l'eau liquide en $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$,
- C_{pe}^v la chaleur spécifique de l'eau vapeur en $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$,
- ε la porosité du lit de plaquettes forestières,
- G le débit massique d'air en $kg \cdot s^{-1}$,
- h le coefficient de convection $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$,
- k la constante globale de transfert en $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,
- $\Lambda(0)$ la chaleur latente de vaporisation de l'eau à $0^\circ C$ en $J \cdot kg^{-1}$,
- M_s le débit de solide sec en $kg \cdot s^{-1}$,
- T_g la température de l'air de séchage en K ,
- T_s la température des plaquettes forestières en K ,
- V le volume du lit fixe supposé vide en m^3 ,
- W l'humidité absolue de l'air en $kg_{eau} \cdot kg_{air}^{-1}$,
- W_e l'humidité absolue à l'équilibre de l'air en $kg_{eau} \cdot kg_{air}^{-1}$,
- X l'humidité absolue des plaquettes forestières,
- X^* l'humidité absolue à l'équilibre des plaquettes forestières,

- X_s l'humidité absolue finale des plaquettes forestières.
- z la côte réduite du lit mobile (compris entre 0 et 1)

L'équation utilisée pour évaluer le coefficient global de transfert dans ce modèle est la suivante :

$$\frac{1}{k_x} = a_0 \cdot \exp\left(\frac{c_0}{T}\right) \cdot e + b_0 \cdot \exp\left(\frac{c_0}{T}\right) \cdot u^{-n} \cdot \exp\left[\frac{-(1-HR)}{(0,3-X^*)}\right]$$

Dans cette équation, k est exprimé en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, avec :

- a_0, b_0, c_0, n pris respectivement à $0,12 \text{ ms} \cdot \text{kg}^{-1}$, $23,9 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, 2250 K et $0,5$ en fonction des essais,
- e l'épaisseur des particules en mm ,
- HR l'humidité relative de l'air,
- T la température de l'air en K ,
- u la vitesse de l'air en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,
- X^* l'humidité du bois à l'équilibre avec l'air.

L'humidité absolue d'équilibre du bois est calculée à l'aide de la corrélation proposée par Lartigue et Puiggali rappelée précédemment.

La résolution numérique des équations différentielles des bilans est effectuée à l'aide de la méthode de Runge-Kutta classique d'ordre quatre (RK4). Le code de calcul est fourni en annexe 1.

2.3 Comparaison entre les deux modèles

La principale différence entre les deux modèles réside dans l'approche du problème :

- pour le modèle simplifié, seuls deux phénomènes sont pris en compte : l'énergie nécessaire pour retirer l'eau liquide du bois par l'air sécheur et l'énergie que l'air doit apporter pour accueillir cette eau ;
- dans le cas du modèle plus complet, l'élévation de température du solide et les phénomènes de convection sont pris en compte en plus des phénomènes précédents.

Afin de comparer les deux modèles et de les confronter avec l'expérience, un essai de séchage en lit fixe non mobile a été mené. Le réacteur du dispositif expérimental est équipé de thermocouples qui permettent de connaître la taille du front de séchage ainsi que les températures d'air en entrée et en sortie. Un anémomètre permet de connaître la vitesse de l'air en entrée du réacteur et l'humidité relative. La température de l'air en entrée est contrôlée.

Pour l'essai réalisé, l'humidité initiale absolue des plaquettes forestières était de 1 (soit 50% d'humidité sur brut) et l'humidité absolue finale 0,05 (environ 5 % d'humidité sur brut). La température de l'air en entrée du séchoir était de 80°C avec un débit de $2,032 \cdot 10^{-2} \text{ kg.s}^{-1}$. La surface du réacteur est de 0,04 m². L'expérience se déroulant en lit fixe non mobile, le débit de solide utilisé pour la simulation sur les deux modèles a été obtenu en divisant la quantité de solide séché par le temps de séchage nécessaire lors de l'essai. Le Tableau 19 récapitule les données de l'essai et des simulations (les principaux résultats apparaissent en bleu).

	modèle simplifié	modèle complet	données expérimentales
humidité absolue initiale	1		
humidité absolue finale	0,05		
débit de solide	$4,36 \cdot 10^{-4} \text{ kg.s}^{-1}$		séchoir en lit fixe non mobile
température de l'air en entrée	80°C		
flux d'air	$2,032 \cdot 10^{-2} \text{ kg.s}^{-1}$		
température de l'air en sortie	30,2°C	26,3°C	29°C
surface du réacteur	0,04 m ²		
volume du lit	0,014 m³	0,012 m³	0,015 m³

Tableau 19 : Comparaison entre les modèles et les données expérimentales à petite échelle.

Lors de l'essai, la température d'air en sortie du réacteur de séchage était de 29°C. Le modèle simplifié donne 30,2°C alors que le modèle complet donne 26,3°C. Les résultats fournis par les modèles sont proches et en accord avec l'expérience. Le volume d'échange, qui correspond à la quantité de solide en cours de séchage, est plus important lors de l'essai de séchage en lit fixe non mobile. Globalement, l'efficacité de séchage d'un lit fixe non mobile par rapport à un lit fixe mobile est, pour des conditions opératoires similaires, plus faible. Par suite, le débit de solide estimé à partir du volume de solide et du temps de séchage en système non mobile est plus faible que celui possible pour le système mobile pour une même efficacité de séchage. Ainsi, le débit de solide qui pourrait alimenter le lit fixe mobile est supérieur à la valeur estimée.

La Figure 71 montre le résultat de la simulation pour le modèle simplifié.

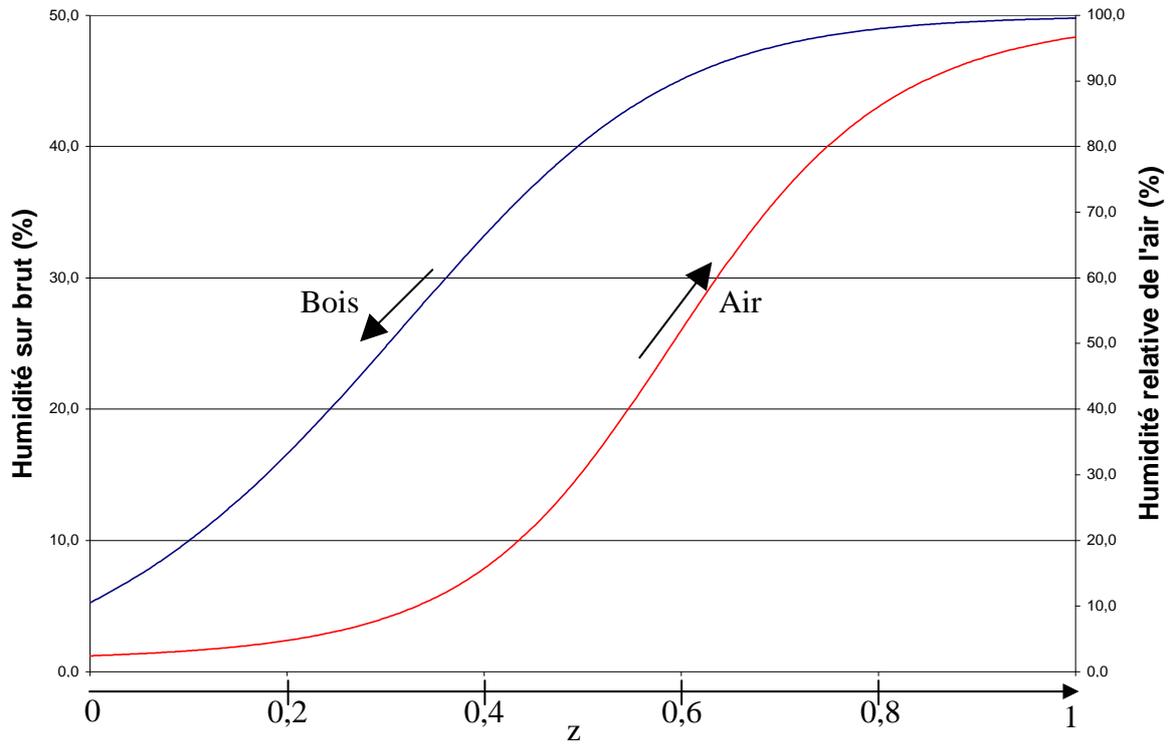


Figure 71 : Allure de la courbe d'humidité relative de l'air et de l'humidité du bois dans le lit de solide à petite échelle (modèle simplifié).

La Figure 72 montre le résultat de la simulation pour le modèle complet.

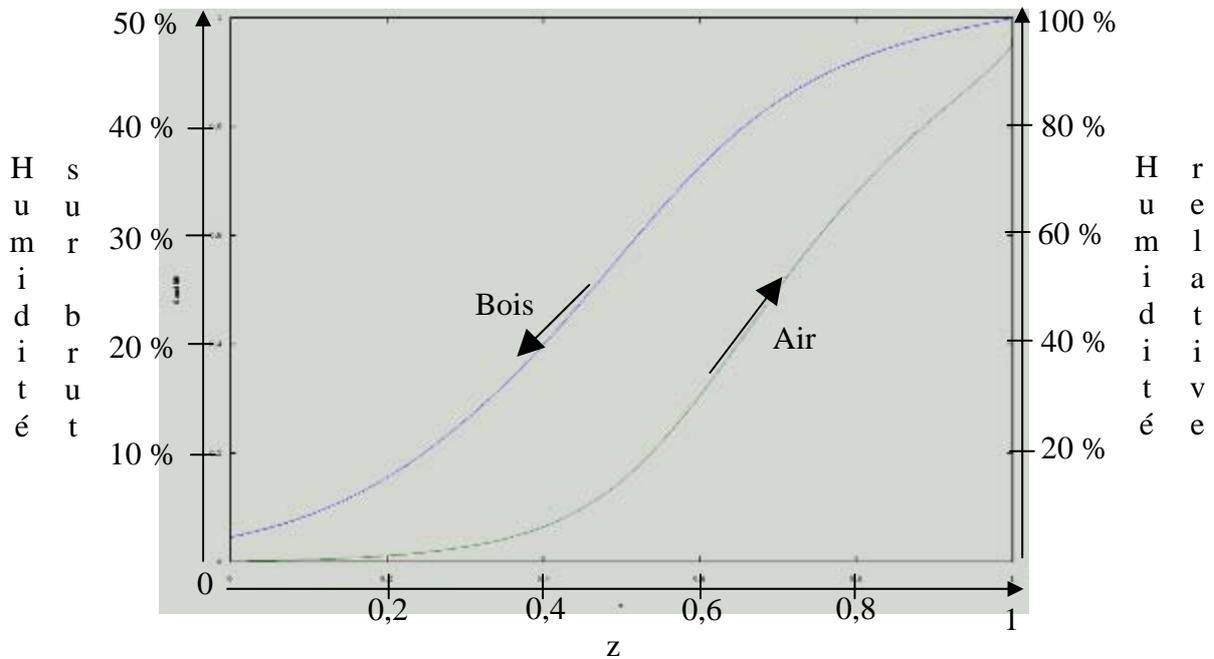


Figure 72 : Allure de la courbe d'humidité relative de l'air et de l'humidité du bois dans le lit de solide à petite échelle (modèle complet).

Les allures des courbes d'humidité de l'air et du bois sont similaires. Les deux modèles conduisent à des résultats proches bien que l'expression utilisée pour évaluer le coefficient de transfert global soit différente. Pour appuyer la comparaison entre les deux modèles, une simulation à plus grande échelle a été effectuée. On se propose alors de dimensionner un lit fixe mobile permettant de sécher des plaquettes forestières de 45 % à 20% d'humidité sur brut avec un débit de 2 t.h^{-1} . Les autres conditions opératoires sont données dans le Tableau 20.

	modèle simplifié	modèle complet
humidité absolue initiale	0,886	
humidité absolue finale	0,25	
débit de solide	$5,55 \cdot 10^{-1} \text{ kg.s}^{-1}$	
température de l'air en entrée	50°C	
flux d'air	$32,36 \text{ kg.s}^{-1}$	
température de l'air en sortie	23,3°C	22,0°C
surface du réacteur	100 m ²	
volume du lit	20 m³	17 m³

Tableau 20 : Comparaison entre les modèles et les données expérimentales à grande échelle.

Les valeurs de la température de sortie de l'air humide et du volume global d'échange obtenus pour les deux modèles sont proches et on peut dire qu'à plus grande échelle, les résultats obtenus pour les deux modèles semblent cohérents.

Après différents essais de simulations, le modèle simplifié paraît suffisant pour le dimensionnement d'un séchoir en lit fixe mobile. La plus grosse différence réside dans la mise en œuvre des deux modèles et le temps de calcul. Le modèle simplifié nécessite moins de 5 secondes pour aboutir à une solution alors que le modèle complet nécessite de longues heures par suite d'itérations nécessaires aux calculs des écoulements à contre-courant des phases gazeuses et solides, les conditions aux limites des deux phases se trouvant aux extrémités opposées du lit. Il est possible que l'emploi d'une autre méthode d'intégration numérique évitant les itérations permette de réduire sensiblement le temps de calcul et les divergences numériques.

A partir de nos divers résultats, il apparaît que le séchage en lit fixe mobile semble être une solution de séchage relativement simple à mettre en œuvre. Il peut donc être envisagé dans les années à venir que cette technique soit utilisée pour une unité de séchage alimentant des procédés de conversion thermochimique de biomasse : pyrolyse, pyrolyse-gazéification ou combustion. Toutefois à ce jour pour les unités industrielles existantes, le bois est alimenté

vert (à environ 50 % d'humidité sur brut) ou séché de manière naturelle. Il semble donc intéressant de développer un modèle permettant d'évaluer l'humidité finale dans un tas de plaquettes forestières en fonction des caractéristiques initiales des plaquettes : taille, humidité, température, ...

3 Modélisation du séchage naturel en tas

Le séchage naturel des plaquettes forestières fait intervenir beaucoup de phénomènes physicochimiques en dehors des phénomènes de transfert. Dans une première étape, seul un modèle à une dimension géométrique a été développé. Ce modèle pourra par la suite servir de base à l'établissement d'un modèle à deux dimensions géométriques.

3.1 Modèle mathématique à une dimension

Dans ce modèle, toutes les grandeurs dépendent d'une variable d'espace z et du temps t (Figure 73).

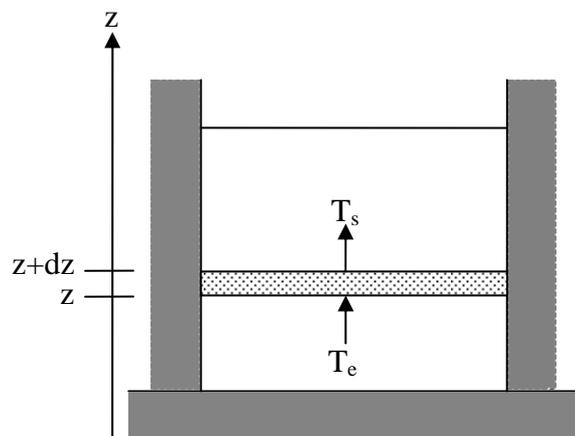


Figure 73 : Représentation d'un tas ne dépendant que d'une variable d'espace (modèle 1D).

Les bilans de matière et d'énergie dans l'élément de volume compris entre les hauteurs z et $z+dz$ s'écrivent respectivement :

Bilan de matière :

- Au niveau de la phase gazeuse :

- Pour l'eau vapeur

$$\frac{\partial(\rho_e \cdot u)}{\partial z} + \varepsilon \cdot \frac{\partial \rho_e}{\partial t} - k_x \cdot a \cdot (1 - \varepsilon) \cdot [X - X^*] = 0 \quad (16)$$

Avec :

a la surface spécifique des particules (rapport de la surface sur le volume) en m^{-1} ,

ε la porosité du lit de solide,

k_x le coefficient de transfert global en $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,

ρ_e la masse volumique de l'eau vapeur en $kg \cdot m^{-3}$,

X l'humidité absolue du bois

X l'humidité absolue du bois à l'équilibre avec l'air ambiant,*

u la vitesse de l'air en fût vide en $m \cdot s^{-1}$.

- Pour l'air sec

$$\frac{\partial(\rho_a \cdot u)}{\partial z} + \varepsilon \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial t} = 0 \quad (17)$$

Avec :

ρ_a la masse volumique de l'air sec en $kg \cdot m^{-3}$.

- Au niveau de la phase solide :

$$(1 - \varepsilon) \cdot \rho_0 \cdot \frac{\partial X}{\partial t} + k_x \cdot a \cdot (1 - \varepsilon) \cdot [X - X^*] = 0 \quad (18)$$

Avec :

ρ_0 la masse volumique du solide anhydre en $kg \cdot m^{-3}$. On supposera que cette masse volumique est constante car la dégradation biologique des particules reste faible.

Bilan énergétique global :

Dans le tas de particules, les vitesses d'écoulement de la phase gazeuse restent petites, aussi nous supposons que localement l'équilibre thermique entre les deux phases est réalisé. De plus, nous supposons que le tas est globalement adiabatique sur les surfaces latérales et qu'il existe une source d'énergie thermique due à la dégradation biologique de la matière solide. Avec ces hypothèses, le bilan global d'énergie entre les côtes z et $z+dz$ s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[\rho_a \cdot u \cdot \left(Cp_a \cdot T + \frac{\rho_e}{\rho_a} (\Lambda(0) + Cp_e^v \cdot T) \right) \right] + (1 - \varepsilon) \cdot \frac{\partial}{\partial t} [(Cp_B \cdot \rho_B + \rho_B \cdot X \cdot Cp_e^l) \cdot T] = q \cdot \rho_B \cdot (1 - \varepsilon) \quad (19)$$

Avec :

Cp_a la chaleur spécifique massique de l'air sec en $J.kg^{-1}.K^{-1}$,

Cp_B la chaleur spécifique massique du solide sec en $J.kg^{-1}.K^{-1}$,

Cp_e^l la chaleur spécifique massique de l'eau liquide en $J.kg^{-1}.K^{-1}$,

Cp_e^v la chaleur spécifique massique de la vapeur d'eau en $J.kg^{-1}.K^{-1}$,

$\Lambda(0)$ la chaleur latente de vaporisation de l'eau en $J.kg^{-1}$,

q le débit d'énergie produit par fermentation par unité de masse du solide sec en $J.kg^{-1}$,

T la température du solide et du gaz en K .

