ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

AgroParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET INDUSTRIES DU VIVANT ET DE L'ENVIRONNEMENT
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY FOR LIFE, FOOD AND ENVIRONMENTAL SCIENCES

RP2E

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement

(AgroParisTech)

Spécialité : Sciences du bois

présentée et soutenue publiquement par

Julien COLIN

le 1er juillet 2011

Séchage en continu du bois énergie comme moyen de préconditionnement en vue de sa conversion thermochimique : approches expérimentale et numérique

Direction de la thèse : **Patrick PERRÉ**
Co-encadrement de la thèse : **Romain RÉMOND**

Jury

M. Gérard ANTONINI, Professeur, TIMR, Université Technologique de Compiègne	Président
M. Gérald DEBENEST, Maitre de Conférence, IMFT, Institut National Polytechnique de Toulouse	Rapporteur
M. Roman PECZALSKI, Professeur, LAGEP, Université Claude Bernard Lyon I	Rapporteur
M. Christian MOYNE, Directeur de recherche, LEMTA, CNRS Nancy	Examinateur
M. Patrick PERRÉ, ICPEF, LERFoB, AgroParisTech Nancy	Directeur de thèse
M. Romain RÉMOND, Ingénieur de recherche, LERFoB, AgroParisTech Nancy	Co-encadrant de thèse

AgroParisTech
UMR 1092 AgroParisTech-INRA, Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois
14, rue Girardet – CS 14216 – 54042 Nancy cedex

Résumé

SÉCHAGE EN CONTINU DU BOIS ÉNERGIE COMME MOYEN DE PRÉCONDITIONNEMENT EN VUE DE SA CONVERSION THERMOCHIMIQUE : APPROCHES EXPÉRIMENTALE ET NUMÉRIQUE

Les voies sèches de valorisation du bois énergie sont de plus en plus exigeantes vis-à-vis de la qualité de la matière première et notamment quant à sa teneur en eau. Ainsi, une étape intermédiaire de préconditionnement, sur site industriel, tend à se développer. La mise en œuvre de séchoirs en continu est alors séduisante de par son faible coût et sa parfaite intégration dans la ligne de production. Cependant, elle n'est pas sans écueil : la variabilité de la biomasse et l'hétérogénéité des conditions climatiques au sein du séchoir rendent fastidieux le dimensionnement du séchoir et de la source de chaleur associée d'une part et la maximisation du flux matière d'autre part.
Notre étude a pour ambition de développer un outil informatique d'aide à la conception et à l'optimisation de séchoirs en continu traversés par un lit condensé de particules de bois. Pour y parvenir, nous associons une approche expérimentale et une approche numérique du procédé. La démarche scientifique s'articule autour de deux échelles représentatives :

- A l'échelle de la particule de bois, le modèle de Van Meel, reposant sur le concept de courbe caractéristique de séchage, est étendu : le couplage entre transferts de chaleur et de masse est rendu explicite. Nous disposons dès lors d'un modèle réactif et prédictif en conditions climatiques variables. Parallèlement, un premier dispositif expérimental original est conçu et construit pour l'étude du séchage de particules de bois isolées. Les données recueillies sont alors analysées en vue d'alimenter en paramètres et de valider le modèle semi-analytique ;
- A l'échelle du séchoir, une modélisation double-échelle est adoptée pour tenir compte de l'évolution des conditions climatiques. Un soin particulier est apporté à la modélisation, se voulant être la plus proche possible des installations existantes : à ce titre, les transferts au niveau de la paroi du séchoir sont pris en compte, ainsi que la variabilité des particules de bois. Parallèlement, un second dispositif expérimental original est conçu et construit pour l'étude du séchage de particules disposées en lit. Les données recueillies sont alors confrontées aux simulations du modèle double-échelle.

La validation du modèle s'étant révélée probante tant à l'échelle de la particule qu'à celle du séchoir, une utilisation du code pour l'aide à la conception et à l'optimisation d'installations industrielles a pu être envisagée. Ainsi, ce travail s'achève-t-il par deux études de cas à travers lesquelles nous explorons le potentiel du modèle pour maximiser le flux matière tout en garantissant la qualité du produit et l'efficacité énergétique du séchoir.

Mots clefs : *biomasse, bois énergie, préconditionnement, séchage, transferts couplés de chaleur et de masse, particule, courbe caractéristique de séchage, modélisation multi-échelle, étude expérimentale.*

Abstract

CONTINUOUS DRYING OF WOOD ENERGY AS A WAY OF PRECONDITIONING BEFORE ITS THERMOCHEMICAL CONVERSION: EXPERIMENTAL AND NUMERICAL APPROACHES

The dry conversion routes of wood to energy require more and more improvement in the quality of raw material, particularly regarding to its moisture content. That is why a preliminary step of preconditioning tends to be developed on the industrial sites. The use of continuous dryers is then tempting because of their low cost and their perfect integration in the production line. However it is not without pitfall: the climatic conditions heterogeneity inside the dryer, on the one hand, and the biomass variability, on the other hand, make the utilization of these industrial plants tedious.
Our study aims to develop a computing tool to help engineers optimizing and to designing continuous dryers passed through by a condensed bed of wood particles. For this result, an experimental approach of the process is associated to a numerical one. The scientific method revolves around two representative scales:

- At the wood particle scale, the Van Meel model, based on the concept of characteristic drying curve, is enhanced: the coupling between heat and mass transfer is made explicit. So we obtain a reactive model which is predictive when the climatic conditions are variable. Meanwhile, a first original experimental device is designed and built in order to study the drying of single wood particles. Thanks to the collected data, the semi-analytical model is provided with parameters and is validated;
- At the dryer scale, a dual-scale approach is chosen in order to take into account the evolution of the climatic conditions. A particular attention is paid to the modeling in order to make it as similar as possible to the existing installations: as such, the transfers at the wall surface and the variability of wood particles are included. Meanwhile, a second original experimental device is designed and built in order to study the drying of a wood particles stack. The data collected are then confronted with simulations of the double-scale model.