En tenant compte des équations de bilan de matière, l'équation (15) peut s'exprimer dans une forme où la dérivée partielle en fonction de z ne concerne que T :

$$\begin{aligned} & - \varepsilon \cdot Cp_a \cdot T \frac{\partial \rho_a}{\partial t} - \varepsilon \cdot (\Lambda(0) + Cp_e^v \cdot T) \frac{\partial \rho_e}{\partial t} + k_x \cdot a \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (X - X^*) \cdot (\Lambda(0) + (Cp_e^v - Cp_e^l) \cdot T) \\ & + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_0 \cdot (Cp_s + X \cdot Cp_e^l) \frac{\partial T}{\partial t} = q \cdot \rho_0 \cdot (1 - \varepsilon) - (\rho_a \cdot Cp_a + \rho_e \cdot Cp_e^v) \cdot u \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \end{aligned}$$

(15bis)

Aux équations de bilans de matière et d'énergie, il faut associer :

La loi des gaz parfaits :

$$P = \left(\frac{\rho_e}{M_e} + \frac{\rho_a}{M_a} \right) . R.T \quad (20)$$

Avec :

M_a la masse molaire de l'air en $kg.mol^{-1}$,

M_e la masse molaire de l'eau en $kg.mol^{-1}$,

P la pression totale de l'air en Pa,

R la constante des gaz parfaits en $J.kg^{-1}.mol^{-1}$.

Le bilan de quantité de mouvement :

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{4,16.\mu.(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} . a^2 . u \quad (21)$$

Avec :

μ la viscosité de l'air en Pa.s.

La relation permettant d'évaluer l'humidité absolue du bois en équilibre avec l'air ambiant

X^* :

La relation choisie est toujours celle de Lartigue et Puiggali [65]. On obtient alors :

$$X^* = \frac{\ln \left(\frac{C - \ln \left(\frac{\rho_{e_sat} . R.T . 100}{M_e . P_{sat}} \right)}{A} \right)}{100 . \ln(B)} \quad (22)$$

Avec :

A, B et C les coefficients définis par Lartigue et Puiggali avec :

$$A = - 2,86 . 10^{-5} . T^2 - 1,075 . 10^{-2} . T + 10,238,$$

$$B = - 5,414 . 10^{-4} . T + 1,0134,$$

$$C = 4,97 . 10^{-6} . T^2 - 2,667 . 10^{-3} . T + 0,3548,$$

M_e la masse molaire de l'eau en kg.mol^{-1} ,

P_{sat} la pression de vapeur saturante calculée avec la formule de Rankine :

$$P_{sat} = \exp\left(13,7 - \frac{5120}{T}\right) \cdot 101325 \quad (23)$$

La relation donnant le débit d'énergie

Elle est déduite d'une équation évaluant la perte de masse sèche des plaquettes forestières en fonction de la température et de l'humidité dans le bois [63]. La formule de départ ne prenant pas en compte l'humidité du bois, celle-ci a été légèrement modifiée.

La valeur de q exprimée en J.kg^{-1} , est donnée par la relation :

$$q = \alpha \cdot (-0,0066 + 0,3093 \cdot \frac{\rho_e}{\rho_a}) \cdot \frac{\exp(0,1141 \cdot ((T - 273) - 40))}{1 + (\exp(0,1141 \cdot ((T - 273) - 40)))^2} \cdot \frac{PCI_{anhydre_bois}}{3600} \cdot (X - X^*) \quad (24)$$

Avec $PCI_{anhydre_bois}$ le pouvoir calorifique anhydre inférieur du bois en J.kg^{-1} et α une valeur d'ajustement choisie pour que la réponse du modèle en température soit cohérente avec les essais de séchage en tas.

La relation donnant le coefficient global de transfert

$$k_x = (6,814 \cdot 10^{-6} \cdot (T - 273) + 6,027 \cdot 10^{-5}) \cdot (1 - HR) \cdot 100 / 60 \quad (25)$$

Avec :

- HR l'humidité relative de l'air,
- T la température de l'air en K .

Globalement, on dispose de 10 équations pour évaluer en fonction de z et t les 10 inconnues suivantes :

$$\rho_e, \rho_N, X, X^*, T, P, u, q, \rho_{e_sat}, k_X$$

Aux équations précédentes, il faut adjoindre :

Les conditions initiales suivantes :

$$\text{À } t=0, X = X_0, T = T_0, P = P_0 = 1 \text{ atm}$$

L'air initial est supposé saturé d'où $\rho_{e0} = \rho_{a0}$ et $\rho_{e0}^* = \rho_{e0}$

$$u = 0$$

Les conditions aux limites suivantes :

$$\text{À } z = 0, \frac{\partial \rho_e}{\partial z} = \frac{\partial \rho_a}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \text{ et } u = 0$$

Pour résoudre les équations aux dérivées partielles de bilan, on discrétise la variable z . Les équations différentielles ainsi obtenues sont résolues en fonction du temps. La programmation numérique du modèle est donnée en annexe 2.

3.2 Résolution du modèle

Le résultat de la modélisation présenté ici a été réalisé en utilisant une valeur de α de 0.28, une hauteur théorique de tas de 5 mètres discrétisée en 11 portions, une humidité absolue initiale à 1 (soit 50 % d'humidité sur brut) et une température initiale de 293 K. Les valeurs des autres paramètres sont :

$$a = 700 \text{ m}^{-1}$$

$$\Lambda(0) = 2536000 \text{ J.kg}^{-1}$$

$$C_{p_a} = 1005 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$\mu = 9.1 \cdot 10^{-6} \% \text{Pa.s}$$

$$C_{p_B} = 2100 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$M_a = 0.029 \text{ kg.mol}^{-1}$$

$$C_{p_e}^l = 4180 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$M_e = 0.018 \text{ kg.mol}^{-1}$$

$$C_{p_e}^v = 1850 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$\rho_0 = 300 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$\varepsilon = 0.75$$

$$R = 8.314 \text{ J.kg}^{-1}.\text{mol}^{-1}$$

Conditions initiales : $T_0 = 293 \text{ K}$, $\rho_{e0} = 0.01718 \text{ kg/m}^{-3}$, $\rho_{a0} = 1.203 \text{ kg/m}^{-3}$, $X_0 = 1$

Le modèle permet de suivre l'évolution de la température, de l'humidité du bois, de la masse volumique de l'eau vapeur et de l'air. L'évolution de la température et de l'humidité permet de comparer la modélisation aux expérimentations.

La Figure 74 représente l'évolution des températures dans le lit de plaquettes forestières en fonction de la hauteur sur une période de 3 jours. Le modèle ne prenant pas en compte de pertes thermiques, la température devient de plus en plus importante lorsque l'on s'approche du haut du lit de plaquettes forestières. De plus, les pertes étant nulles, seul l'air sortant du lit rafraîchit le tas. Après 36 heures, il semble que les pertes induites par la sortie de l'air en dehors du lit soient compensées par la production de chaleur.

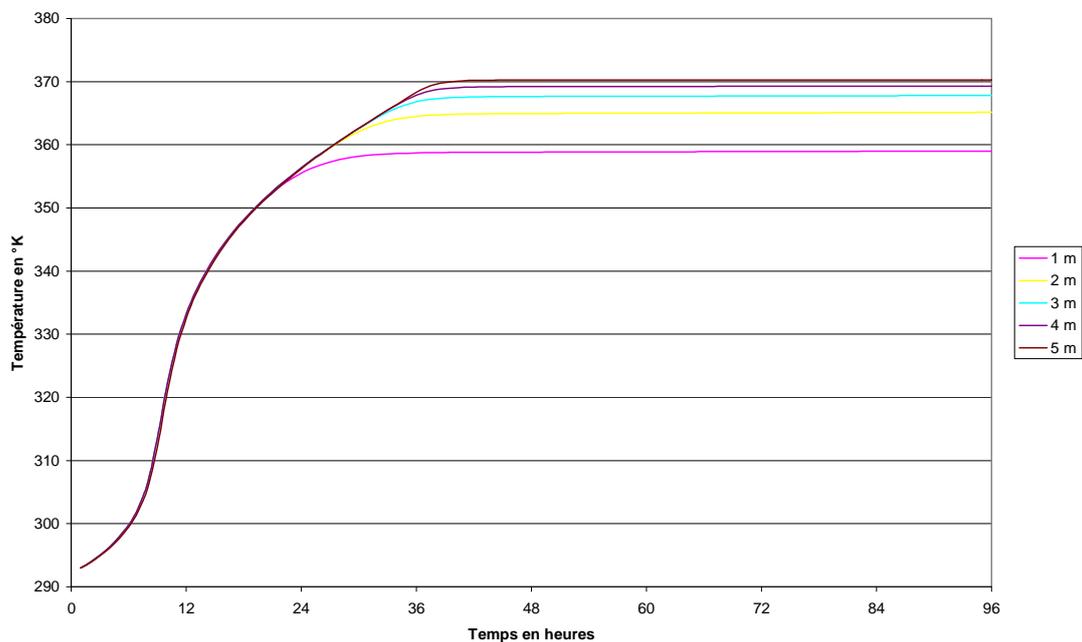


Figure 74 : Évolution des températures calculées en fonction de la hauteur dans le lit de plaquettes sur 4 jours.

La Figure 75 représente le champ de températures dans le lit de plaquettes pour un temps $t = 96$ heures.

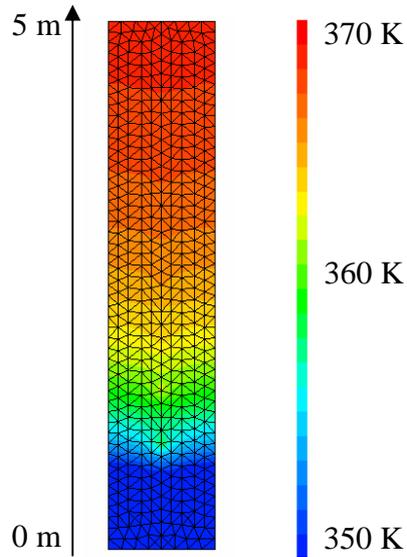


Figure 75 : Champ de températures dans le lit de plaquettes à $t = 4$ jours.

La température dans le lit de plaquettes est plus élevée sur la partie haute, le modèle ne tenant pas compte des déperditions thermiques. La Figure 76 représente l'évolution des humidités absolues dans le lit de plaquettes forestières en fonction de la hauteur sur une période de 4 jours.

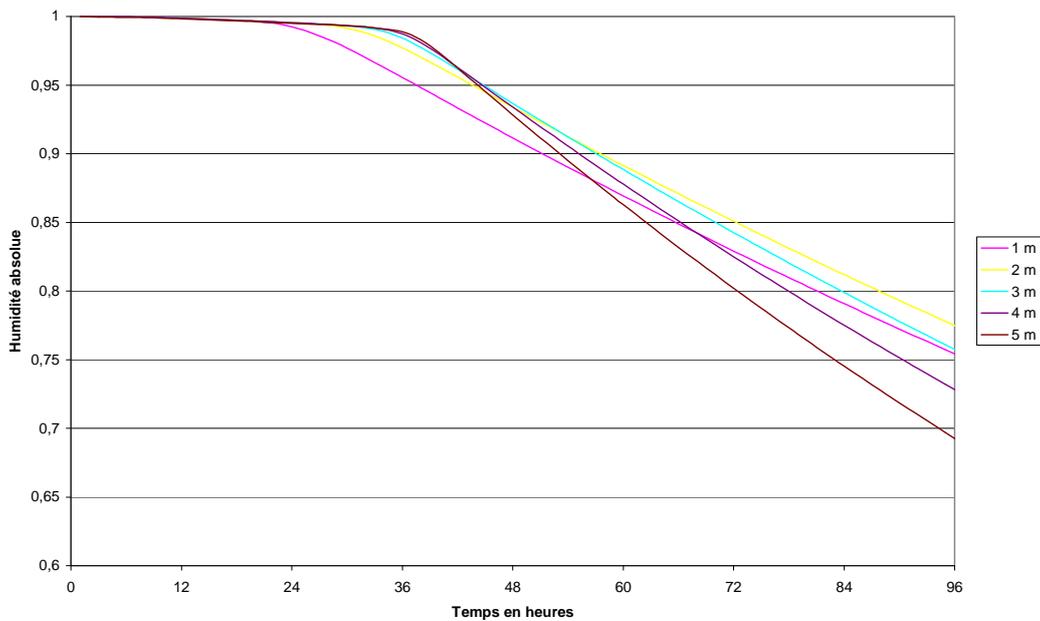


Figure 76 : Évolution des humidités absolues calculées en fonction de la hauteur dans le lit de plaquettes sur quatre jours.

Dans le modèle, en début de séchage, l'humidité diminue d'abord par la partie basse du tas puis par la partie haute. L'évacuation de l'eau contenue dans les plaquettes forestières devient maximale lorsque la température dans le tas est également à son maximum. D'après le modèle, l'humidité absolue du bois diminue rapidement, cela est néanmoins très fortement lié à l'équation utilisée pour traduire la production de chaleur dans le tas.

La Figure 77 représente l'évolution des humidités absolues dans le lit de plaquettes forestières en fonction de la hauteur sur une période de 8 semaines. Sur la Figure 77, chaque graduation correspond à une semaine.

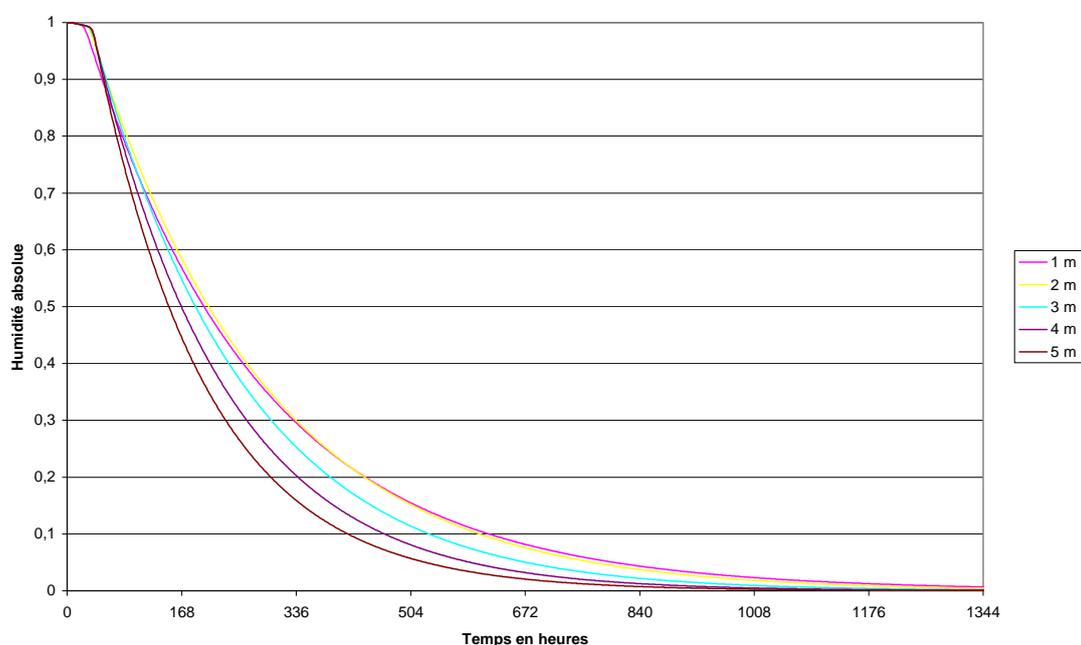


Figure 77 : Évolution des humidités absolues calculées en fonction de la hauteur dans le lit de plaquettes sur 8 semaines.

Le résultat du modèle indique qu'à la suite du séchage, l'humidité diminue plus rapidement en haut du lit de plaquettes, le bas du tas diminue également rapidement. Il semble que la partie la plus humide du tas se situe légèrement en dessous de sa partie médiane, à environ 1,5-2 m de haut. La Figure 78 présente les champs d'humidités absolues à deux temps différents, l'un à quatre jours (début de séchage) et l'autre à 3 semaines (milieu de séchage).

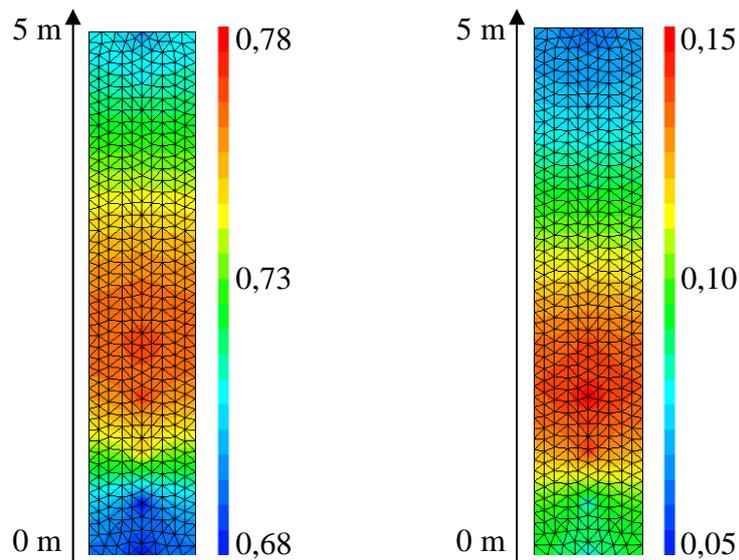


Figure 78 : Champs d'humidités absolues dans le lit de plaquettes à $t = 4$ et $t = 21$ jours.

En comparant les données de début et de milieu de simulation de séchage, on s'aperçoit que la zone la plus humide descend dans le lit de plaquettes. Tout comme constaté lors des essais, l'humidité a tendance à s'échapper d'abord par le bas, puis par le haut, le centre du tas restant toujours un peu plus humide. Dans le modèle, la partie plus humide se trouve plutôt dans la partie basse du tas. Toutefois, une entrée d'air extérieur mû par l'air sortant du tas, devrait positionner la zone humide plus haut dans celui-ci, comme lors des essais.

La Figure 79 représente l'évolution du coefficient q en fonction du temps : ce paramètre représente la quantité de chaleur produite dans le lit de plaquettes en fonction de la zone considérée.

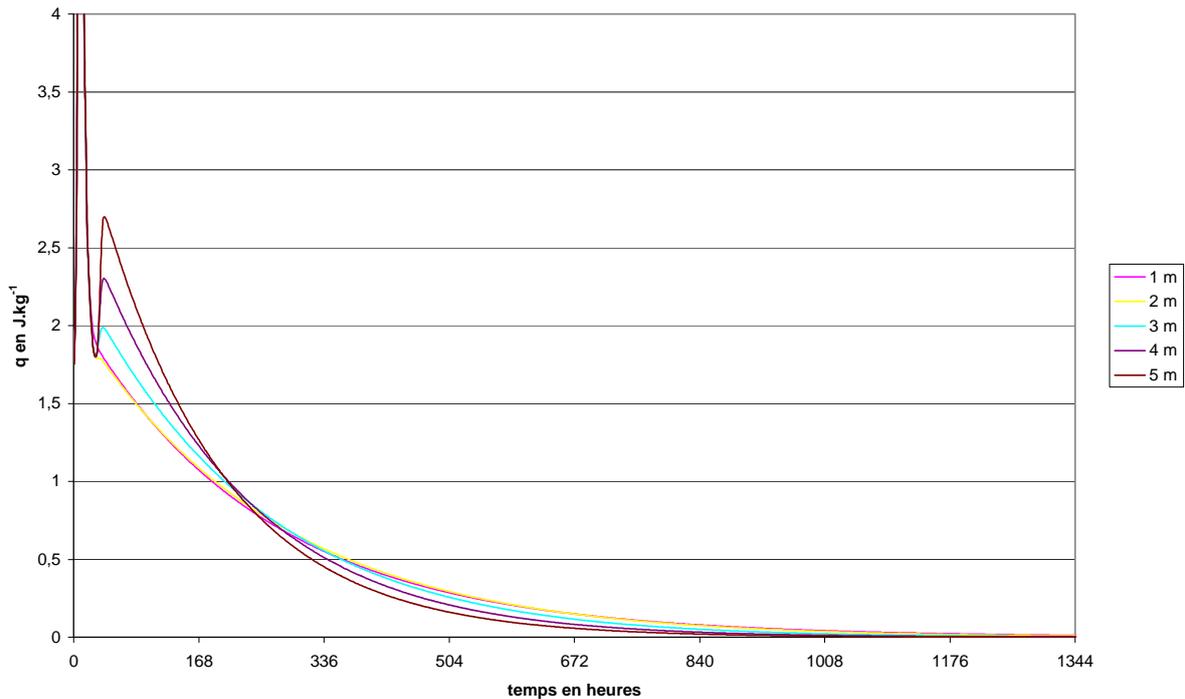


Figure 79 : Évolution de la valeur de q calculée en fonction de la zone du lit au cours du temps.

Au début de la période de séchage, l'activité microbologique augmente rapidement : l'augmentation de température a pour effet d'augmenter très fortement la quantité de chaleur produite. Globalement, la production de chaleur est la même dans l'ensemble du tas dans les premières heures de l'essai et atteint 15 J.kg^{-1} , la valeur de q diminue fortement puis augmente de nouveau légèrement avant de diminuer lentement à partir du moment où la température devient stable sur la Figure 74. Au début de la résolution du modèle l'énergie produite est maximale sur le haut du lit où la température est la plus importante ; à la fin, l'énergie produite est maximale au niveau de la partie la plus humide du tas. Cette réponse du modèle est due à la forme de l'équation traduisant la quantité de chaleur produite.

La vitesse de l'air au sein du lit de plaquettes est très instable au début de la résolution du modèle puis devient beaucoup moins élevée (Figure 80) par la suite. L'ajout d'une entrée d'air latérale dans le modèle pourrait modifier ces valeurs et entraîner la disparition de vitesses d'air négatives.

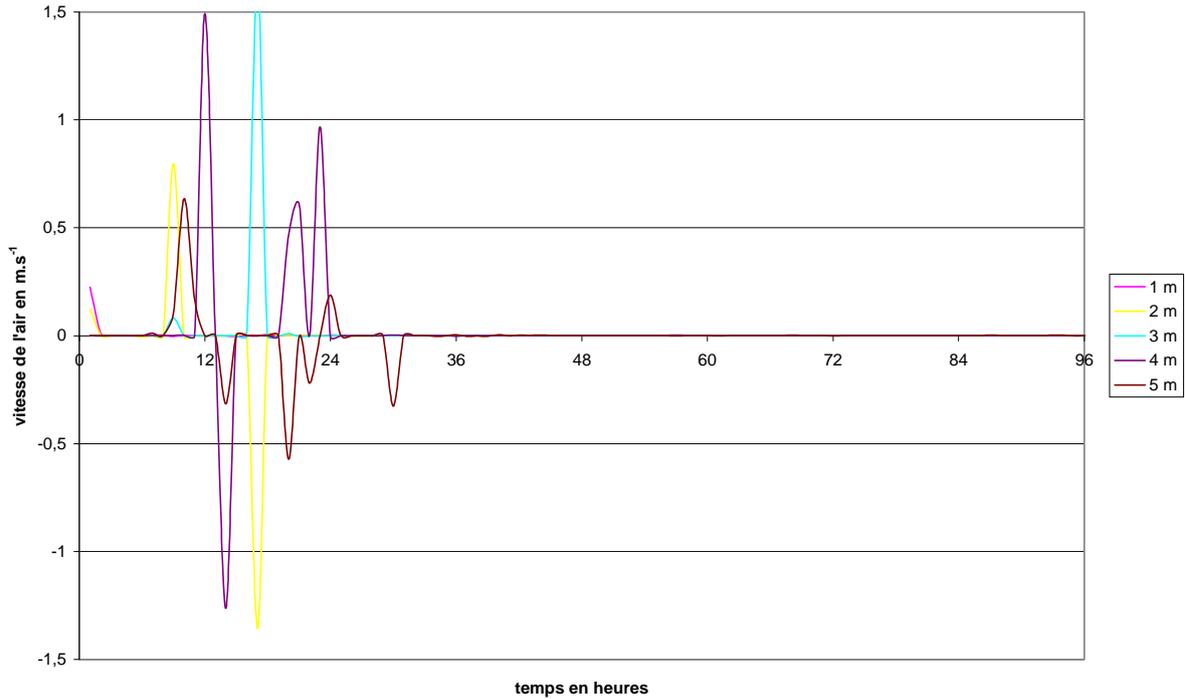


Figure 80 : Vitesse de l'air calculée en fonction de la zone du lit de plaquettes sur 96 heures.

Le Tableau 21 résume les valeurs moyennes des vitesses de l'air entre les temps $t = 100$ heures et $t = 500$ heures.

zone du lit	0,5 m	1 m	1,5 m	2 m	2,5 m
vitesse de l'air en $m.s^{-1}$	3,05E-05	5,73E-05	8,36E-05	1,06E-04	1,45E-04
zone du lit	3 m	3,5 m	4 m	4,5 m	5 m
vitesse de l'air en $m.s^{-1}$	1,76E-04	1,75E-04	2,30E-04	2,44E-04	2,04E-04

Tableau 21 : Moyennes des vitesses de l'air entre $t = 100$ heures et $t = 500$ heures

La vitesse moyenne de l'air est la plus faible dans la partie inférieure du lit. Cela est tout à fait cohérent avec les résultats d'humidités calculées : la vitesse d'air étant moins importante, l'humidité sort plus difficilement.

3.3 Discussion

Les tendances observées lors de la modélisation sont en accord avec les essais réalisés du point de vue de l'évolution de l'humidité : le tas de plaquettes forestières commence par sécher en bas puis en haut, la dernière partie à sécher étant située près du centre du tas. Concernant la température, la valeur de α a été ajustée pour que la température maximale dans le tas soit en accord avec les résultats des essais. L'ajout de coefficients de pertes dans le modèle rendrait obligatoire l'augmentation de ce paramètre pour revenir à des valeurs plus réalistes.

Afin d'améliorer le modèle, il faudrait que celui-ci soit développé avec deux dimensions d'espace en intégrant les échanges thermiques et les apports d'air avec le milieu extérieur. Néanmoins, un problème récurrent persistera : le flux thermique généré par les actions microbiologiques ne peut être traduit par l'équation de la bibliographie sur laquelle nous nous sommes basés. En effet, l'équation en question qui est sensée traduire l'évolution de la perte de masse sèche au cours du temps en fonction de la température et de l'humidité de l'air ne prend pas en compte l'humidité du bois, terme que nous avons ajouté dans l'équation du modèle. L'équation ne prend pas en compte la possibilité que les actions microbiologiques puissent se dérouler parfois en aérobie et parfois en anaérobie. Dans la réalité, le séchage se termine avant que le bois soit anhydre car les micro-organismes arrêtent de produire de l'énergie lorsqu'ils ne trouvent plus de quoi se nourrir et subsister. Enfin, des études réalisées sur la croissance de champignons sur du bois à température et humidité relative de l'air constantes montrent que la croissance de ces champignons n'est pas constante et que cette évolution n'est jamais la même lors des essais. Afin de réussir à traduire l'évolution du flux de chaleur généré par les micro-organismes, il faudrait donc préalablement répondre à l'ensemble de ces questions.

Dans cette perspective, il semble qu'une modélisation purement mathématique du séchage naturel des plaquettes forestières soit une tâche très difficile. Aussi, les résultats obtenus lors du plan d'expériences réalisé nous paraissent pertinents même si de nouveaux essais seraient utiles pour affiner les résultats et déduire précisément les influences de chaque paramètre.

4 Conclusion

Les différents essais menés sur les plaquettes forestières ont permis de rassembler des données et d'établir des modèles scientifiques et techniques. Les modèles développés ici permettent de modéliser le séchage des plaquettes forestières en lit fixe mobile qui est une solution de séchage pouvant être utilisée en amont d'un procédé de valorisation de la biomasse. Les deux modèles de dimensionnement développés ont pu être validés par des essais de séchage de plaquettes en lit fixe non mobile.

Le dernier modèle développé permet de comparer les essais de séchage naturel en tas avec les résultats de la modélisation. Une cohérence entre la théorie et la réalité a pu être mise en évidence, même s'il est très difficile de quantifier la quantité d'énergie dégagée par les actions microbiologiques dans le tas. En effet, pour des champignons du bois par exemple, même à température et humidité fixées et pour une même essence, le développement de ces champignons au cours du temps n'est pas constant et diffère pour chaque expérience. Dans un tas de plaquettes forestières, il y a en plus des champignons, des bactéries et des cellules de bois vivantes qui engendrent un échauffement. Il apparaît ainsi difficile d'évaluer le terme de production de chaleur dans la modélisation du séchage naturel en tas.

Chapitre V : Bilan technico-économique du séchage des plaquettes forestières

Outre l'aspect purement scientifique, la mise en place et le choix d'une technologie de séchage doit répondre à des critères à la fois techniques et économiques. Pour ce faire, nous avons travaillé sur divers scénarii en choisissant d'examiner la mise en œuvre d'une entreprise de séchage de plaquettes forestières.

Un premier bilan a montré que six solutions techniques différentes sont viables, le panachage entre les diverses techniques étant aussi une voie intéressante. Ainsi, les différentes technologies comparées sont les suivantes :

- Séchage naturel en tas (sans bâche)
- Séchage naturel en tas sous bâche respirante
- Séchage naturel en tas sous abri
- Séchage en lit fixe mobile
- Séchage en séchoir tunnel
- Séchage en séchoir rotatif
- Combinaison de différentes solutions (séchage naturel puis séchage artificiel)

Selon le type de projet, le nombre de salariés, les capacités des séchoirs ou la taille de l'installation à mettre en œuvre peuvent être différents.

1 Hypothèses

Les hypothèses à prendre en compte sont liées aux coûts totaux employeur des salariés, aux coûts des matériels et des séchoirs, aux caractéristiques des tas de plaquettes forestières, aux coûts immobiliers et aux divers agencements.

1.1 Taille du projet et coût salariaux

Pour la simulation, deux types d'entreprises sont considérés. Le premier cas concerne une petite entreprise qui emploie trois salariés (un comptable, 1 manutentionnaire/secrétaire, 1 manutentionnaire) et paye une société de gardiennage pour les nuits. Cette petite entreprise peut posséder un séchoir artificiel selon le cas étudié. Ce choix permet d'étudier les différents procédés de séchage dans le cas de débits faibles (de 3 à 5 t/h de plaquettes forestières selon le choix du procédé). Un tel débit correspond à une quantité d'environ 30000 à 40000 tonnes de plaquettes forestières valorisées par an. A titre d'exemple, cette quantité correspond à la production annuelle de Forêts et Bois de l'Est : environ 35000 tonnes de plaquettes forestières en 2009.

La seconde solution concerne le cas d'une entreprise qui veut développer une activité importante de séchage de plaquettes forestières. Cette société emploierait 7 salariés dont un responsable et serait équipée de deux séchoirs artificiels en parallèle selon les cas étudiés. Deux personnes travailleraient de manière simultanée et les activités de séchage fonctionneraient 24h/24. Dans ce cas, le volume traité est beaucoup plus important : de l'ordre de 20 à 30 t/h selon le choix du procédé soit 220 000 tonnes par an.

Les deux d'entreprises modélisées n'auront pas le même type de client. L'entreprise de plus petite taille devra pouvoir fournir les particuliers et les collectivités. Dans ces conditions, elle pourra vendre le bois plus cher au MWh que la grosse entreprise qui vendra son bois à des clients consommant beaucoup plus de bois. En revanche, la qualité des plaquettes (granulométrie, humidité) devra être meilleure.

Dans ces simulations, nous considérons que les séchoirs sont entièrement automatisés et peuvent être autonomes sur une période de 2 jours.

Le coût total annuel d'un salarié (salaire et charges) en fonction du poste est indiqué dans le Tableau 22 :

main d'œuvre	coût annuel en €
salarié	30 000,0
responsable	45 000,0
gardien de nuit ou astreinte	35 000,0

Tableau 22 : Coût annuel d'un salarié en fonction du poste.

Les capacités de production sont calculées sur la base des capacités du ou des systèmes de manutention et du nombre de chargements-déchargements nécessaire lors du procédé

étudié. On considèrera dans les calculs qu'un manutentionnaire travaille 1450 heures par an et peut déplacer 350 tonnes de plaquettes forestières en 6 heures.

La capacité des séchoirs nécessaires est déterminée à partir des capacités de production calculées précédemment.

1.2 Coût du matériel et des séchoirs

Dans le cas du projet de petite dimension, l'entreprise utilise un seul appareil de manutention et un seul séchoir alors que dans le cas du projet de plus grande dimension, deux appareils de manutention et deux séchoirs sont utilisés. Les coûts d'investissements et les temps d'amortissement sont indiqués dans le Tableau 23.

Type de matériel	coût d'investissement en €	durée d'amortissement en années
Chariot élévateur à bras télescopique	75 000,0	5,0
Séchoir rotatif	voir feuille « calcul » en fonction du débit	10,0
Séchoir tunnel	voir feuille « calcul » en fonction du débit	10,0
Séchoir en lit fixe	voir feuille « calcul » en fonction du débit	10,0

Tableau 23 : Coûts et durée d'amortissement des différents matériels.

Le Tableau 24 et la Figure 81 donnent les coûts d'investissement des séchoirs ainsi que leur emprise au sol. Dans le cas du séchage en lit fixe, le séchage au-delà d'un débit d'évaporation de 3 t.h^{-1} est considéré comme impossible, on considère en effet que la chaleur utilisée dans ce cas doit provenir d'une autre unité, le débit d'évaporation ne peut donc pas être trop important.

Capacité d'évaporation	Coût en euros			surfaces au sol en m ²		
	Séchoir rotatif	Séchoir tunnel	Séchoir à lit fixe mobile	Séchoir rotatif	Séchoir tunnel	Séchoir à lit fixe mobile
1	415 903	386 283	70 000	7,5	53,2	50,0
2	630 828	444 000	140 000	15,0	92,0	100,0
3	804 900	481 681	210 000	22,5	130,7	150,0
4	956 820	510 340		30,0	169,4	
5	1 094 140	533 739		37,5	208,1	
10	1 659 557	1 067 477		75,0	416,2	
20	2 517 161	2 134 955		150,0	832,3	
30	3 211 751	3 202 432		225,0	1248,5	

Tableau 24 : Coût des séchoirs et emprise au sol en fonction de la capacité d'évaporation.