The validation of the model has proven to be convincing at the particle scale and at the dryer one. Therefore a utilization of the code to help in the design and optimization of industrial plants can be considered. Thus, the work ends by two case studies through which we explore the potential of the model to maximize material flow while ensuring product quality and efficiency of the dryer.

Keywords: *biomass, wood energy, preconditioning, drying, coupled heat and mass transfer, particle, characteristic drying curve, multiscale modeling, experimental study.*

Aux origines de la biomasse :

« 50 kilos de patates,
un sac de sciure de bois,
il te sortait 25 litres de 3 étoiles à l'alambic »

Francis Blanche dans le rôle de Maitre Folace
(Les Tontons Flingueurs, 1969)

A l'ENGREF
A la FIF
Au Pavillon Venet
Je dédie ce travail

Remerciements

Après plus de six années passées dans l'enceinte de l'ENGREF, dont quatre confiné entre les murs du Pavillon Venet, deux bilans s'imposent : le premier humain et le second scientifique. La science patientera encore quelques pages car, pour l'heure, est venu le temps des remerciements.

Mes premiers mots auraient pu être adressés à Patrick PERRÉ pour m'avoir accueilli au sein de son équipe de recherche, pour avoir su me faire confiance, pour m'avoir octroyé une quasi autonomie intellectuelle (les lois de la physique demeurant difficilement transgressables) et pour avoir développé une structure de recherche performante, capable de répondre à l'appétit féroce de ses thésards en matière d'équipements expérimentaux.

Cependant, je me permets d'entamer une démarche antihiérarchique car je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde reconnaissance envers Romain RÉMOND qui a partagé mon quotidien scientifique. Merci de m'avoir encadré et parfois recadré, merci pour ta disponibilité, merci d'avoir fait preuve d'une patience sans faille et, bien sûr, merci pour ta bonne humeur quotidienne.

Je n'oublierai jamais l'appui technique de Michel CONTAL, et Philippe JACQUIN pour la conception et la réalisation des dispositifs expérimentaux. Sans vous, mon manuscrit n'aurait probablement compté que deux chapitres et se serait intitulé « Séchage du bois énergie : approche numérique ». Sans vous je serais devenu un geek !

En outre, sans la force d'intervention de Jean-Claude MOSNIER et la finesse d'action de Patrice MARCHAL, le bon déroulement des essais expérimentaux n'aurait pas été possible. Merci à vous deux pour la qualité de votre travail et votre réactivité.

Evidemment, je me garderais bien d'oublier le soutien administratif proposé par Corinne MARTIN. Merci d'avoir simplifié mon quotidien en gérant le flot de commandes tout en réduisant les délais de livraison et d'avoir été à l'affut de mes obligations envers les diverses administrations.

Merci aux autres permanents de l'équipe de recherche – Madame HUBER, Xavier, Giana, Anis et Pin – d'avoir participé à mon éveil scientifique grâce à votre rigueur et votre décontraction.

Si j'avais voulu remercier nommément chacun des thésards rencontrés pendant ces années, je n'aurais pu garantir l'exhaustivité de cette liste. De plus, j'aurais été dans l'obligation de m'exprimer en une douzaine de langue. Ainsi, je me limiterai donc à ces quelques mots : merci à vous tous, d'ici et d'en face, pour les moments d'entraide et de détente.

Evidemment, merci Patrick d'avoir rassemblé ces personnes autour de vous. Je m'estime très chanceux d'avoir pu en faire partie.

Je tiens également à adresser mes sincères remerciements à l'ensemble des membres du jury de thèse, Gérard ANTONINI pour avoir accepté de présider cette assemblée, Gérald DEBENEST et Roman PECZALSKI pour le temps consacré à l'examen de ce manuscrit et Christian MOYNE pour son implication en qualité d'examinateur.

Enfin et surtout, merci à toutes les personnes de mon entourage, famille, amis et plus si affinités, qui m'ont accompagnées, soutenues et aidées pendant cette période. Je pense, particulièrement à Bruno et aux deux Mathilde pour les nombreuses heures consacrées à la traque des fautes de Français. Et je ne remercierai jamais assez Laetitia pour la patience dont elle a fait preuve au cours des quatre derniers mois et mes trois rations quotidienne de Chocapic©.

Avertissements

Afin de faciliter la lecture de ce manuscrit, il est utile pour le lecteur de bien prendre connaissance du succinct lexique qui suit :

Condensation : changement d'état d'un corps initialement gazeux (dilué) à l'état liquide (condensé), utilisé à la place du terme rigoureux (liquéfaction) conformément à un abus de langage largement répandu.

Particule : toute entité solide, en bois, considérée dans le cadre de notre étude, non divisée jusqu'à la fin du séchage ; sa géométrie et sa taille ne sont pas *a priori* définies : il peut tout aussi bien s'agir d'une entité de taille modeste, telle qu'une plaquette forestière, ou non, une bûche par exemple.

Température de surface : moyenne de la température sur toutes les surfaces d'échange de la particule.

Température moyenne : moyenne de la température sur tout le volume de la particule.

Teneur en eau : teneur en eau sur base sèche.