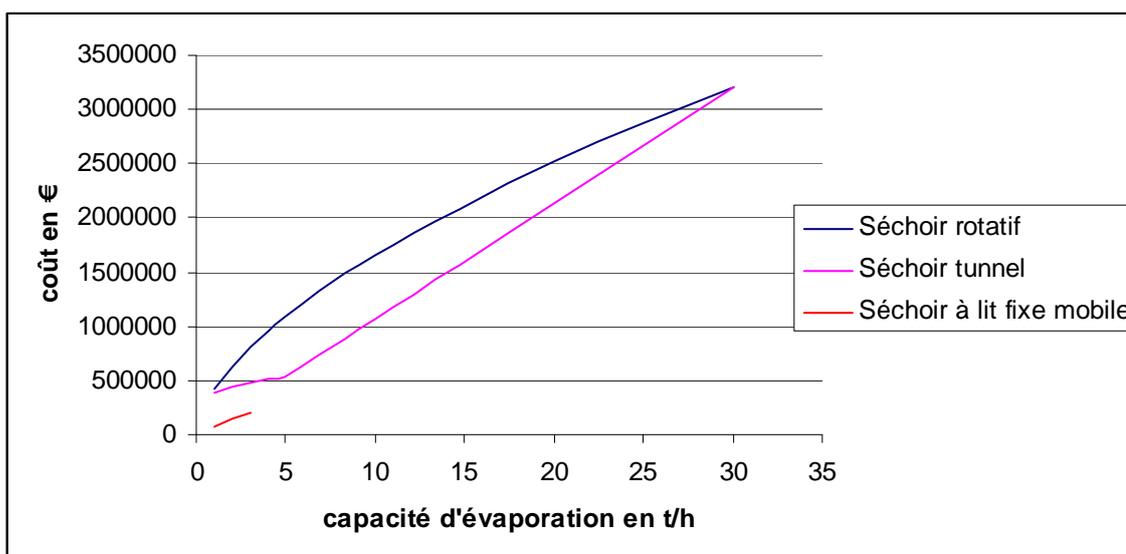


Figure 81 : Coût des séchoirs en fonction de la capacité d'évaporation.

Lors des calculs, la consommation énergétique totale des séchoirs rotatifs est considérée à $2,1 \text{ kWh.kg}^{-1}$ [58], celle d'un séchoir tunnel est considérée à $1,5 \text{ kWh.kg}^{-1}$ [49] et celle d'un séchoir à lit fixe mobile est considérée à $0,2 \text{ kWh.kg}^{-1}$ (considérant que la chaleur provient d'une autre unité). Les séchoirs artificiels ont un silo d'alimentation leur permettant deux jours d'autonomie et le solide sec est stocké sous couvert après séchage.

1.3 Caractéristiques physiques des plaquettes forestières

Afin de calculer la surface nécessaire pour le séchage naturel, les caractéristiques des tas de plaquettes forestières ainsi que leur masse volumique apparente sont nécessaires. Celles-ci sont fournies dans le Tableau 25 et proviennent de nos mesures sur différents tas.

calcul coefficient de foisonnement en t/m^2	
l (en m)	10,0
h (en m)	8,0
alpha (en °)	40,0
masse volumique apparente en kg/m^3	350,0
1,6	

Tableau 25 : Caractéristiques des tas de plaquettes forestières et du bois.

La Figure 82 présente les différents paramètres de forme d'un tas de plaquettes forestières énumérés ci-dessus.

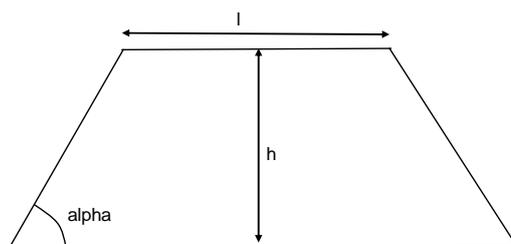


Figure 82 : Paramètres de forme d'un tas de plaquettes forestières.

Pour les calculs, l'humidité finale sur brut après séchage sera prise à 25% dans le cas du séchage naturel sous abri, 30% dans le cas du séchage naturel sous bâche respirante et 35% dans le cas du séchage naturel à l'air libre.

Le temps de séchage pour obtenir l'humidité minimale possible en séchage naturel est en moyenne de 2,5 mois. Les différences liées aux trois techniques sont faibles, voire inexistantes sur le temps de séchage. Le temps de séchage pour obtenir des humidités supérieures à l'optimal sont calculées au prorata.

Le temps nécessaire au bâchage du tas est considéré comme étant égal à 10 % du temps de constitution du tas. Cette donnée provient de mesures sur site et a été discutée avec des coopératives forestières ou des producteurs de plaquettes.

La perte de masse sèche est évaluée à 1,5 % par mois.

Les marges, les coûts d'immobilisation (6,5% du prix du stock humide) et de pertes de masse sèche sont calculées sur la base du pouvoir calorifique du bois et des prix d'achat et de vente des plaquettes forestières.

1.4 Coûts liés à l'immobilier

Les coûts liés à l'immobilier concernent le coût du terrain, des bureaux et locaux, le coût des dallages, de l'éclairage et de clôture. Le terrain est supposé entièrement clôturé et éclairé sur son pourtour. Un bâtiment de 200 m² sert de local technique, de sanitaires, de salle de réunion et de bureaux administratifs. Le Tableau 26 récapitule les coûts et les durées d'amortissement.

Dans l'immobilier est indiqué le coût et la durée d'amortissement de la bâche respirante utilisée pour le séchage à l'air libre sous bâche.

Type	coût en € par m2	durée d'amortissement en années
pierrement+dalle	73,0	15
hangar	300,0	15
bâche toptex	2,3	5

	coût en € par m ² /m/unité	durée d'amortissement en années
terrain	30	20
batiments	1100	20
grillage	120	20
lampadaires	1000	20

Tableau 26 : Coût et temps d'amortissement des immobiliers.

A partir des capacités de production, de la vitesse de séchage et en fonction des caractéristiques des tas de plaquettes forestières, les surfaces de stockage nécessaires sont calculées. Ces surfaces permettent d'estimer la surface totale nécessaire à l'activité de séchage. Les activités de séchage, en fonction des cas sont organisées de la manière suivante :

- 2 ou 4 tas en parallèle en fonction de la taille du projet (3 ou 7 salariés) si le procédé comporte une partie séchage naturel
- 1 ou 2 séchoirs selon la taille du projet lorsque celui-ci comporte une partie de séchage naturel

Pour calculer la surface totale nécessaire, on considère que l'espacement entre les tas de plaquettes forestières est de 10 mètres et que l'espace autour des tas est de 15 mètres. Dans le cas où le procédé intègre une phase de séchage artificiel, on considère que le solide sec doit être stocké sous abri après séchage. La Figure 83 montre les proportions des différentes parties du projet sur le terrain pour l'exemple faisant intervenir séchage naturel et séchage artificiel.

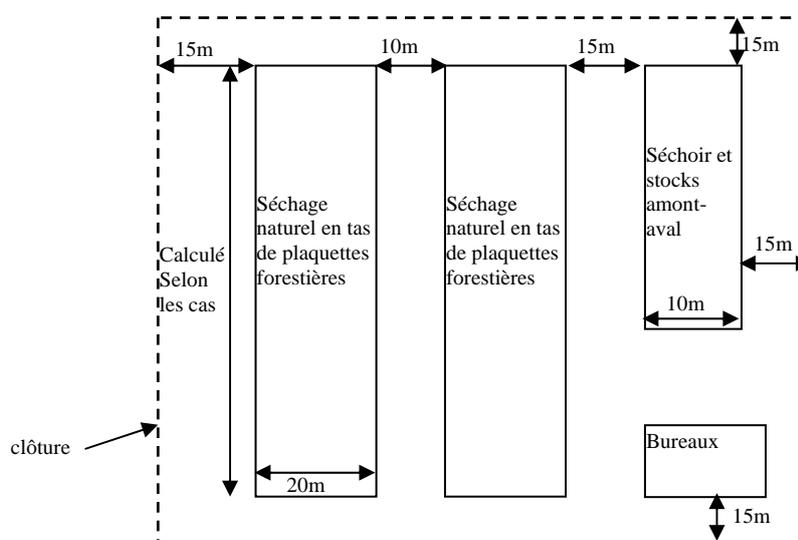


Figure 83 : Proportions des différentes zones d'un pôle de stockage.

2 Méthode de calcul

Le calcul de rentabilité d'un pôle de séchage de plaquettes forestières doit prendre en compte tous les aspects énumérés précédemment qui sont liés aux problématiques de coûts de matériel, d'immobilier, énergétiques, humains et d'immobilisation. La feuille de calcul développée prend en compte tous ces aspects selon les modes de calculs présentés précédemment.

2.1 Calcul du débit théorique de plaquettes forestières humides

La première étape du calcul consiste à déterminer le débit de plaquettes forestières humides à sécher en fonction des paramètres opératoires. Connaissant le temps de travail annuel d'un salarié (1450 heures par an), le nombre de salariés, le nombre d'équipes de travail, la quantité de plaquettes forestières que peut manœuvrer un opérateur (350 tonnes de plaquettes forestières en 6 heures) et le nombre d'opérations de chargement/déchargement nécessaires pour le type de procédé de production choisi (Tableau 27), le débit de plaquettes forestières humides annuel est calculé.

Type de séchage	nombre de chargement/déchargement	bâche (10%)	
naturel à l'air libre	2	0	1 chargement & 1 déchargement
naturel sous bâche respirante	2	1	1 chargement, 1 déchargement + 10% pour le bache
naturel sous abri	2	0	1 chargement & 1 déchargement
artificiel	2	0	1 chargement & 1 déchargement
naturel à l'air libre + artificiel	3	0	1 chargement, 1 transfert & 1 déchargement
naturel sous bâche + artificiel	3	1	1 chargement, 1 transfert & 1 déchargement + 10% de bache
naturel à sous abri + artificiel	3	0	1 chargement, 1 transfert & 1 déchargement

Tableau 27 : Nombre d'opérations de manutention en fonction du type de procédé de séchage.

Connaissant le débit de plaquettes forestières, le calcul se scinde en deux parties : une partie dédiée aux calculs relatifs au séchage naturel et une partie dédiée aux calculs relatifs au séchage artificiel.

2.2 Séchage naturel

Connaissant le débit humide de plaquettes forestières et l'humidité finale souhaitée, le temps de stockage des plaquettes forestières, variant de 0 à 2,5 mois en fonction de l'humidité ciblée, peut être calculé. À partir de ce temps et du débit de plaquettes, le stock de plaquettes forestières présent sur le site de séchage est donné. Le calcul du coefficient de foisonnement en fonction des caractéristiques des tas de plaquettes forestières permet ensuite de déterminer la surface au sol nécessaire pour accueillir les plaquettes.

Pour le séchage des plaquettes forestières sous bâche, le coût de renouvellement de celle-ci doit aussi être pris en compte en fonction de la surface de bâche nécessaire et de son temps d'amortissement.

Le coût énergétique du séchage naturel des plaquettes forestières est calculé comme étant la conséquence des pertes de masse sèche. À partir de la perte de masse sèche qui est une fraction du stock de bois, du pouvoir calorifique du bois anhydre et du prix d'achat du bois au MWh, le coût de séchage est évalué (en €).

Enfin, un coût d'immobilisation des plaquettes est calculé. Ce coût d'immobilisation sur une année est estimé comme étant égal à 6,5 % du coût du stock de plaquettes forestières. Le coût du stock de plaquettes forestières est alors calculé à partir du stock de bois sur le site de stockage, du pouvoir calorifique du bois à son humidité initiale et du prix d'achat du bois au MWh.

2.3 Séchage artificiel

Connaissant le débit humide de plaquettes forestières et l'humidité cible, le débit de plaquettes sèches est calculé. Un stock en amont et en aval du séchoir étant nécessaire, celui-ci est donné en fonction des débits calculés précédemment et de l'autonomie (en jours) souhaité en amont et en aval du séchoir. Ces stocks de plaquettes exprimés en tonnes permettent de calculer la surface de stockage nécessaire en utilisant le coefficient de foisonnement des plaquettes en tas.

À partir du débit humide et du débit sec de plaquettes forestières, le débit théorique d'évaporation du séchoir est calculé : cette valeur permet de choisir la taille du séchoir

nécessaire ainsi que son coût d'investissement. Le coût mensuel du séchoir est calculé en fonction de l'investissement et du temps d'amortissement du matériel.

Le coût du séchage artificiel des plaquettes forestières (en €) est calculé à partir du débit d'évaporation du séchoir, du coût énergétique d'évaporation de l'eau (exprimé en kWh.kg⁻¹ d'eau évaporée) et du coût de l'énergie apportée exprimé en €kWh⁻¹.

Le coût d'immobilisation est calculé selon la même règle que pour le séchage naturel. Il faudra néanmoins ajouter au besoin un stock de bois supplémentaire dans le cas d'une activité de séchage basée uniquement sur du séchage artificiel.

2.4 Coûts liés à l'immobilier

Les calculs menés pour l'évaluation des surfaces nécessaires pour entreposer les plaquettes forestières sont réutilisés ici pour évaluer la surface totale nécessaire à la mise en place de l'entreprise. La taille totale du terrain, la longueur de clôture ainsi que le nombre de lampadaires sont calculés pour répondre aux besoins des différentes zones énoncées Figure 83. Le coût mensuel de ces infrastructures est évalué (en €) en connaissant le coût d'investissement ainsi que les durées d'immobilisation des différentes composantes citées précédemment.

2.5 Calcul de rentabilité

Pour estimer la rentabilité du pôle de stockage, il est nécessaire de calculer la marge effectuée pour chaque tonne de plaquettes forestières sèches vendues.

La première étape consiste à calculer la valeur qui est ajoutée aux plaquettes par l'opération de séchage. Cette valeur ajoutée est calculée en utilisant les prix d'achat et de vente des plaquettes, le débit de plaquettes humides et le débit de plaquettes sèches (en ayant retiré les pertes de masse sèche).

Une fois cette valeur ajoutée calculée, on calcule la marge en déduisant les coûts d'immobilier et de matériel, les coûts humains et les coûts énergétiques. Il est alors possible de déterminer la marge effectuée par tonne de plaquettes forestières sèches vendues.

Prenons l'exemple de plaquettes forestières que l'on souhaite sécher de 50 % à 30 % d'humidité sur brut en utilisant le procédé de séchage à l'air libre suivi du séchage en lit fixe pour le projet de petite entreprise.

La première étape consiste à calculer le débit de plaquettes forestières humide. Sachant qu'un ouvrier travaille 1450 heures par an, qu'il peut déplacer 350 tonnes de plaquettes en 6 heures, le nombre d'engins (1), le nombre d'équipes (1) et le fait que le procédé nécessite 3 opérations de chargement/déchargement, on obtient un débit de plaquettes humides de

$$3,22 \text{ t.h}^{-1} \text{ soit } \frac{350}{6} \cdot 1450 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{1}{365 \cdot 24} \cdot \frac{1}{3}.$$

Le séchage à l'air libre permet de sécher les plaquettes forestières de 50 % à 35 % d'humidité sur brut en 2,5 mois. Connaissant le débit de plaquettes séchées (à 30 %), on calcule le débit de plaquettes humides (à 50 %), ceci donne une valeur de 4,5 t.h⁻¹. A partir de ces valeurs, le stock de plaquettes forestières peut être calculé : il vaut 8100 tonnes soit 4,5.30.24.2,5. Connaissant le coefficient de foisonnement (1,6 dans notre cas), la surface nécessaire au stockage est calculée : elle est de 5056 m² soit 8100/1,6. Afin de calculer le coût énergétique du séchage naturel des plaquettes, on calcule tout d'abord la perte de masse sèche du bois en tonne. La perte de masse sèche étant estimée à 1,5 % par mois de stockage, la perte de bois vaut 48,7 tonnes par mois soit $\frac{1,5}{100} \cdot 8100 \cdot \frac{1}{2,5}$.

Le pouvoir calorifique anhydre du bois étant de 5,3 MWh.t⁻¹ et le prix d'achat du bois de 18,5 €/MWh⁻¹, le coût énergétique du séchage est de 4751 € par mois soit 48,7.5,3.18,5. Le coût d'immobilisation du stock de bois sur l'année est de 6,5 % de la valeur des plaquettes forestières. A l'achat des plaquettes, celles-ci sont à 50 % d'humidité sur brut, leur pouvoir calorifique inférieur est de 2,3 MWh.t⁻¹. On peut ainsi calculer le coût d'immobilisation qui est de 1863 € par mois soit $2,3 \cdot 8100 \cdot 18,5 \cdot \frac{6,5}{100} \cdot \frac{1}{12}$.

Le séchage en lit fixe permet de sécher les plaquettes de 35 % à 30 % d'humidité sur brut. Connaissant le débit de plaquettes séchées (3,22 t.h⁻¹), on calcule le débit de plaquettes à 35 % d'humidité (3,5 t.h⁻¹). Connaissant les besoins en amont et en aval du séchoir (2 jours), il est possible de calculer les surfaces nécessaires, on obtient 166 t en amont et 154 t en aval soit 24.3.22.2. Les surfaces nécessaires au stockage sont calculées comme précédemment : on obtient 104 m² en amont et 96 m² en aval, le stock en aval sera réalisé sous hangar. Connaissant le débit humide et le débit séché de plaquettes forestières, le débit d'évaporation

est calculé : ici, il vaut $0,28 \text{ t.h}^{-1}$ soit $3,5 - 3,22$. Il est alors possible d'exprimer le coût lié au séchoir d'après les données fournies précédemment, le coût est de 144 € par mois en considérant une durée d'amortissement de 10 ans. La consommation énergétique de ce séchoir étant de 0,2 kWh par kg d'eau évaporée et le coût de l'énergie étant connu ($0,017 \text{ €kWh}^{-1}$), le coût énergétique de fonctionnement du séchage peut être donné : il vaut 606 € par mois soit $0,28.30.24.1000.0,2.0,017$. Connaissant le stock de plaquettes, il est possible de calculer le coût de leur immobilisation qui vaut 74 € par mois selon la même règle de calcul que pour le séchage naturel.