Sommaire

Résumé ... 2
Abstract ... 3
Remerciements ... 7
Avertissements ... 9
Sommaire ... 10
Table des illustrations ... 15
Table des tableaux ... 19
Notations ... 20
Constantes ... 23
Abréviations ... 24
Introduction générale ... 27
Chapitre 1 : Réduction de la teneur en eau du bois en vue de sa valorisation énergétique : un préconditionnement nécessaire ... 31
Introduction du chapitre 1 ... 33
I : Valorisation énergétique du bois ... 33
I-1 : Importance stratégique du bois énergie ... 33
I-1-1 : Contexte favorable au développement des EnR ... 33
I-1-1-1 : Ecueils liés à l'utilisation des énergies fossiles ... 33
I-1-1-2 : Engagements d'utilisation des EnR ... 34
I-1-2 : Développement des bioénergies : nécessité de capter, stocker et distribuer l'énergie solaire ... 35
I-1-3 : Intérêt de la biomasse forestière ... 36
I-1-3-1 : Enseignements de la première génération de biocarburants ... 36
I-1-3-2 : Mise en œuvre de la biomasse lignocellulosique ... 37
I-1-3-3 : Bois énergie : une biomasse lignocellulosique de choix ... 37
I-1-4 : Limites à l'exploitation de la biomasse forestière ... 38
I-2 : Modes de valorisation énergétique ... 39
I-2-1 : Le feu : d'*Homo erectus* à nos jours ... 39
I-2-1-1 : Combustion du bois de feu ... 39
I-2-1-2 : Le charbon de bois : un concentré énergétique au fort pouvoir réducteur ... 40
I-2-2 : Biogaz et biocarburants ... 42
I-2-2-1 : Conversion par voie humide : l'éthanol cellulosique ... 42
I-2-2-2 : Conversion par voie sèche ... 42
I-2-2-2-a : Gazéification ... 43
I-2-2-2-b : Liquéfaction ... 44
I-3 : Influence de la teneur en eau de la matière première ... 45
I-3-1 : Choix du procédé de conversion thermochimique ... 45
I-3-2 : Dégradation de l'efficience du procédé ... 45
I-3-2-1 : Diminution du pouvoir calorifique ... 45
I-3-2-2 : Altération de la qualité des produits et endommagement des réacteurs ... 46
I-3-3 : Exemple de teneur en eau préconisée en vue de la conversion thermochimique du bois ... 46
I-3-4 : Importance du séchage ... 47
I-3-4-1 : Nécessité de réduire la teneur en eau de la biomasse forestière ... 47
I-3-4-2 : Autres avantages du séchage vis-à-vis de la conversion thermochimique de la biomasse forestière ... 47
II : Principales caractéristiques du bois vis-à-vis de ses interactions avec l'eau ... 48
II-1 : De la molécule à l'arbre, description multi-échelle du bois ... 48
II-1-1 : Propriétés et proportion des macro-polymères dans la paroi végétale lignifiée ... 49
II-1-1-1 : Cellulose ... 50
II-1-1-2 : Hémicelluloses ... 50
II-1-1-3 : Lignines ... 51
II-1-2 : Observation microscopique des tissus du bois ... 51
II-1-3 : Orientation dans le billon et anisotropie des propriétés du bois ... 53
II-2 : L'eau dans le bois ... 54
II-2-1 : Localisation de l'eau dans le bois ... 54

II-2-1-1 : Porosité du bois et eau libre 54
II-2-1-2 : Hygroscopicité de la paroi végétale et eau liée 54
II-2-2 : Teneur en eau du bois 55
II-2-2-1 : Teneur en eau 55
II-2-2-2 : Point de Saturation des Fibres 55
II-2-2-3 : Teneur en eau d'équilibre 56
II-3 : Echanges d'eau entre le bois et son environnement 57
II-3-1 : Mode de transferts de l'eau 57
II-3-1-1 : Transferts de masse internes 57
II-3-1-1-a : Migration d'eau libre 57
II-3-1-1-b : Migration d'eau liée 57
II-3-1-1-c : Migration de vapeur 57
II-3-1-2 : Transferts de masse externes 58
II-3-2 : Influence du retrait et des fentes sur la surface d'échange 58
III : Utilisation des séchoirs en continu pour le préconditionnement de la biomasse lignocellulosique 58
III-1 : Diversité des modes de préconditionnement et intérêt du séchage 59
III-1-1 : Description générale des modes de préconditionnement 59
III-1-2 : Comparaison des types de séchoir et critères de choix 60
III-1-2-1 : Séchoir rotatif 60
III-1-2-2 : Séchoir à lit fluidisé 61
III-1-2-3 : Séchoir à lit fixe mobile 62
III-1-2-4 : Séchoir tunnel 63
III-2 : Conception et optimisation des séchoirs en continu 64
III-2-1 : Complexité liée au séchage en continu du bois énergie 64
III-2-2 : Outils d'aide à la conception et à l'optimisation de séchoirs 64
III-2-2-1 : Abaques et retour sur expérience 64
III-2-2-2 : Prédiction des cinétiques de séchage par la modélisation 64
III-2-2-2-a : À l'échelle de la particule 64
– Méthodes numériques 64
– Méthodes analytiques 65
III-2-2-2-b : À l'échelle du séchoir 66
– Logiciels commerciaux et codes ouverts 66
– Intérêt d'une approche multi-échelle 66
Conclusion du chapitre 1 67
Chapitre 2 : Etude du séchage de particules isolées 69
Introduction du chapitre 2 71
I : Description du modèle de Van Meel étendu 71
I-1 : Modèle original de Van Meel 71
I-1-1 : Formulation 71
I-1-1-1 : Utilisation des courbes caractéristiques de séchage 72
I-1-1-2 : Notion de teneur en eau adimensionnelle et critique 72
I-1-2 : Intérêt et limites du modèle original 73
I-2 : Amélioration du modèle original : couplage explicite entre transferts de chaleur et de masse 73
I-2-1 : Formulation du modèle non simplifié 73
I-2-1-1 : Equation de conservation de la masse 74
I-2-1-1-a : À basse température 74
I-2-1-1-b : Description de l'activité de surface 74
I-2-1-1-c : Généralisation à une gamme de conditions plus larges 75
I-2-1-2 : Equation de conservation de la chaleur 75
I-2-2 : Simplification du modèle 75
I-2-2-1 : Hypothèse de l'homogénéité des paramètres du bois et de l'air 75
I-2-2-2 : Intérêt, limite et alternative à l'hypothèse 76
I-2-3 : Résolution numérique du système 76
II : Identification des paramètres du modèle à partir de cinétiques expérimentales de séchage 77
II-1 : Obtention des cinétiques expérimentales 77
II-1-1 : Matériel végétal 78
II-1-1-1 : Planchettes de hêtre 78
II-1-1-1-a : Contexte local 78
II-1-1-1-b : Préparation des échantillons 78