Les surfaces précédentes calculées représentent l'encombrement des plaquettes forestières au sol, à cela il faut rajouter un espace suffisant pour que les outils de manutention et les camions de transport puissent circuler, ainsi que la surface nécessaire au séchoir et aux locaux. Le calcul de la surface totale nécessaire est réalisé grâce à une formule moyenne calculée à partir des différents cas. La surface totale nécessaire vaut dans ce cas 15600 m^2 dont 96 m^2 de hangar pour les plaquettes séchées à 30 % d'humidité sur brut. Connaissant les coûts des dalles, hangars et le temps d'amortissement, on calcule le coût mensuel qui vaut 8400 € par mois. A cela il est nécessaire d'ajouter le prix des locaux, des clôtures et de l'éclairage, on obtient un prix total de 8700 € par mois.

Le coût humain est calculé en fonction du nombre de personnes et de leur salaire, dans notre cas nous avons 3 personnes salariées et l'emploi d'une société de gardiennage. Chaque employé a un salaire annuel avec les charges de 30000 € par an et la société de gardiennage coûte 35000 € par an. Le coût humain mensuel est donc de 10400 € soit $(30000.3 + 35000)/12$.

La valeur ajoutée mensuelle est calculée à partir des débits de plaquettes forestières humides et séchées, des pouvoirs calorifiques des plaquettes (12550 à 30 % et 8250 à 50 %) et de leur prix d'achat et de vente. Si l'on vend les plaquettes à 20 € le MWh, la valeur ajoutée mensuelle vaut 24000 € soit $(3,22.12550.20 - 4,5.8250.18,5).24.30/3600$.

On peut alors calculer le bénéfice effectué chaque mois en retranchant toutes les charges à la valeur ajoutée. On obtient alors un bénéfice d'environ -6000 € par mois que l'on peut exprimer en € par tonne de plaquettes forestières séchées vendues qui vaut $-2,6 \text{ €t}^{-1}$ soit $\frac{-6000}{3,22.24.30}$.

Il faudrait donc dans ce cas vendre les plaquettes plus chères pour faire des bénéfices. Le prix de vente minimum est pour ce cas de 20,46 €/par tonnes de plaquettes séchées.

3 Résultats pour les simulations étudiées

Les deux scénarii de séchage étudiés ont pour objectif de représenter les cas les plus courants que l'on peut rencontrer : un cas où du séchage naturel seul peut suffire et un cas où il ne suffit plus.

3.1 Séchage de plaquettes forestières de 50% d'humidité sur brut à 30% sur brut

Dans ce cas, le séchage peut s'effectuer soit par séchage artificiel, soit par séchage naturel sous bâche ou sous abri, soit par séchage naturel sans bâche puis séchage artificiel. La valeur ajoutée est calculée en considérant un prix d'achat du bois de 18,5 €/MWh⁻¹ et un prix de revente de 20 €/MWh⁻¹, le coût de livraison n'étant pas pris en compte.

La Figure 84 présente l'influence des différents coûts liés au séchage des plaquettes forestières par rapport à la valeur ajoutée en fonction du type de procédé dans le cas du projet de petite dimension. Lorsque la somme des coûts est inférieure à la valeur ajoutée, le procédé est rentable, si cette somme est supérieure à la valeur ajoutée le procédé n'est pas rentable pour le prix de vente des plaquettes forestières considéré. Le séchage sous bâche respirante est plus compétitif que le séchage sous hangar. Dans les conditions choisies, le paramètre le plus important est le coût du hangar. Le séchage artificiel par séchoir rotatif ou tunnel n'est pas rentable à cause du prix de l'énergie. Dans le cas où l'on dispose d'une source de chaleur gratuite et suffisamment importante à proximité, le séchage en lit fixe mobile semble très intéressant mais dans ces calculs, les stocks à faire en été en prévision de l'hiver ne sont pas pris en compte. La combinaison du séchage naturel sans bâche avec le séchage artificiel n'est pas rentable non plus du fait du prix de l'énergie et de la manutention. D'après ces premiers résultats, on peut en déduire qu'il est préférable de sécher les plaquettes forestières sous bâche respirante même si l'utilisation d'un hangar permet d'éviter tout risque de reprise d'humidité par le sol ou à cause d'une bâche mal positionnée.

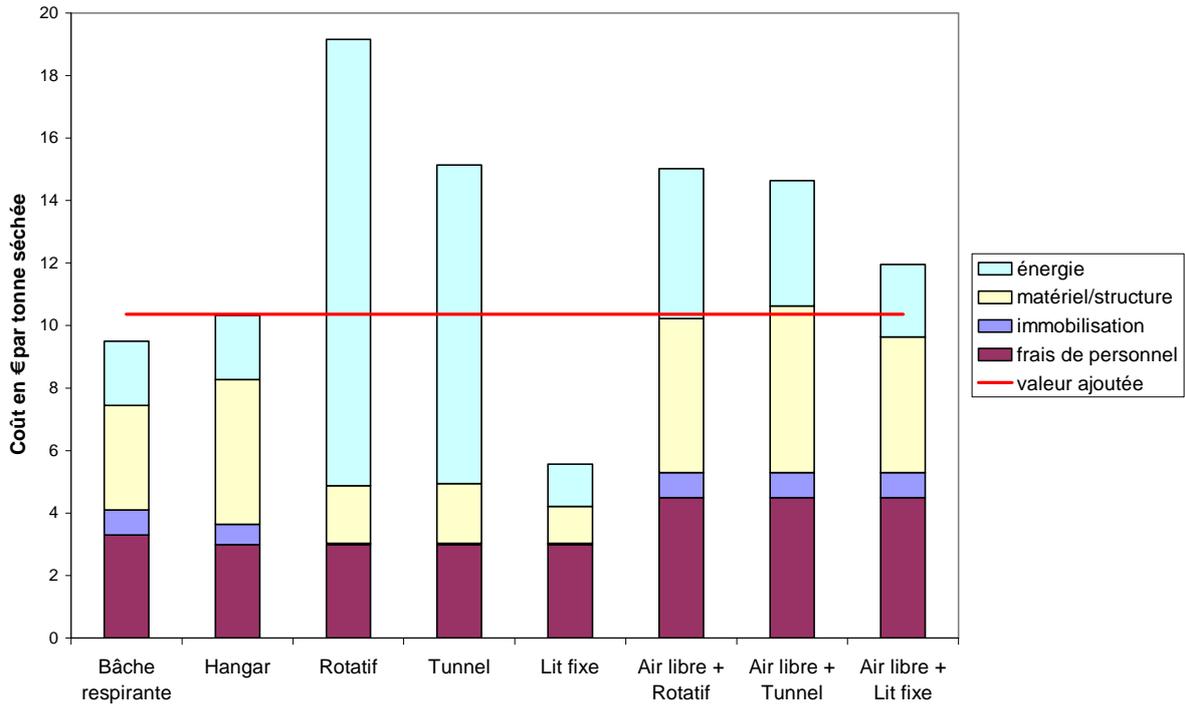


Figure 84 : Influence des différents coûts liés au séchage des plaquettes forestières par rapport à la valeur ajoutée pour un projet de petite dimension ($50 > 30\%$).

La Figure 85 représente le coût de la part de séchage naturel et/ou artificiel en fonction du type de procédé, par rapport à la valeur ajoutée. Le calcul a été fait en considérant que les frais de manutention et le matériel de manutention servent pour une moitié au séchage naturel et l'autre moitié au séchage artificiel lorsque le procédé fait intervenir les deux. La part de terrain servant au séchage artificiel et non au séchage naturel a également été prise en compte.

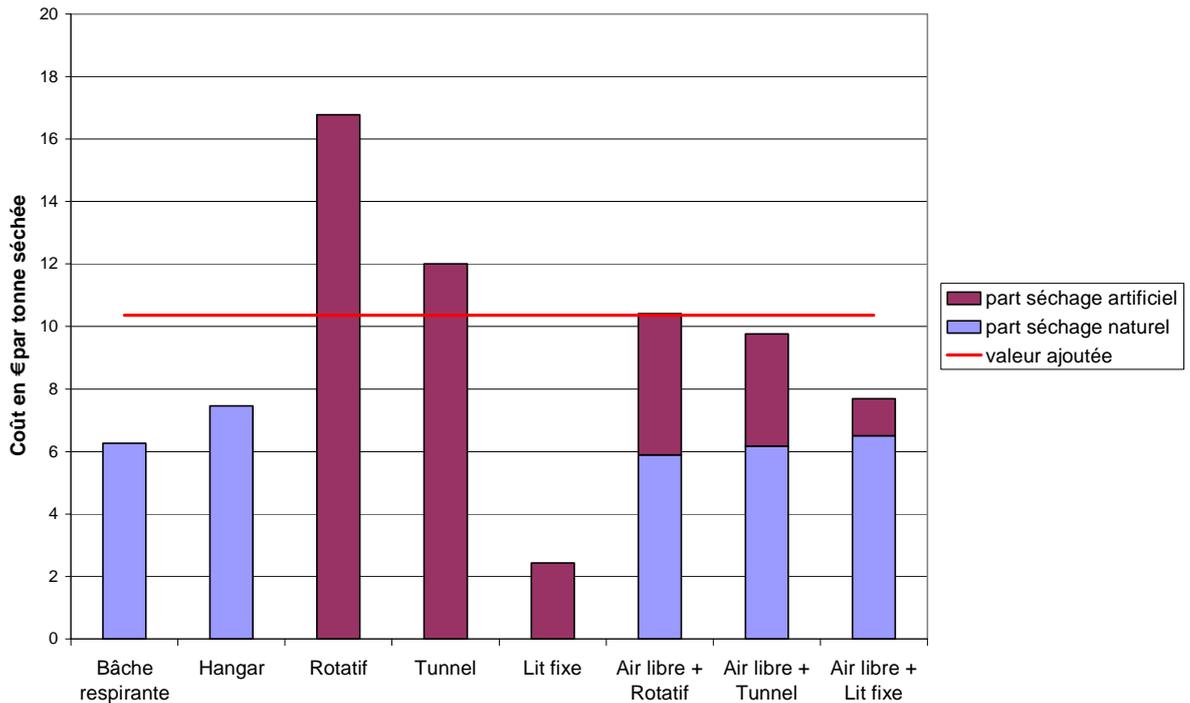


Figure 85 : Coût de la part de séchage naturel et/ou de séchage artificiel par rapport à la valeur ajoutée pour un projet de petite dimension ($50 > 30\%$).

Sécher d'abord les plaquettes forestières en utilisant le séchage naturel permet de diminuer les coûts de séchage artificiels par la suite. En effet, le débit d'évaporation nécessaire étant plus faible, la consommation énergétique est plus faible et le coût d'investissement du matériel est également moins important.

Dans le cas du projet de grande dimension (Figure 86), il n'est pas possible d'utiliser le séchage en lit fixe mobile à cause du débit de séchage trop important. La solution mixte alliant séchage naturel et séchage artificiel devient compétitive. Dans ce cas, le séchage sous bâche est également plus rentable. Dans cette simulation, les prix d'achat et de vente du bois ont été laissés aux mêmes valeurs que dans le cas précédent.

Globalement, il apparaît que dans le cas du projet de grande dimension et dans le projet de petite dimension, le séchage naturel coûte cher en matériel et en terrain alors que les procédés de séchage artificiel coûtent cher en termes d'énergie, mais permet de devenir rentables.

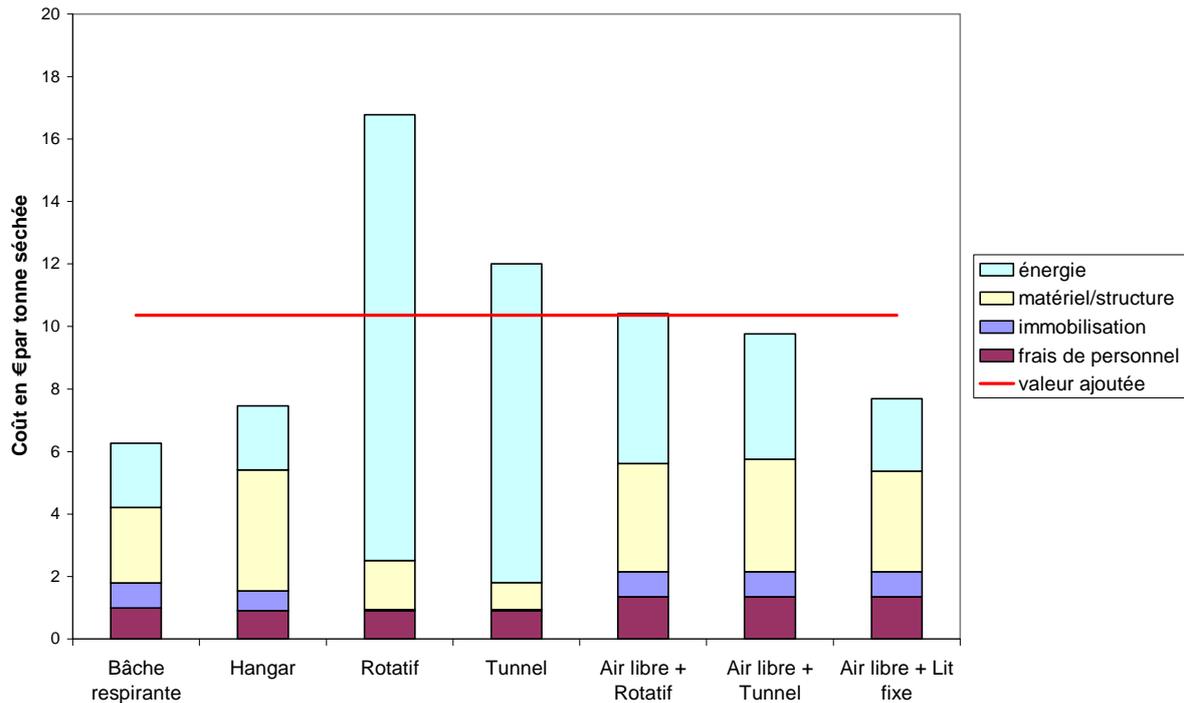


Figure 86 : Influence des différents coûts liés au séchage des plaquettes forestières par rapport à la valeur ajoutée pour un projet de petite dimension ($50 > 30\%$).

Pour le projet de grande dimension, toutes les opérations sont plus efficaces. Des procédés non rentables pour un projet de petite dimension peuvent ainsi l'être pour un projet de grande dimension.

3.2 Séchage de plaquettes forestières de 50 % à 10% d'humidité sur brut

Dans ces conditions, le séchage naturel seul ne suffit plus, il devient nécessaire d'utiliser le séchage artificiel. Le séchage en lit fixe seul n'est plus possible à cause du débit d'eau à évaporer trop important. La Figure 87 montre l'influence des différents coûts relatifs au séchage des plaquettes forestières par rapport à la valeur ajoutée pour un projet de petite dimension.

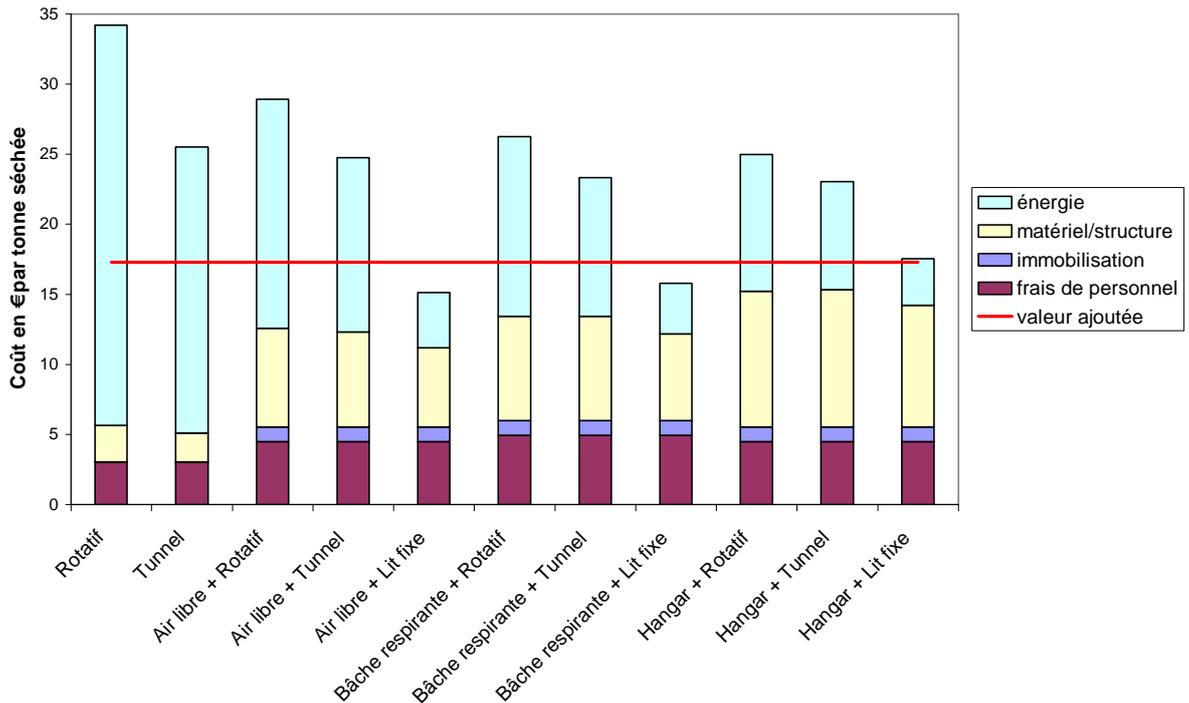


Figure 87 : Influence des différents coûts liés au séchage des plaquettes forestières par rapport à la valeur ajoutée pour un projet de petite dimension (50>10%).