II-1-1-2 : Billons d'eucalyptus 80
II-1-1-2-a : Contexte « exotique » 80
II-1-1-2-b : Préparation des échantillons 81
II-1-2 : Description du dispositif expérimental 82
II-1-2-1 : Réacteur expérimental 83
II-1-2-1-a : Enceinte climatique 83
II-1-2-1-b : Injection de gaz et composition de l'atmosphère 85
II-1-2-2 : Instrumentation de l'échantillon 86
II-1-2-2-a : Suivi de la perte de masse 86
II-1-2-2-b : Mesure de la température 87
– Au moyen de thermocouples 87
– Au moyen d'un pyromètre 89
II-1-2-3 : Contrôle du réacteur et enregistrement des données expérimentales 91
II-1-2-4 : Modes d'utilisation du dispositif expérimental 92
II-1-2-4-a : Séchage à température constante 92
II-1-2-4-b : Utilisations alternatives 93
II-1-3 : Exemples de cinétiques de séchage et études de paramètres influents 93
II-1-3-1 : Effet de la teneur en eau initiale 93
II-1-3-2 : Effet des dimensions de l'échantillon 95
II-1-3-2-a : Influence de la longueur 95
II-1-3-2-b : Influence de l'épaisseur 95
II-1-3-3 : Effet de la température 96
II-1-3-1 : Autres facteurs influant 97
II-2 : Détermination des coefficients de transferts externes 97
II-2-1 : Utilisation de la première phase de séchage 97
II-2-2 : Valeurs identifiées des coefficients 100
II-3 : Détermination des paramètres du modèle : a et X_{cr} 100
II-3-1 : Identification de l'activité expérimentale 100
II-3-2 : Choix de l'expression de l'activité de surface 101
II-3-3 : Optimisation des paramètres de la courbe 101
II-3-3-1 : Minimisation de la fonction objectif 101
II-3-3-2 : Valeurs des paramètres optimisés 103
III : Validation du modèle de Van Meel étendu 104
III-1 : A température constante 104
III-1-1 : Cinétiques de séchage expérimentale et numériques 104
III-1-2 : Validité des modèles 105
III-2 : En conditions climatiques variables : comparaison avec cinétiques issues simulation par *TransPore* 3-D 105
III-2-1 : Utilisation de TransPore pour obtenir de cinétiques *témoin* en conditions climatiques variables 106
III-2-1-1 : Confrontation des simulations de *TransPore* avec l'expérience 106
III-2-1-2 : Cinétiques obtenues 108
III-2-2 : Confrontation des résultats de simulation 108
III-2-2-1 : Validité du modèle de Van Meel étendu 108
III-2-2-2 : Pertinence de l'extension du modèle de Van Meel 110
Conclusion du chapitre 2 111
Chapitre 3 : De la particule au lit de particules : modélisation multi-échelle 113
Introduction du chapitre 3 115
I : Modélisation numérique du séchage d'un lit de particules dans un séchoir 115
I-1 : Description générique des phénomènes de transfert 116
I-1-1 : Couplage entre modèles local et global 116
I-1-2 : Mise en équation à l'échelle du séchoir 116
I-1-2-1 : Equations de conservation de masse 117
I-1-2-2 : Equations de conservation de chaleur 118
I-1-2-3 : Prise en compte des transferts au niveau de la paroi 119
I-1-3 : Déplacement du lit de particules : d'un mouvement continu à un mouvement saltatoire 119
I-2 : Discrétisation spatiale : imbrication de différents niveaux de description 120
I-2-1 : Volume de contrôle 121
I-2-2 : Module 122

I-2-3 : Méta-module ... 122
I-2-4 : Séchoir ... 122
I-3 : Prédiction des profils d'humidité relative et température d'air à partir des flux de chaleur et de masse au sein du séchoir ... 123
I-3-1 : Flux de chaleur et de masse entre l'air et les particules ... 124
I-3-1-1 : Description du lit de particules ... 124
I-3-1-1-a : Disposition des particules au sein du lit ... 124
I-3-1-1-b : Déplacement du lit ... 125
I-3-1-1-c : Aéraulique au sein du lit ... 125
I-3-1-1-a : Simulation de la variabilité des particules ... 125
I-3-1-2 : Equations de conservation au niveau du lit de particules de bois ... 126
I-3-2 : Flux de chaleur et de masse entre l'air et la paroi du séchoir ... 126
I-3-2-1 : Description de l'enveloppe du séchoir et des hypothèses associées ... 126
I-3-2-2 : Comportement de la paroi lors du séchage ... 127
I-3-2-3 : Equations de conservation au niveau de la paroi ... 128
I-3-2-3-a : En régime permanent ... 129
– Conservation de la masse (sur la face interne de la paroi) ... 129
– Conservation de la chaleur ... 129
– Résolution du système d'équations (sur les deux faces de la paroi) ... 129
I-3-2-3-b : En régime quasi permanent ... 130
– Conservation de la masse ... 130
– Conservation de la chaleur ... 130
– Résolution du système d'équations ... 131
I-3-3 : Prédiction de l'évolution spatiale des paramètres de l'écoulement d'air ... 132
I-3-3-1 : Bilan sur la masse d'air au sein d'un volume de contrôle ... 132
I-3-3-2 : Résolution des équations de conservation sur la masse d'air ... 133
I-4 : Programmation du modèle global et exécution du programme ... 134
II : Etude expérimentale du séchage d'un lit de particules ... 136
II-1 : Matériel végétal ... 136
II-1-1 : Approvisionnement en bois ... 136
II-1-2 : Production des plaquettes forestières ... 136
II-1-3 : Caractéristiques des plaquettes ... 137
II-2 : Description du dispositif expérimental ... 137
II-2-1 : Réacteur ... 138
II-2-1-1 : Enceinte de séchage ... 138
II-2-1-2 : Injection de l'air ... 139
II-2-1-3 : Chauffage de l'air et régulation de la température ... 140
II-2-1-4 : Suivi de la consommation énergétique du séchoir ... 141
II-2-1-5 : Mesure de l'humidité relative de l'air à l'attaque du lit fixe ... 141
II-2-1-6 : Détermination de la vitesse d'air ... 141
II-2-2 : Instrumentation du lit fixe de bois ... 143
II-2-2-1 : Suivi des paramètres de l'air ... 144
II-2-2-1-a : Profil d'humidité relative ... 144
II-2-2-1-b : Profil de température ... 144
II-2-2-1-c : Pertes de charge ... 144
II-2-2-2 : Suivi des paramètres du bois ... 144
II-2-2-2-a : Profil de température ... 144
II-2-2-2-b : Profil de teneur en eau ... 145
II-2-3 : Chaine d'acquisition ... 145
II-3 : Conditions expérimentales ... 146
II-4 : Résultats expérimentaux : analyse et interprétations ... 146
II-4-1 : Températures de l'air et du bois ... 147
II-4-2 : Humidité relative de l'air ... 149
II-4-3 : Teneur en eau du bois (à partir de sa résistance) ... 150
III : Validation du modèle global ... 151
III-1 : Modélisation de la configuration expérimentale ... 151
III-1-1 : Réacteur ... 151
III-1-2 : Conditions climatiques de séchage ... 152
III-1-2-1 : A l'attaque du lit fixe ... 152

III-1-2-2 : A l'extérieur du réacteur 152
III-1-3 : Matériel végétal 153
III-2 : Analyse qualitative des résultats numériques 154
III-2-1 : Conditions climatiques 155
III-2-2 : Paramètres du bois 156
III-2-2-1 : Teneur en eau 156
III-2-2-2 : Température 157
III-3 : Analyse quantitative des résultats numériques 158
III-3-1 : Dans le cas où la vitesse d'air est faible (essai à 75 °C) 159
III-3-1-1 : Evolution des conditions climatiques le long du lit fixe 159
III-3-1-2 : Evolution des grandeurs au sein du bois 160
III-3-2 : Dans le cas où la vitesse d'air est élevée (essai à 35 °C) 161
Conclusion du chapitre 3 164
Chapitre 4 : Utilisation du nouvel outil numérique pour la conception ou l'optimisation de séchoirs industriels 165
Introduction du chapitre 4 167
I : Aide à l'optimisation, exemple d'un séchoir à lit fixe mobile 167
I-1 : Description du système 168
I-1-1 : Séchoir et lit 168
I-1-2 : Source de chaleur 168
I-1-3 : Matériel végétal 169
I-2 : Simulation du séchage dans la configuration non optimisée 169
I-3 : Recherche par le modèle des solutions techniques à retenir pour l'optimisation du séchoir existant 171
I-3-1 : Réduction de la vitesse du lit 171
I-3-2 : Isolation de l'enveloppe du séchoir 171
I-3-3 : Influence du calibre des particules 174
I-3-4 : Source de chaleur additionnelle 177
II : Aide à la conception, exemple d'un séchoir à lit entrainé 177
II-1 : Description du système 178
II-1-1 : Source de chaleur 178
II-1-2 : Matériel végétal 178
II-1-3 : Séchoir et lit 179
II-1-4 : Paramètres ajustables du système 179
II-2 : Recherche par le modèle des solutions techniques à retenir pour la conception du nouveau séchoir180
II-2-1 : Optimisation de la teneur en eau moyenne du lit à la sortie de séchoirs en échappement libre 180
II-2-1-1 : Configurations aérauliques simples 180
II-2-1-2 : Configurations aérauliques mixtes 182
II-2-1-2-a : Ajustement de la longueur relative des modules 183
II-2-1-2-b : Ajustement de la répartition du débit d'air chaud dans les modules 185
II-2-1-3 : Bilan sur les séchoirs à échappement libre 186
II-2-2 : Intérêt du recyclage partiel de l'air 186
II-2-3 : Optimisation de l'hétérogénéité de la teneur en eau finale 190
II-2-4 : Sensibilité aux variations de teneur en eau moyenne initiale 192
Conclusion du chapitre 4 192
Conclusions générales et perspectives 193
Annexes 199
Annexe I Présentation du code de simulation *TransPore* 201
Annexe II Conservation de la chaleur à l'échelle de la particule 205
Annexe III Evaluation de la différence entre les températures moyenne et de surface de la particule 207
Annexe IV Cinétiques expérimentales recueillies par séchage de planchettes de hêtre 213
Annexe V Cinétiques expérimentales recueillies par séchage de billons d'eucalyptus 221
Annexe VI Mise en œuvre du modèle original de Van Meel 227
Annexe VII Estimation des pertes de charges à travers un milieu granulaire par l'équation d'Ergun 229
Bibliographie 231