Avec les séchoirs conventionnels où il faut produire de la chaleur pour alimenter le séchoir, la rentabilité est impossible avec les prix d'achat et de vente du bois considérés. Si l'on dispose d'une énergie thermique gratuite, une combinaison de séchage naturel avec un lit fixe mobile est rentable dans le cas du séchage naturel à l'air libre et sous bâche couplé au séchage en lit fixe. La solution la plus rentable est le séchage à l'air libre sans bâche puis le séchage en lit fixe mobile pour la simulation de petite entreprise.

La Figure 88 représente les coûts économiques respectifs du séchage naturel et du séchage artificiel en fonction du type de procédé, par rapport à la valeur ajoutée pour le projet de petite dimension.

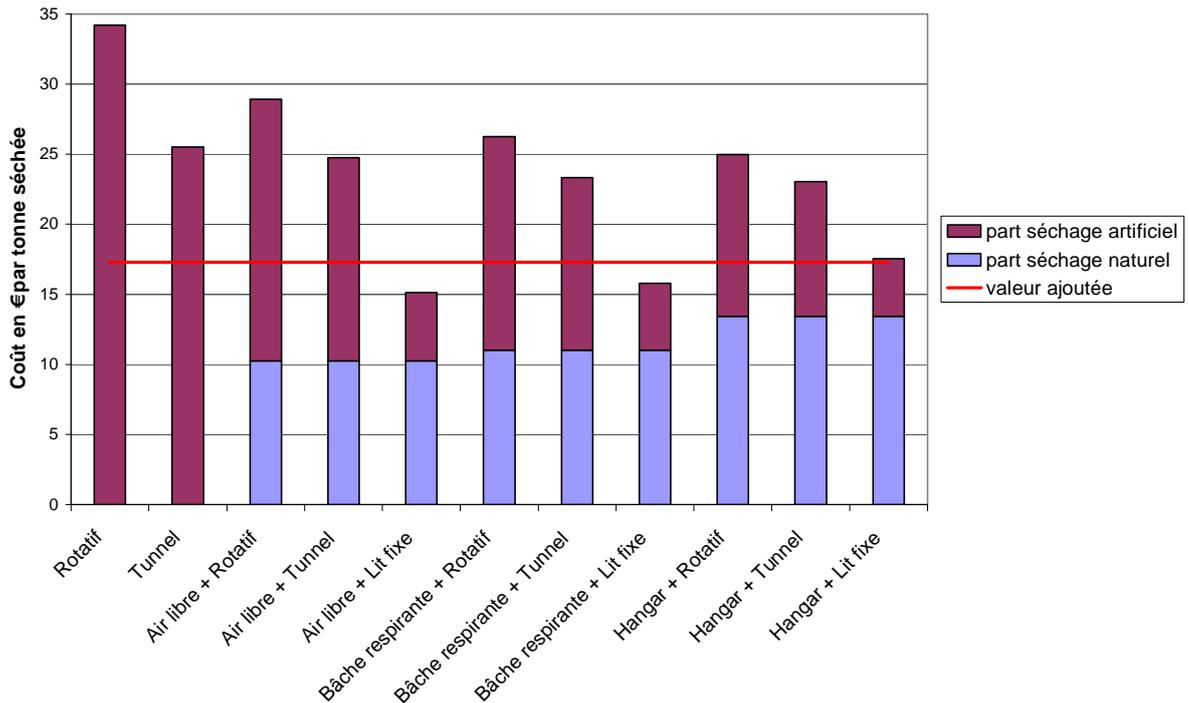


Figure 88 : Coût de la part de séchage naturel et/ou de séchage artificiel par rapport à la valeur ajoutée pour un projet de petite dimension ($50 > 10\%$).

Il apparaît une diminution du coût de séchage en fonction de l'efficacité du type de séchage naturel utilisé en amont, ce qui est tout à fait cohérent (sauf pour le séchage en lit fixe qui ne nécessite pas d'apport de chaleur coûteux). Plus on utilise un procédé de séchage naturel évolué, plus le coût de ce séchage est important.

Pour un projet de grande taille, le séchage en lit fixe n'est pas possible même s'il est précédé d'une phase de séchage naturel en raison du débit d'évaporation nécessaire. La Figure 89 montre l'influence des différents coûts relatifs au séchage des plaquettes forestières par rapport à la valeur ajoutée pour un projet de grande dimension. Dans ce cas, avec les valeurs de prix d'achat et de vente des plaquettes forestières considérées, aucune solution ne peut être rentable. Il faudrait donc augmenter légèrement le prix de vente des plaquettes forestières pour que le procédé devienne rentable. Néanmoins, il semble qu'il est plus intéressant d'utiliser un séchoir tunnel par rapport à un séchoir rotatif. De plus, la combinaison alliant séchage naturel sous bâche respirante et séchage en séchoir tunnel semble la plus prometteuse.

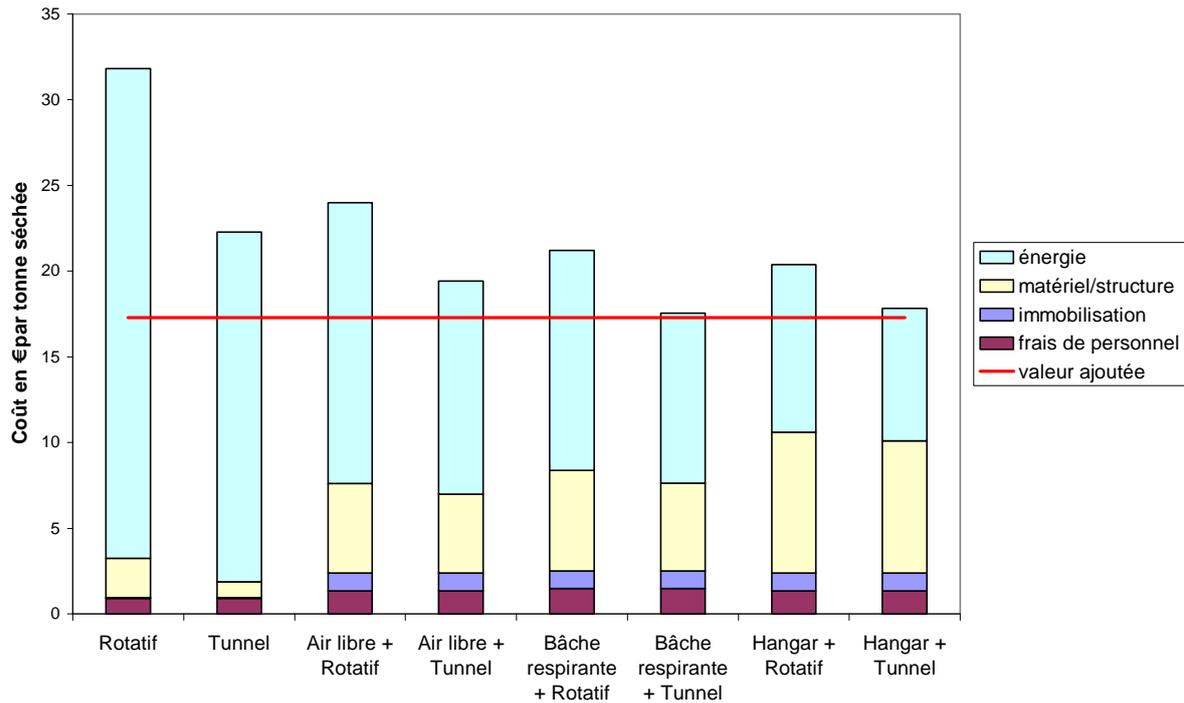


Figure 89 : Influence des différents coûts liés au séchage des plaquettes forestières par rapport à la valeur ajoutée pour un projet de grande dimension ($50 > 10\%$).

Pour une entreprise de grande dimension dont le prix de vente doit être faible, il semble que sécher le bois en dessous de 25 % d'humidité sur brut soit une solution trop coûteuse. Néanmoins, il est toujours possible de ne sécher qu'une partie de la production pour des besoins spéciaux.

4 Prix de vente minimal en fonction du procédé

Une autre approche consiste à donner un prix de vente minimal pour rentabiliser l'action de séchage des plaquettes. Le Tableau 28 montre le prix de vente minimal des plaquettes forestières séchées à 30 % d'humidité sur brut (en €/MWh⁻¹) en fonction du procédé choisi en considérant une marge de 2 €/par MWh vendu.

prix au MWh	Bâche respirante	Hangar	Rotatif	Tunnel
petite entreprise	21,75	21,99	24,52	23,37
grande entreprise	20,83	21,17	23,84	22,47
prix au MWh	Lit fixe	Air libre + Rotatif	Air libre + Tunnel	Air libre + Lit fixe
petite entreprise	20,63	23,34	23,22	22,46
grande entreprise	/	22,01	21,83	21,23

Tableau 28 : Prix de vente minimal en $\text{€}.\text{Mwh}^{-1}$ des plaquettes à 30% d'humidité sur brut en fonction du procédé de séchage.

Le Tableau 29 montre le prix de vente minimal des plaquettes forestières séchées à 10 % d'humidité sur brut (en $\text{€}.\text{Mwh}^{-1}$) en fonction du procédé choisi en considérant une marge de 2 € par MWh vendu.

prix au MWh	Rotatif	Tunnel	Lit fixe	Air libre + Rotatif	Air libre + Tunnel	Air libre + Lit fixe
petite entreprise	25,61	23,75	19,72	24,49	23,59	21,54
grande entreprise	25,1	23,07	/	23,43	22,46	/
prix au MWh	Bâche respirante + Rotatif	Bâche respirante + Tunnel	Bâche respirante + Lit fixe	Hangar + Rotatif	Hangar + Tunnel	Hangar + Lit fixe
petite entreprise	23,92	23,29	21,68	23,64	23,23	22,05
grande entreprise	22,83	22,05	/	22,66	22,11	/

Tableau 29 : Prix de vente minimal en $\text{€}.\text{MWh}^{-1}$ des plaquettes à 10% d'humidité sur brut en fonction du procédé de séchage.

Tout comme dans la partie précédente, on constate que le séchage naturel est toujours la solution la moins coûteuse. Cependant, à même humidité finale, des plaquettes forestières séchées artificiellement coûtent 2 à 3 euros plus cher au MWh. Les combinaisons de techniques de séchage naturel et artificiel engendrent également un surcoût. Si l'on compare le prix des plaquettes forestières séchées à d'autres types d'énergies (Figure 90), il apparaît clairement que le prix des plaquettes forestières reste bien en dessous du prix des autres combustibles. Les prix référencés sur la Figure 90 correspondent aux moyennes des valeurs des tableaux précédents, la dispersion des valeurs est également présentée sur ce graphique.

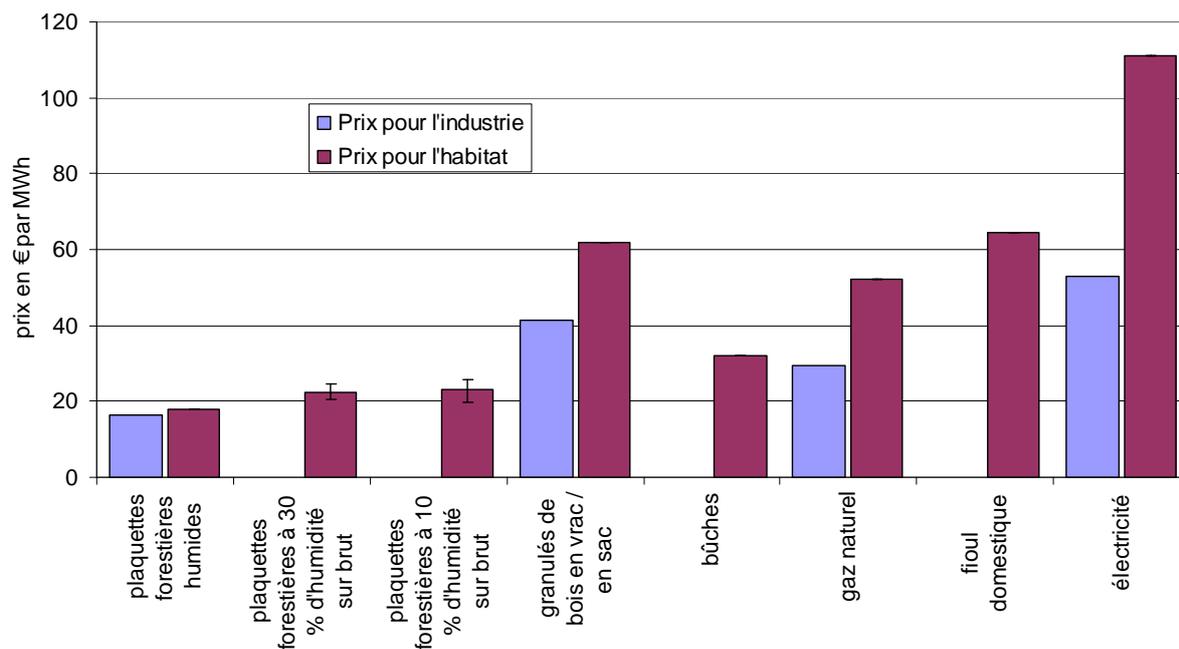


Figure 90 : Coût des plaquettes par rapport aux autres énergies.

En comparant le prix de plaquettes forestières à 10 % d'humidité sur brut aux prix des granulés en vrac (données de 2005) qui sont en général à une humidité proche de 8 %, on constate une différence de tarif de près de 20 € par MWh, ce qui montre l'intérêt et la compétitivité du séchage des plaquettes pour obtenir un combustible de qualité. De même, en comparant le prix des bûches (données de 2005) de bois à celui des plaquettes forestières à 30 % d'humidité sur brut, ces dernières sont moins chères de l'ordre de 10 € par MWh.

Même si au premier abord, le séchage des plaquettes forestières semble relativement cher, la commercialisation de plaquettes forestières sèches est possible à la vue de son faible coût de production et permettrait de concurrencer des combustibles autres.

5 Discussion

Les plaquettes forestières sont un produit à faible valeur ajoutée, cela rend leur commercialisation sèche d'autant plus difficile, le coût du séchage étant assez élevé.

Les techniques de séchage artificiel nécessitent généralement un apport de chaleur conséquent, rendant l'opération de séchage des plaquettes forestières chère. Globalement, les techniques de séchage naturel apportent des solutions relativement économiques et permettent d'ajouter de la valeur à ce matériau. La technique de séchage naturel sous bâche respirante paraît être la plus rentable si l'on souhaite sécher du bois à 30 % d'humidité. Si l'on souhaite descendre en dessous de ce seuil, le séchage sous hangar est une meilleure solution. Néanmoins, lorsque cela est possible, la technologie du lit fixe mobile semble toujours offrir un bilan technico-économique intéressant : il n'y a pas de rupture dans la chaîne logistique et l'énergie utilisée pour le séchage provient d'une source gratuite ou peu chère. Cependant, cette technologie doit être associée à la construction des procédés de valorisation thermique de la biomasse pour être positive.

A l'échelle d'une coopérative forestière telle que Forêts et Bois de l'Est qui fournit principalement de très grosses chaufferies demandant des plaquettes entre 40 et 50 % d'humidité sur brut, la gestion du bois en flux tendu est la meilleure solution car elle n'induit aucune rupture de charge. Cependant, si la coopérative doit fournir de petites chaufferies de type collectives ou particulières, il est nécessaire de stocker du bois pour bénéficier du phénomène de séchage naturel car ces chaufferies ont besoin de bois plus sec (entre 20 et 30 % d'humidité sur brut). Dans ces conditions, et en fonction des besoins, le stockage se déroulera sous bâche respirante ou sous hangar. Le stockage sous hangar présente bien entendu le moins de risques de reprise d'humidité et permet d'obtenir un bois plus sec. Il est cependant légèrement plus cher par le coût même du hangar.

Dans le cas du scénario de grosse entreprise, la plaquette a une valeur ajoutée tellement faible que le retour sur investissement paraît trop long.

Enfin, les modélisations économiques abordées ici n'ont pas pris en compte la saisonnalité de l'activité : les problèmes de stocks n'ont pas été gérés et il arrive régulièrement que les coopératives forestières stockent des tas à divers emplacements, ceux-ci sont généralement constitués au printemps pour être utilisés en hiver. Nous allons donc comparer le séchage de 1000 tonnes de bois selon 3 modes de stockage (air libre, sous bâche

respirante, sous hangar), les calculs seront effectués en prenant en compte les coûts de main d'œuvre, de matériel ou d'immobilier (sans compter le terrain) aux mêmes valeurs que précédemment. En considérant les données techniques du Tableau 30, le stockage sous bâche offre la solution la plus avantageuse qui engendre le moins de charges. Le calcul effectué dans ce tableau considère un prix d'achat et de vente des plaquettes à 18,5 €/le MWh.

Type de séchage	Air Libre	Bâche	Hangar
humidité finale	35	30	25
perte de masse sèche en %/mois	2,0	1,5	1,0
Coût d'achat du bois	41250	41250	41250
Prix de vente du stock bois	35659	38293	40790
charges	355	719	14659
marge	-5946	-3676	-15119

Tableau 30 : Caractéristiques des trois modes de stockages considérés.

Le séchage sous bâche semble beaucoup plus compétitif que le séchage à l'air libre avec les pertes de masse sèches correspondantes considérées. Il n'a cependant été comptabilisé qu'une seule opération de bâchage / débâchage. Dans le cas où l'on doit régulièrement ajouter du bois au tas, le coût de manutention de la bâche aurait un impact plus important.

Une autre question souvent posée est : « Pour des questions de transport pur, vaut-il mieux vendre du bois sec ou du bois humide ? ». Plus le bois sera sec, plus son prix de vente sera élevé, que ce soit à la tonne ou au m³. Les prix de ventes calculés dans le Tableau 31 prennent en compte une masse volumique des plaquettes forestières de 350 kg.m⁻³ à 50 % d'humidité sur brut (soit 250 kg.m⁻³ à 30 %) et un prix de vente des plaquettes forestières de 18,5 €/du MWh.