Table des illustrations

Figure 1 : Voiture à gazogène (Das Bundesarchiv, 1946) 29
Figure 2 : Cycle du carbone (Bourque, 2010 d'après Berner et Berner, 1996 ; Kump *et al.*, 1999) 34
Figure 3 : Consommation d'énergie primaire en France, corrigée du climat (Commissariat général du développement durable, 2010) 35
Figure 4 : Production d'EnR par filière en France en 2009 (Commissariat général du développement durable, 2010) 36
Figure 5 : Meule de carbonisation traditionnelle (Ledebur, 1895) 40
Figure 6 : Fours de carbonisation industriels. À droite : four batch (photo Perré, 2009). À gauche : tour de carbonisation de type Lambiotte (BaltCarbon) 41
Figure 7 : Réaction de dégradation de la biomasse lors de la gazéification autothermique (Deglise et Donnot, 2004) 43
Figure 8 : Réactions de méthanation (Waldner et Vogel, 2005) 43
Figure 9 : Synthèse de Fischer-Tropsch (Broust *et al.*, 2008) 43
Figure 10 : Influence de la teneur en eau du bois sur le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) (d'après Rogaume, 2005a) 46
Figure 11 : Structure hiérarchisée du bois (Copyright University of Canterbury, 1996. Artwork by Mark Harrington) 48
Figure 12 : Structure multi-lamellaire de la paroi végétale 49
Figure 13 : La cellulose, une succession de cellobioses liés en β(1→4) (Mohan *et al.*, 2006) 50
Figure 14 : Unités précurseurs des lignines (Mohan *et al.*, 2006) 51
Figure 15 : Coupe transversale de hêtre (*Fagus sylvatica* L.) observée au microscope électronique (cliché ESEM Huber, 2004) 51
Figure 16 : Coupe transversale de gommier bleu (*Eucalyptus globulus*) observée au microscope électronique (cliché ESEM Redman, 2010) 52
Figure 17 : Directions et plans d'étude du bois (Guiatrd, 1987) 53
Figure 18 : Variations de la quantité d'eau libre lors du séchage (de gauche à droite) de l'épicéa commun (*Picea abies* L.) observées au microscope électronique (clichés ESEM Perré, 2003) 54
Figure 19 : Isothermes de sorption du bois (Jodin, 1994 d'après Keylwerth, 1969 et Joly et More-Chevalier, 1980) 56
Figure 20 : Différence d'épaisseur des parois des cellules du bois du sapin pectiné (*Abies alba* M.) au psf, à gauche, et sec à l'air, à droite (clichés ESEM Huber, 2004) 58
Figure 21 : Séchoir rotatif direct (Perry et Chilton, 1973) 60
Figure 22 : Séchoir à lit fluidisé (d'après Mujumdar, 2007) 61
Figure 23 : Séchoir tunnel *type* en configuration contre-courant (d'après Mujumdar, 2007) 63
Figure 24 : Evolution *type* de la vitesse de séchage (valeur absolue) 71
Figure 25 : Exemples de comportements de séchage lors de la seconde phase 72
Figure 26 : Flux de chaleur et de masse à la surface de la particule 73
Figure 27 : Débit du billon de hêtre 78
Figure 28 : Taillis à courte révolution d'eucalyptus (6 ans) 80
Figure 29 : Augmentation des surfaces de plantation d'eucalyptus au Brésil (ABRAF, 2010) 80
Figure 30 : Dispositif d'étude expérimentale du séchage de articules isolées 82
Figure 31 : Schéma du réacteur 83
Figure 32 : Schéma de principe de la mesure de la température du bulbe humide 84
Figure 33 : Schéma d'instrumentation de l'échantillon 86
Figure 34 : Détail du système de pesée 86
Figure 35 : Implantation étanche d'un thermocouple dans un billon d'eucalyptus 88
Figure 36 : Fentes d'un billon d'eucalyptus séché à 160 °C 88
Figure 37 : Schéma d'implantation des thermocouples 89
Figure 38 : Capteur et conditionneur de signal du pyromètre 89
Figure 39 : Système de maintien de la température du pyromètre : (a) boitier fermé contenant le capteur, (b) régulateur et sécurité thermique, (c) éclaté du boitier. 90
Figure 40 : Fenêtre d'exécution du programme *Séchage.exe* de commande et d'acquisition 92
Figure 41 : Evolution temporelle des paramètres de l'air lors du séchage d'une planchette de hêtre saturée en eau (100(R) × 10(T) × 160(L) mm) 92
Figure 42 : Influence de la teneur en eau initiale sur la cinétique de séchage à 60°C (longueur des échantillons = 80 mm ; épaisseur des échantillons = 10 mm) 93
Figure 43 : Influence des dimensions d'échantillons initialement saturés sur la cinétique de séchage à 120°C ... 95

Figure 44 : Influence de la température sur la cinétique de séchage d'échantillons initialement saturés (longueur des échantillons = 80 mm ; épaisseur des échantillons = 10 mm) 96
Figure 45 : Dispositifs *témoin* utilisés pour déterminer h_c et h_m dans le cas d'une planchette (a) et celui d'un billon (b)..... 99
Figure 46 : Activité adimensionnelle expérimentale pour des planchettes saturées (80×10×100 mm) 101
Figure 47 : Surface du trapèze formé par deux couples de points successifs..... 102
Figure 48 : Superposition des activités adimensionnelles théoriques et expérimentales pour une planchette de hêtre (80×10×100 mm) à 60 °C 103
Figure 49 : Comparaison des cinétiques de séchage à 60 °C pour une planchette de hêtre (80×10×100 mm) ... 104
Figure 50 : Evolution spatiales des conditions climatiques dans un séchoir tunnel à co-courant (*p-f*) et contre-courant (*c-f*)..... 105
Figure 51 : Cinétiques expérimentale (*exp*) et numérique (*T3D*) de séchage à 60 °C pour une planchette de hêtre (80×10×100 mm) 107
Figure 52 : Cinétiques expérimentale (*exp*) et numérique (*T3D*) de séchage à 120 °C pour une planchette de hêtre (80×10×100 mm) 107
Figure 53 : Prédictions par *TransPore* 3-D de cinétiques de séchage d'une planchette de hêtre (80×10×100 mm) soumise aux conditions climatiques observées dans un séchoir tunnel, en co-courant (*p-f*) et contre-courant (*c-f*) 108
Figure 54 : Comparaison des prédictions de cinétiques de séchage en contre-courant d'une planchette de hêtre (80×10×100 mm) par *TransPore* 3-D (*T3D*) et le modèle de Van Meel étendu (*VMé*)..... 109
Figure 55 : Comparaion des prédictions de cinétiques de séchage en co-courant d'une planchette de hêtre (80×10×100 mm) par *TransPore* 3-D (*T3D*) et le modèle de Van Meel étendu (*VMé*)..... 109
Figure 56 : Comparaion des prédictions de cinétiques de séchage en co-courant (*p-f*) ou en contre-courant (*c-f*) d'une planchette de hêtre (80×10×100 mm) par *TransPore* 3-D (*T3D*) et le modèle original de Van Meel (*VMo*) 110
Figure 57 : Comparaion de cinétiques de séchage à 120 °C et 13 % d'humidité relative d'une planchette de hêtre (80×10×100 mm) préditent par *TransPore* 3-D (*T3D*) et les modèles de Van Meel, original (*VMo*) et étendu (*VMé*) 110
Figure 58 : Dialogue entre les échelles *particule* et *séchoir*..... 116
Figure 59 : Flux de chaleur et de masse entre le lit de bois et l'écoulement d'air, exemple d'un séchoir à lit entrainé..... 116
Figure 60 : Schéma de discrétisation d'un séchoir à lit entrainé en *N* volume de contrôle (CV)..... 121
Figure 61 : Schéma de délimitation des modules et des métamodules le long du séchoir tunnel 121
Figure 62 : Flux de chaleur et de masse au sein d'un volume de contrôle pour un séchoir tunnel 123
Figure 63 : Flux de chaleur et de masse au sein d'un volume de contrôle pour un séchoir à lit fixe mobile 123
Figure 64 : Section d'un tunnel de séchage..... 124
Figure 65 : Profil linéaire de la température à travers une paroi homogène..... 128
Figure 66 : Diagramme de résolution des équations de *Wood_online_drying* 135
Figure 67 : Chantier de production de plaquettes forestières par *FBV Energie Bois* 136
Figure 68 : Dispositif d'étude expérimentale du séchage d'un lit fixe de particules de bois 137
Figure 69 : Schéma de principe du dispositif d'étude du séchage en lit fixe 138
Figure 70 : Alimentation en air extérieur du réacteur 139
Figure 71 : Système de chauffage et de brassage de l'air..... 140
Figure 72 : Prise de pression statique..... 141
Figure 73 : Vélocimètre : sonde à fil chaud à gauche et transmetteur à droite..... 142
Figure 74 : Passages de paroi pour instrumenter le lit fixe 143
Figure 75 : Instrumentation des plaquettes : mesure de la température (à gauche) et de la résistance électrique du bois (à droite) 144
Figure 76 : Evolution de la résistance du bois au cours du séchage obtenu lors d'essais préliminaires sur des planchettes de hêtre (80×10×100 mm)..... 145
Figure 77 : Evolution temporelle des profils de températures (air et bois) lors du séchage du lit fixe de plaquettes à 75 °C 147
Figure 78 : Evolution temporelle des profils de températures (air et bois) lors du séchage du lit fixe de plaquettes à 35 °C 147
Figure 79 : Evolution temporelle du profil d'humidité relative lors du séchage du lit fixe de plaquettes à 75 °C 149
Figure 80 : Evolution temporelle du profil d'humidité relative lors du séchage du lit fixe de plaquettes à 35 °C 149
Figure 81 : Evolution temporelle de la résistance du bois le long du lit fixe de lors du séchage à 75 °C 150
Figure 82 : Evolution temporelle de la résistance du bois le long du lit fixe de lors du séchage à 35 °C 151