Type de séchage	Air Libre	Bâche	Hangar
humidité finale	35	30	25
prix de vente du bois en €/t	58,97	64,49	70,02
prix de vente en €/par MAP	15,88	16,12	16,34

Tableau 31 : Prix de vente des plaquettes forestières en fonction des trois modes de stockage considérés.

Ces données indiquent donc que pour un même camion, que l'on soit limité par la masse ou le volume transportable, il est toujours plus intéressant de vendre des plaquettes forestières sèches.

6 Conclusion

Le séchage artificiel des plaquettes forestières est un procédé qui coûte cher en énergie sauf si l'on dispose d'une source d'énergie gratuite. Ainsi, si on récupère de l'énergie dans les fumées d'un procédé de combustion, il est possible d'utiliser cette énergie normalement perdue pour sécher des plaquettes. En l'absence d'énergie gratuite, le séchage naturel des plaquettes forestières semble être la solution la plus économique pour répondre aux besoins des petites chaufferies et des procédés nécessitant des plaquettes de qualité.

Néanmoins, malgré le coût des opérations de séchage, produire des plaquettes à une humidité proche de celle des granulés serait plus compétitif que la production de ces derniers. Le séchage des plaquettes forestières peut donc se développer si le prix de vente au MWh de plaquettes forestières sèches est plus élevé que pour des plaquettes humides sans valeur ajoutée.

Conclusion générale

L'utilisation des plaquettes forestières à des fins énergétiques est de plus en plus importante. Leur séchage devient ainsi une problématique de plus en plus importante. En effet, même si les chaudières industrielles sont capables d'accepter du bois humide au détriment de l'énergie produite, les chaudières collectives ou de plus petite taille nécessitent un bois plus sec. De plus, les nouveaux développements (cogénération, biocarburants de deuxième génération, ...) demandent des combustibles de plus en plus homogènes et leur rentabilité est liée de façon assez forte à la qualité et au pouvoir calorifique des biomasses utilisées. Les données bibliographiques relatives au séchage des plaquettes forestières en tas sont relativement pauvres et il n'existe pas dans cette bibliographie de données pratiques accessibles aux producteurs leur permettant de mettre en œuvre de bonnes pratiques, notamment en termes de séchage en tas.

Ce travail de thèse, destiné à l'étude de l'évolution des caractéristiques physico-chimiques des plaquettes forestières en fonction des modalités de stockage permet de répondre à certaines de ces questions et à certains manques de la bibliographie. Une méthode de mesure nouvelle (dans cette plage d'humidité du bois) a été mise au point sur le principe de la mesure de résistance électrique et de la température du bois afin de suivre en continu l'évolution de l'humidité des plaquettes forestières et de leur température au cours du stockage en tas. Ce système de mesure a aussi pour avantage une consommation énergétique réduite permettant de l'utiliser sur batterie dans des zones reculées, en forêt par exemple.

La méthode de mesure développée a pu être éprouvée lors des essais, montrant une bonne fiabilité et une bonne précision des résultats. Ces essais ont permis de mieux comprendre les mécanismes de production de chaleur et de migration de l'humidité dans les tas de plaquettes forestières pour différentes conditions opératoires. Suite à ces essais, une fiche de recommandations accessible à tous afin d'éviter les erreurs et améliorer le séchage des plaquettes forestières a été écrite. Ces essais ont également permis d'évaluer l'impact des paramètres influents sur le séchage des plaquettes forestières, tels que la granulométrie, la taille du tas, la fraîcheur du bois, le type ou la saison de stockage. Il semble que la fraîcheur du bois qui correspond au temps entre l'abattage du bois et son broyage ait un impact important sur les phénomènes micro biologiques : plus le bois est frais, plus l'auto échauffement et le séchage seront favorisés. La hauteur du tas a également un impact fort :

plus celui-ci est grand, plus la température dans le tas sera importante, favorisant le séchage. Il est néanmoins recommandé de ne pas dépasser des hauteurs de l'ordre de 12 mètres afin d'éviter des problèmes d'auto inflammation. Enfin, la granulométrie a également un effet sur le séchage qui semble de la même importance que la hauteur de tas. Il semble que plus la granulométrie est fine, plus la chaleur générée dans le tas est importante. Cependant si une granulométrie plus fine engendre une dispersion de la taille des particules plus importante et donc une porosité plus faible, l'humidité aura des difficultés à quitter le tas, augmentant le temps de séchage et pouvant finalement induire une qualité de séchage moins importante. Concernant les modalités de stockage, le stockage sous hangar permet d'obtenir les humidités les plus faibles, puis c'est le stockage sous bâche respirante et enfin le stockage à l'air libre qui a les plus mauvaises performances. Le stockage sous hangar permet en effet d'éviter tout risque de reprise d'humidité, que ce soit par le sol ou par les côtés du tas. Le séchage sous bâche respirante a montré ses limites pour le stockage des plaquettes lors de périodes neigeuses ou fortement pluvieuses : dans ce cas, la bâche limite le séchage. Concernant la période de stockage, il est préférable de constituer les tas de plaquettes lorsque les températures sont douces, ce qui facilite l'échauffement.

Lors du stockage des plaquettes forestières, les analyses des gaz effluents montrent la présence de nombreux terpènes, les principaux étant de type pinène, limonène et camphène. La présence d'éthanol dans les analyses est sûrement une conséquence de la respiration anaérobie de cellules de bois ou de bactéries. Il y a donc des phases où les micro-organismes fonctionnent en anaérobie et d'autres où ils fonctionnent en aérobie. Les analyses n'ont cependant pas permis de qualifier précisément le type d'action microbiologique se déroulant dans le tas au cours du séchage naturel.

Le séchage des plaquettes forestières pouvant s'effectuer de manière naturelle ou artificielle, deux modèles de séchage ont été développés. Le premier modèle concerne le séchage de plaquettes forestières en lit fixe mobile. Cette solution semble en effet très intéressante car elle permet d'utiliser de l'énergie basse température issue d'un procédé de conversion thermo-chimique comme source de chaleur pour le séchage. Le modèle développé permet de dimensionner un lit fixe mobile à contre-courant. Le second modèle développé concerne le séchage naturel des plaquettes forestières. Le modèle simplifié à une dimension d'espace permet déjà de justifier certaines évolutions observées expérimentalement. Néanmoins, l'évolution de la croissance des micro-organismes et de l'énergie qu'ils apportent n'est que très peu connue, ce qui rend pour l'instant toute modélisation aléatoire. En effet, la

quantité de chaleur générée dépend de paramètres tels que l'humidité de l'air et du bois dans le tas, la température, la quantité d'oxygène présent, la quantité de substances permettant aux micro-organismes de se nourrir, ... L'extension du modèle à la géométrie réelle d'un tas devrait permettre de se rapprocher encore plus de l'expérience durant toute la durée du séchage. Il serait aussi nécessaire d'ajouter les pertes thermiques et les entrées d'air frais en bas du tas dû à la sortie de l'air chaud et humide dans la partie supérieure du tas.

Dans une dernière partie, une étude économique du séchage des plaquettes forestières a été réalisée afin de déterminer les solutions les plus avantageuses. Cette étude permet de comparer différentes solutions de séchage naturel et artificiel ainsi que leurs différentes combinaisons. La feuille de calcul développée permet en fonction des cas étudiés, d'évaluer la solution la plus rentable. Globalement, les technologies de séchage artificiel coûtent cher si l'on doit produire de l'énergie pour le séchage. Il est nécessaire d'éviter au maximum toute manutention des plaquettes forestières qui coûte aussi très cher. Néanmoins, quel que soit le procédé de séchage utilisé, même s'il s'accompagne de l'utilisation d'un procédé artificiel, l'impact sur le prix de vente des plaquettes forestières est relativement faible. Les plaquettes forestières sèches ont toujours un prix de revient et un prix de vente très compétitifs, surtout si on compare aux prix des autres énergies telles que les granulés, le gaz, le fioul ou l'électricité.

Pour optimiser le séchage des plaquettes forestières, une solution pourrait être d'ensemencer les plaquettes lors du broyage avec des micro-organismes, ce qui permettrait d'augmenter la production de chaleur au sein du tas et certainement d'accélérer le séchage. Une autre solution pourrait être de rendre le processus de séchage naturel continu. En effet, concevoir un système de désilage permettant de retirer le bois se trouvant dans la partie sèche du tas permettrait de rendre le processus continu, à l'image des tas de sciures dans les papeteries. Notons cependant que l'optimisation du séchage naturel passe maintenant par une meilleure compréhension des phénomènes biologiques, notamment aux niveaux des champignons et des bactéries. Il apparaît que l'activité de ces micro-organismes est la principale source d'énergie au sein du tas et que la caractérisation précise de cette énergie est une priorité pour modéliser et optimiser le séchage naturel. Enfin, une dernière solution pourrait être de sécher les plaquettes forestières grâce à de l'air chaud d'origine solaire une fois l'auto échauffement terminé.

Bibliographie

- [1] Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durables, Présentation générale de la biomasse en France, disponible sur : http://www.developpement-durable.gouv.fr/energie/renou/biomasse/fl_e_biom.htm (dernière consultation le 20/08/09)
- [2] Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, La plus importante ressource de bois énergie en France : le gisement forestier, disponible sur : <http://www.industrie.gouv.fr/energie/statisti/tbb/ressources.htm> (dernière consultation le 20/08/09)
- [3] Institut Forestier National, Évaluation du potentiel Bois Énergie, disponible sur : <http://www.boisenergie.ifn.fr/index.php> (dernière consultation le 20/08/09)
- [4] ADEME, Bilan environnemental du chauffage collectif (avec réseau de chaleur) et industriel au bois, Note de synthèse (2005)
- [5] ADEME, Bilan environnemental du chauffage domestique au bois, Note de synthèse (2005)
- [6] ITEBE, les plaquettes forestières, disponible sur : <http://www.itebe.org/portail/affiche.asp?arbo=1&num=264> (dernière consultation le 20/08/09)
- [7] Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, Les énergies renouvelables en France 1970-2005 disponible sur : <http://www.industrie.gouv.fr/energie/statisti/pdf/historique-enr02.pdf> (dernière consultation le 20/08/09)
- [8] IFEN, Part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie primaire, disponible sur : http://www.ifen.fr/uploads/media/fiche_ENR.pdf (dernière consultation le 20/08/09)
- [9] Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durables, La valorisation énergétique du bois en France : le programme bois-énergie, disponible sur : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/energie/renou/boisenergie.htm> (dernière consultation le 20/08/09)
- [10] ADEME, Énergies et matières renouvelables, Fonds chaleur, disponible sur : <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=23119> (dernière consultation le 20/08/09)
- [11] Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, Les prix moyens du bois énergie livré en France, disponible sur : http://www.developpement-durable.gouv.fr/energie/statisti/tbb/prix_bois.htm (dernière consultation le 20/08/09)

- [12] Commissariat Général au Développement Durable, Énergies et matières premières, Prix des énergies, ISSN 0984-6026 (2008), disponible sur : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/energie/statisti/pdf/dep2000.pdf> (dernière consultation le 20/08/09)
- [13] ADEME, Programme bois énergie 2000-2006, Rapport d'activités 2000-2004, Synthèse
- [14] Y. Rogaume, Production de chaleur à partir du bois, Installations industrielles, Techniques de l'ingénieur, BE8748
- [15] P. Jodin, Le bois, matériau d'ingénierie, A.r.bo.lor, ISBN 2-907086-07-3 (1994)
- [16] P. Franchomme, L'aromathérapie exactement, Roger Jollois, ISBN 2-87819-001-7 (2001)
- [17] J. Nyström, E. Dahlquist, Methods for determination of moisture content in wood chips for power plants—a review. *Fuel* 83 773-779 (2004)
- [18] P. Daugbjerg, H. Hartmann, T. Böhm, M. Temmerman, F. Rabier, M. Morsing, Moisture content determination in solid biofuels by dielectric and NIR reflection methods, *Biomass and Bioenergy* vol.30, 935–943 (2006)
- [19] Appareils électriques de mesure d'humidité du bois, fiche d'information Gann disponible sur : http://www.gann.de/downloads/in_holzfeuchte_frz.pdf (dernière consultation le 20/08/09)
- [20] W. L. James, Electric moisture meters for wood, general technical report FPL-GTR-6, Forest products laboratory (1988)
- [21] J. Garstang, Identification and characterisation of factors affecting losses in the large-scale, nonventilated bulk storage of wood chips and development of best storage practices, DTI (2002)
- [22] AFRC Silsoe research institute, Storage and drying of comminuted forest residues, report ETSU B/W1/00146/REP (1993)
- [23] R. Jirjis, Effects of particle size and pile height on storage and fuel quality of comminuted *Salix viminalis*. *Biomass and Bioenergy* 28 (2005)
- [24] W.S. Fuller, Chip pile storage – a review of practices to avoid deterioration and economic losses. *Tappi Journal* 68, pp8, p48-51 (1985)
- [25] Y. Tsuchiya & K. Surini, Combustion spontanée, disponible sur : <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/cbd/cbd189f.html> (dernière consultation le 20/08/09)
- [26] X. Li, H. Koseki, M. Momota, Evaluation of danger from fermentation-induced spontaneous ignition of wood chips, *Journal of Hazardous Materials* A135, 15–20 (2006)

- [27] T. Thörnqvist, Importance de l'abri et de la circulation d'air sous le support pour le stockage des plaquettes destinées au chauffage (traduit du suédois). ISSN 03484599, ISBN 915761119
- [28] R. Jirjis, Enumeration and distribution of fungi in stored fuel chip piles. *Material und Organismen* 24 (1989)
- [29] J.-P. Larpent, M. Larpent-Gourgaud, Méméto technique de microbiologie, Lavoisier TEC&DOC, ISBN 2-7430-0163-1 (1997)
- [30] Raven, Everd & Eichhorn, Biologie végétale, De Boeck université, ISBN 2-7445-0102-6 (2000)
- [31] Campbell, Biologie, De Boeck université, ISBN 2-8041-2084-8 (1995)
- [32] R. Gourdon, Aide à la definition des dechets dits biodegradables, fermentescibles, methanisables, compostables, étude RE.CO.R.D. N° 00-0118/1A (2002)
- [33] R. Jirjis, Storage and drying of wood fuel. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 9, p181-190 (1995)
- [34] R. Jirjis, Storage and drying of woody biomass. IEA/Bioenergy Agreement (1993)
- [35] E. L. Springer, L. L. Jr Zoch, W. C. Feist, G. J. Hajny, R. W. Hemingway, Storage characteristics of southern pine whole-tree chips. In: McMillin, CW (ed) Complete tree utilization or southern pine. Forest Products Research Society, Madison, p 216-223 (1978)
- [36] P. Hakkila, Utilization of Residual Forest Biomass, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (1989)
- [37] O. Gislerud, Small-scale storing and drying of fuelwood and fuel chips. In: Storing, Drying and Internal Handling of Wood Fuels. Proceedings of a conference held by the International Energy Agency (IEA) Forestry Energy Programme Group C on June 22, 1984, Copenhagen, Denmark. Ed: O. Gislerud, N. Heding (1984)
- [38] J. Baadsgaard-Jensen, Storage and energy economy of chunk and chip piles. In: production, storage and utilization of wood fuels, Vol.II. drying and storage. research notes No.134/1988. The Swedish university of agricultural sciences, Uppsala, p198-215 (1988)
- [39] C. P. Mitchell, J. B. Hudson, D. N. A. Gardner, P. G. S. Storry, I. M. Gray, Wood fuel supply strategies. Volume 1: The report Contractor Report ETSU B 1176-P1, Department of Energy (1990)
- [40] J. Nurmi, Longterm storage of fuel chips on large piles (in Finnish), *Folia Forestalia* 767, p. 18 (1999)
- [41] J. Nurmi, Drying of fuel chips and chunks in wooden bins (in Finnish), *Folia Forestalia* 687, p. 40 (1987)

- [42] J. Nurmi, The storage of logging residue for fuel, *Biomass and Bioenergy* 17, p.41-47 (1999)
- [43] K. Rupar, M. Sanati, The release of terpenes during storage of biomass. *Biomass and Bioenergy* 28, p29-34 (2005)
- [44] Forêts et Bois de l'Est, Informations orales, Damien François et Benoit Fritch (2009)
- [45] J. Ast, Y. Rogaume, A. Zoulalian, Étude comparative de différents procédés de séchage de biomasses fragmentées en vue d'une valorisation énergétique, étude confidentielle menée pour EDF (2007)
- [46] CETIAT & ADEME, Les procédés de séchage dans l'industrie. ISBN : 2-86817-339-X, 108 p (2001)
- [47] R. Goenaga, Séchage des solides et des liquides. *Techniques de l'ingénieur* J2712.
- [48] COMESSA, Équipements, Disponible sur : <http://www.comessa.fr/pages/equipements/frameset.htm> (dernière consultation le 07/11/2006)
- [49] L. F. Sturgeon, Conveyor dryers. **In** : A. S. Mujumdar, *Handbook of industrial drying*. 2nd edition, ISBN : 9995474727, p 525-537 (1995)
- [50] D. Poirier, Conveyor dryers. **In** : A. S. Mujumdar, *Handbook of industrial drying*. 3rd edition, ISBN : 1574446681, p 411-438 (2006)
- [51] A.S. Mujumdar, A.S. Menon, Drying of solids. **In** : A. S. Mujumdar, *Handbook of industrial drying*. 2nd edition, ISBN : 9995474727, p 22-39 (1995)
- [52] J.F. Cruz, F. Troude, D. Griffon, J.P. Hébert, *Conservation des grains en régions chaudes*. 2nd ed. ISBN : 2110848758, 545 p (1988)
- [53] Watropur, Watromat séchoir de boue à bande, disponible sur : http://www.watropur.com/fr/belt_sludge_dryer/ (dernière consultation le 07/02/2007)
- [54] J.G. Brammer, A.V. Bridgwater, Drying technologies for an integrated gasification bio-energy plant, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 3, Issue 4, p243-289 (1999)
- [55] Kahl, Belt driers and coolers for high continuous load, disponible sur : http://www.akahl.de/index.php?set_lang=enl (dernière consultation le 01/03/2007)
- [56] C. Strumito, P. L. Jones, R. Zytta, Energy aspect in drying. **In** : A. S. Mujumdar, *Handbook of industrial drying*. 3rd edition, ISBN : 1574446681, p 1075-1101 (2006)
- [57] GEA, Produits séchoirs, disponible sur : <http://www.barr-rosin.com/fr/produits/sechoirs.htm> (dernière consultation le 07/11/2006)

- [58] J. J. Kelly, Rotary drying. **In** : A. S. Mujumdar, Handbook of industrial drying. 2nd edition, ISBN : 9995474727, p 161-183 (1995)
- [59] M. Marcotte, Le séchage ? Pas si aride..., disponible sur : http://sci.agr.ca/sthyacinthe/pubs/art13_f.htm (dernière consultation le 08/11/2006)
- [60] W. A. Amos, Report on biomass drying technology, National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-570-25885 (1998)
- [61] E. F. Kristensen, P. D. Kofman, Pressure resistance to air flow during ventilation of different types of wood fuel chip. Biomass and Bioenergy 18, p175-180 (2000)
- [62] W. L. James, Electric moisture meter for wood. Forest Product Laboratory, General technical report FPL-GTR-6 (1988)
- [63] AFRC Siloe Research Institute, Storage and drying of comminuted forest residues, ETSU B/W1/00146/REP (1993)
- [64] P. Perré, Fundamentals of wood drying, European COST, Arbolor Ed., ISBN 9782907086127 (2007)
- [65] C. Lartigue, J.R. Puiggali, Caractéristiques du pin des landes nécessaires à la compréhension des phénomènes de séchage, Actes du second Coll. Sciences et Industries du Bois, Arbolor Ed., 2 p 57-64 (1987)
- [66] L. Chrusciel, étude de l'association d'une colonne d'absorption à un séchoir convectif à basse température : influence de l'absorbeur la cinétique et la qualité du chauffage, thèse soutenue à l'Université Henri Poincaré Nancy 1 (1998)

Annexe 1

Programme de simulation d'un lit fixe mobile

```
% données sur l'air
G=0.02032; %kg/s
We=0.00729229; %kgeau/kg air sec
Tge=273+80; % °C
% données sur le solide
Ms=0.0004359361; %kg/s
Tse=273+20; % °C
Xe=1;
Xs=0.0526;
epsilon=0.75;
% données physiques
Cpb=2100; %J/(kg.K)
Cpa=1005; %J/(kg.K)
Cpel=4180; %J/(kg.K)
Cpev=1850; %J/(kg.K)
Lambda0=2536000; %J/kg
%coefficients de transfert
h=10; % W/(m2.K)
a=700; %m-1

function f=ftg(h,a,V,Ts,Tg,K,epsilon,X,Xeq,Cpev,G,Cpa,W)
f=(-h*a*V*(Ts-Tg)+K*a*V*(1-epsilon)*(X-Xeq)*Cpev*(Tg-Ts))/(G*(Cpa+W*Cpev));

function f=fts(K,a,V,epsilon,X,Xeq,Lambda0,Cpev,Cpel,Ts,h,Tg,Ms,Cpb)
f=(-K*a*V*(1-epsilon)*(X-Xeq)*(Lambda0+(Cpev-Cpel)*(Ts-273))+h*a*V*(Tg-
Ts))/(Ms*(Cpb+X*Cpel));

function f=fw(K,a,V,epsilon,G,Xeq,X)
f=(-K*a*V*(1-epsilon)/G)*(X-Xeq);

Tgs=273+30; % °C
V=0.013; %m3

dz=0.001;
z(1)=1.;
%données aux limites
Tg(1)=Tgs;
W(1)=(0.622*(10^(2.7877+(7.625*(Tg(1)-273))/(241.6+(Tg(1)-273)))/(101300-
10^(2.7877+(7.625*(Tg(1)-273))/(241.6+(Tg(1)-273))))));
X(1)=Xe;
Ts(1)=Tse;
hr(1)=100;
A=-2.86*10^(-5)*Tg(1)^2-1.075*10^(-2)*Tg(1)+10.238;
B=-5.414*10^(-4)*Tg(1)+1.0134;
```

```

C=4.97*10^(-6)*Tg(1)^2-2.667*10^(-3)*Tg(1)+0.3548;
Q=(C-log(hr(1)/100))/A;
Xeq(1)=log(Q)/(100*log(B));
rhoair=1.203;
a0=0.12;
b0=4.6;
c0=2683;
n=0.5;
e=2.6;
S=0.04; %surface du silo
Va(1)=G*rhoair*(Tg(1)/273)/S;
K(1)=1/(a0*exp(c0/Tg(1))*e+b0*exp(c0/Tg(1))*Va(1)^(-n)*exp(-(1-hr(1)/100)/(0.3-
Xeq(1)))));

%initialisation
i=2;
z(i)=z(i-1)-dz;
j=1/dz;

while i<j
Va(1)=G*rhoair*(Tg(1)/273)/S;
K(1)=1/(a0*exp(c0/Tg(1))*e+b0*exp(c0/Tg(1))*Va(1)^(-n)*exp(-(1-hr(1)/100)/(0.3-
Xeq(1)))));
W(1)=(0.622*(10^(2.7877+(7.625*(Tg(1)-273))/(241.6+(Tg(1)-273)))/(101300-
10^(2.7877+(7.625*(Tg(1)-273))/(241.6+(Tg(1)-273))))));
%calculs runge kutta
%calcul w
aw1=dz*fw(K(i-1),a,V,epsilon,G,Xeq(i-1),X(i-1));
aw2=dz*fw(K(i-1),a,V,epsilon,G,Xeq(i-1),X(i-1));
aw3=dz*fw(K(i-1),a,V,epsilon,G,Xeq(i-1),X(i-1));
aw4=dz*fw(K(i-1),a,V,epsilon,G,Xeq(i-1),X(i-1));
%calcul Ts
ats1=dz*fts(K(i-1),a,V,epsilon,X(i-1),Xeq(i-1),Lambda0,Cpev,Cpel,Ts(i-1),h,Tg(i-
1),Ms,Cpb);
ats2=dz*fts(K(i-1),a,V,epsilon,X(i-1),Xeq(i-1),Lambda0,Cpev,Cpel,Ts(i-
1)+ats1/2,h,Tg(i-1),Ms,Cpb);
ats3=dz*fts(K(i-1),a,V,epsilon,X(i-1),Xeq(i-1),Lambda0,Cpev,Cpel,Ts(i-
1)+ats2/2,h,Tg(i-1),Ms,Cpb);
ats4=dz*fts(K(i-1),a,V,epsilon,X(i-1),Xeq(i-1),Lambda0,Cpev,Cpel,Ts(i-
1)+ats3,h,Tg(i-1),Ms,Cpb);
%calcul Tg
atg1=dz*ftg(h,a,V,Ts(i-1),Tg(i-1),K(i-1),epsilon,X(i-1),Xeq(i-1),Cpev,G,Cpa,W(i-
1));
atg2=dz*ftg(h,a,V,Ts(i-1),Tg(i-1)+atg1/2,K(i-1),epsilon,X(i-1),Xeq(i-
1),Cpev,G,Cpa,W(i-1));
atg3=dz*ftg(h,a,V,Ts(i-1),Tg(i-1)+atg2/2,K(i-1),epsilon,X(i-1),Xeq(i-
1),Cpev,G,Cpa,W(i-1));
atg4=dz*ftg(h,a,V,Ts(i-1),Tg(i-1)+atg3,K(i-1),epsilon,X(i-1),Xeq(i-
1),Cpev,G,Cpa,W(i-1));
%itération sur z

```

```

W(i)=W(i-1)+1/6*(aw1+2*aw2+2*aw3+aw4);
Ts(i)=Ts(i-1)+1/6*(ats1+2*ats2+2*ats3+ats4);
Tg(i)=Tg(i-1)+1/6*(atg1+2*atg2+2*atg3+atg4);
hr(i)=8.25808691986618*10^6*exp(-(17.5572113340796*(Tg(i)-
273))/(241.6+(Tg(i)-273)))*W(i)/(311+500*W(i));

% humidité absolue du bois
X(i)=(Xe*Ms-G*(W(1)-W(i)))/Ms;

% humidité absolue du bois à l'équilibre
A=-2.86*10^(-5)*Tg(i)^2-1.075*10^(-2)*Tg(i)+10.238;
B=-5.414*10^(-4)*Tg(i)+1.0134;
C=4.97*10^(-6)*Tg(i)^2-2.667*10^(-3)*Tg(i)+0.3548;
Q=(C-log(hr(i)/100))/A;
Xeq(i)=log(Q)/(100*log(B));
if Xeq(i)<0;
    Xeq(i)=0;
end

% coefficient de transfert global k en kg.m-2.s-1
Va(i)=G*rhoair*(Tg(i)/273)/S;
K(i)=1/(a0*exp(c0/Tg(i))*e+b0*exp(c0/Tg(i))*Va(i)^(-n)*exp(-(1-hr(i)/100)/(0.3-
Xeq(i))));

% itération
i=i+1;
z(i)=z(i-1)-dz;

end

Tg(i)=Tg(i-1);
W(i)=W(i-1);
X(i)=X(i-1);
Ts(i)=Ts(i-1);
Xeq(i)=Xeq(i-1);
hr(i)=hr(i-1);
K(i)=K(i-1);
figure(1);
plot(z,Tg-273,z,Ts-273);
xlabel('z')
ylabel('Tg et Ts en °C')
figure(2);
plot(z,W);
xlabel('z')
ylabel('W')
figure(3);
plot(z,X,z,Xeq);
xlabel('z')
ylabel('Xeq et X')

```


Annexe 2

Programme de simulation du séchage naturel (modèle à 1 dimension)

```
clear all
%Définition des variables globales
global n H dz P u q Xe k Ps hr fout

file = input(' enter the output file name: ? ','s');
fout = fopen(file,'wt');
fprintf(fout,'\n \n');
fprintf(fout,'                Suivi des differentes valeurs \n');
fprintf(fout,'                - 12/02/09 - \n\n');
fprintf(fout,'\n                ');
fprintf(fout,'t, q , u \n');
% conditions initiales
temperature_i =293; % K
rho_eau_i =0.01718; %kg/m3
rho_air_i =1.203; %kg/m3
humidite_i =1; %kg_eau/kg_solide_sec
n=11 ; %nombre de points
% au temps t=0
for i=1:n
    V_i(4*(i-1)+1) =rho_eau_i;
    V_i(4*(i-1)+2) =rho_air_i;
    V_i(4*(i-1)+3) =humidite_i;
    V_i(4*(i-1)+4) =temperature_i;
end
%Résolution de l'équation différentielle
tinit=0;
tfin=5184000;
dt=3600;
tspan=[tinit:dt:tfin];
options=odeset('RelTol',10^(-1));
[t,V]=ode23tb('Equations',tspan,V_i);
clf;
for i=1:n
plot(t(:,1),V(:,4*(i-1)+4))
hold on
end
-----
%Détermination des variables en fonction de z
function [Vdot]=Equations(t,V);
global n H dz P u q Xe k Ps hr fout
    H =5 ;
    dz =H/(n-1) ;
%Grandeurs utiles au calcul
```

```

eps = 0.75; %m3_fluide/m3_echantillon
rho_bois =300; %kg.m-3
Cp_bois =2100; %J.kg-1.K-1
Cp_eau_liquide =4180;
Cp_air =1005;
Cp_eau_vapeur =1850;
lambda0 =2536000; %J.kg-1
R =8.314;
M_eau =0.018; %kg.mol-1
M_air =0.029;
Mu =9.1*10^-6; %Pa.s
a=700; %m-1
Hcible=0.2;
% initialisation des valeurs
A1(1) =10.238-1.075*10^-2*V(4)-2.86*10^-5*V(4)^2;
A2(1) =1.0134-5.414*10^-4*V(4);
A3(1) =0.3548-2.667*10^-3*V(4)+4.97*10^-6*V(4)^2;
Ps(1) =exp(13.7-5120/V(4))*101325;
hr(1) =V(1)*R*V(4)/(M_eau*Ps(1));
if hr(1)>1
    V(1)=(M_eau*Ps(1))/(R*V(4));
    hr(1) =V(1)*R*V(4)/(M_eau*Ps(1));
end
Xe(1) =log(((A3(1)-log(hr(1)*100))/A1(1)))/(100*log(A2(1)));
if imag(Xe(1))==0
else Xe(1)=0;
end
P(1) =1.013*10^5; %Pa
u(1) =0;
q(1) =0;
k(1) =((V(1)*R*V(4))/(M_eau*Ps(1)))*100/60;
if k(1)<0
    k(1)=0;
end
% calcul des valeurs non transportées par le système
for i=2:n
    A1(i) =10.238-1.075*10^-2*V(4*(i-1)+4)-2.86*10^-5*V(4*(i-1)+4)^2;
    A2(i) =1.0134-5.414*10^-4*V(4*(i-1)+4);
    A3(i) =0.3548-2.667*10^-3*V(4*(i-1)+4)+4.97*10^-6*V(4*(i-1)+4)^2;
    Ps(i) =exp(13.7-5120/V(4*(i-1)+4))*101325;
    hr(i) =V(4*(i-1)+1)*R*V(4*(i-1)+4)/(M_eau*Ps(i));
    if hr(i)>1
        V(4*(i-1)+1)=(M_eau*Ps(i))/(R*V(4*(i-1)+4));
        hr(i) =V(4*(i-1)+1)*R*V(4*(i-1)+4)/(M_eau*Ps(i));
    end
    Xe(i) =log(((A3(i)-log(hr(i)*100))/A1(i)))/(100*log(A2(i)));
    if imag(Xe(i))==0
    else Xe(i)=0;
    end
end

```

```

P(i) =R*V(4*(i-1)+4)*(V(4*(i-1)+1)/M_eau+V(4*(i-1)+2)/M_air);
u(i) =(P(i)-P(i-1))/dz*eps^3/(4.16*Mu*(1-eps)^2*a^2);
q(i)      =((0.0066+0.3093*V(4*(i-1)+1)/V(4*(i-1)+2))*exp(0.1141*(V(4*(i-1)+4)-
313))/(1+(exp(0.1141*(V(4*(i-1)+4)-313)))^2)/3600*5000000)*(V(4*(i-1)+3)-Xe(i));
%en J.s-1 tiré de la formule p49 et PCIanhydre 18MJ
k(i) =(6.814*10^-6*(V(4*(i-1)+4)-273)+6.027*10^-5)*(1-((V(4*(i-1)+1)*R*V(4*(i-
1)+4))/(M_eau*Ps(i))))*100/60;
if k(i)<0
    k(i)=0;
end
end
% Définition du système d'équations différentielles
% Initialisation
Vdot(1) = 1/eps*(k(1)*(1-eps)*a*(V(3)-Xe(1)));
Vdot(2) = 0;
Vdot(3) = 1/((1-eps)*rho_bois)*(-k(1)*a*(1-eps)*(V(3)-Xe(1)));
Vdot(4)      =1/((1-eps)*rho_bois*(Cp_bois+V(3)*Cp_eau_liquide))*(q(1)*(1-
eps)*rho_bois-(V(2)*Cp_air+V(1)*Cp_eau_vapeur)*u(1)*(V(4)-
V(4))/dz+eps*Cp_air*V(4)*Vdot(2)+eps*(lambda0+Cp_eau_vapeur*V(4))*Vdot(1)-
k(1)*a*(1-eps)*(V(3)-Xe(1))*(lambda0+(Cp_eau_vapeur-Cp_eau_liquide)*V(4)));
% Système d'équation
for i=2:n
    Vdot(4*(i-1)+1) = 1/eps*(-(V(4*(i-1)+1)*(u(i)-u(i-1))/dz+u(i)*(V(4*(i-1)+1)-V(4*(i-
2)+1))/dz)+k(i)*(1-eps)*a*(V(4*(i-1)+3)-Xe(i)));
    Vdot(4*(i-1)+2) = -1/eps*((V(4*(i-1)+2)*(u(i)-u(i-1))/dz+u(i)*(V(4*(i-1)+2)-V(4*(i-
2)+2))/dz));
    Vdot(4*(i-1)+3) = 1/((1-eps)*rho_bois)*(-k(i)*(1-eps)*a*(V(4*(i-1)+3)-Xe(i)));
    Vdot(4*(i-1)+4)      =
        1/((1-eps)*rho_bois*(Cp_bois+V(4*(i-
1)+3)*Cp_eau_liquide))*(q(i)*(1-eps)*rho_bois-(V(4*(i-1)+2)*Cp_air+V(4*(i-
1)+1)*Cp_eau_vapeur)*u(i)*(V(4*(i-1)+4)-V(4*(i-2)+4))/dz+eps*Cp_air*V(4*(i-
1)+4)*Vdot(4*(i-1)+2)+eps*(lambda0+Cp_eau_vapeur*V(4*(i-1)+4))*Vdot(4*(i-
1)+1)-k(i)*(1-eps)*a*(V(4*(i-1)+3)-Xe(i))*(lambda0+(Cp_eau_vapeur-
Cp_eau_liquide)*V(4*(i-1)+4)));
end
Vdot=Vdot(:);
fprintf(fout,'%7.7f %6.5f %6.5f %6.5f %6.5f %6.5f %6.5f %6.5f %6.5f %6.5f %6.5f
%6.5f %6.5f \n', t, q(1), q(3), q(5), q(7), q(9), q(11), u(1), u(3), u(5), u(7), u(9), u(11));
t

```