Figure 83 : Cinétiques de séchage de plaquettes forestières de hêtre simulées par *TransPore* 154
Figure 84 : Profil de conditions climatiques simulé pour le séchage du lit fixe de plaquettes forestières à 75 °C 155
Figure 85 : Profil de conditions climatiques simulé pour le séchage du lit fixe de plaquettes forestières à 35 °C 155
Figure 86 : Evolution du profil de teneur en eau des particules se situant au niveau des quatre positions de mesure le long du lit fixe de plaquettes forestières séché à 75 °C 156
Figure 87 : Evolution du profil de teneur en eau des particules se situant au niveau des quatre positions de mesure le long du lit fixe de plaquettes forestières séché à 35 °C 156
Figure 88 : Evolution du profil de température des particules se situant au niveau des quatre positions de mesure le long du lit fixe de plaquettes forestières séché à 75 °C 157
Figure 89 : Evolution du profil de température des particules se situant au niveau des quatre positions de mesure le long du lit fixe de plaquettes forestières séché à 35 °C 158
Figure 90 : Profils de température d'air obtenus expérimentalement et numériquement pour une vitesse d'air faible 159
Figure 91 : Profils d'humidité relative obtenus expérimentalement et numériquement pour une vitesse d'air faible 159
Figure 92 : Suivi expérimental et numérique de la teneur en eau du bois pour une vitesse d'air faible 160
Figure 93 : Evolution de la température du bois au niveau des quatre positions de mesure le long du lit fixe pour une vitesse d'air faible 161
Figure 94 : Evolution de la température de l'air au niveau des quatre positions de mesure le long du lit fixe pour une vitesse d'air élevée 162
Figure 95 : Evolution de l'humidité relative au niveau des quatre positions de mesure le long du lit fixe pour une vitesse d'air élevée 162
Figure 96 : Suivi expérimental et numérique de la teneur en eau du bois pour une vitesse d'air élevée 163
Figure 97 : Evolution de la température du bois au niveau des quatre positions de mesure le long du lit fixe pour une vitesse d'air élevée 163
Figure 98 : Description schématique du séchoir à lit fixe mobile utilisé 168
Figure 99 : Evolution de la teneur en eau simulée pour la configuration initiale 170
Figure 100 : Profil des conditions climatiques simulées pour la configuration initiale 170
Figure 101 : Evolution de la teneur en eau simulée pour une vitesse de lit égale à 0,21 $m.h^{-1}$ 171
Figure 102 : Simulation du bénéfice de l'isolation de la paroi du séchoir sur la cinétique de séchage 173
Figure 103 : Simulation du bénéfice de la réduction de calibre des plaquettes forestières sur la cinétique de séchage 175
Figure 104 : Profil des conditions climatiques simulées lors du séchage d'un lit de petites plaquettes forestières circulant à une vitesse de 0,64 $m.h^{-1}$ 175
Figure 105 : Evolution de la teneur en eau des petites plaquettes simulée pour une vitesse de lit égale à 0,40 $m.h^{-1}$ 176
Figure 106 : Description schématique du séchoir tunnel utilisé 178
Figure 107 : Configurations aérauliques simples ; co-courant à gauche et contre-courant à droite 180
Figure 108 : Evolution simulée de la teneur en eau moyenne du lit le long de séchoirs à configurations aérauliques simples dont les longueurs sont optimisées 181
Figure 109 : Configurations aérauliques mixtes ; co-courant puis contre-courant (*p-f* + *c-f*) à gauche et contre-courant puis co-courant (*c-f* + *p-f*) à droite 182
Figure 110 : Evolution simulée de la teneur en eau moyenne du lit le long de séchoirs à configurations aérauliques mixtes dont les longueurs sont optimisées 183
Figure 111 : Définition schématique de la limite des modules d'une configuration aéraulique appliquée à un séchoir tunnel 183
Figure 112 : Influence des longueurs relatives des modules sur la longueur optimisée d'un tunnel à configuration *p-f* + *c-f* 184
Figure 113 : Influence des longueurs relatives des modules sur la longueur optimisée d'un tunnel à configuration *c-f* + *p-f* 184
Figure 114 : Influence de la répartition du débit d'air chaud dans les modules sur la longueur optimisée d'un tunnel à configuration *p-f* + *c-f* 185
Figure 115 : Influence de la répartition du débit d'air chaud dans les modules sur la longueur optimisée d'un tunnel à configuration *c-f* + *p-f* 185
Figure 116 : Représentation schématique du système de recyclage d'air 186
Figure 117 : Influence du taux de recyclage des gaz évacués sur la longueur optimisée d'un tunnel en configuration co-courant 187

Figure 118 : Influence du taux de recyclage des gaz évacués sur la longueur optimisée d'un tunnel en configuration contre-courant 188
Figure 119 : Influence du taux de recyclage des gaz évacués sur la longueur optimisée d'un tunnel à configuration *p-f* + *c-f* 188
Figure 120 : Influence du taux de recyclage des gaz évacués sur la longueur optimisée d'un tunnel à configuration *c-f* + *p-f* 189
Figure 121 : Réduction insuffisante de l'hétérogénéité de teneur en eau par le séchoir choisi 190
Figure 122 : Longueur de séchoir en configuration contre-courant optimisée pour la réduction de l'hétérogénéité de la teneur en eau du lit 191
Figure 123 : Longueur de séchoir en configuration co-courant optimisée pour la réduction de l'hétérogénéité de la teneur en eau du lit 191
Figure 124 : Volume élémentaire représentatif du milieu poreux (d'après Perré, 2007a) 201
Figure 125 : Condition d'existence du volume élémentaire représentatif : L>r>l (d'après Jodin, 1994)..... 202
Figure 126 : Caractéristique du volume de contrôle utilisé dans la résolution numérique 1-D et 2-D..... 202
Figure 127 : Diagramme de résolution des équations de *TransPore*..... 204
Figure 128 : Comportement thermique d'une pièce de bois soumise à un créneau de température 208
Figure 129 : Elément de Kelvin 208
Figure 130 : Réponse de l'élément de Kelvin à une contrainte constante 209
Figure 131 : Réponse d'un élément de Kelvin à une contrainte en créneau 209
Figure 132 : Influence de la teneur en eau initiale sur la cinétique de séchage à 60°C (longueur des échantillons = 80 mm ; épaisseur des échantillons = 5 mm) 213
Figure 133 : Influence de la teneur en eau initiale sur la cinétique de séchage à 120°C (longueur des échantillons = 80 mm ; épaisseur des échantillons = 5 mm) 213
Figure 134 : Influence de la teneur en eau initiale sur la cinétique de séchage à 60°C (longueur des échantillons = 80 mm ; épaisseur des échantillons = 10 mm) 214
Figure 135 : Influence de la teneur en eau initiale sur la cinétique de séchage à 120°C (longueur des échantillons = 80 mm ; épaisseur des échantillons = 10 mm) 214
Figure 136 : Influence des dimensions d'échantillons initialement saturés sur la cinétique de séchage à 60°C. 215
Figure 137 : Influence des dimensions d'échantillons initialement saturés sur la cinétique de séchage à 120°C215
Figure 138 : Influence des dimensions d'échantillons initialement non saturés sur la cinétique de séchage à 60°C 216
Figure 139 : Influence des dimensions d'échantillons initialement non saturés sur la cinétique de séchage à 120°C 216
Figure 140 : Influence de la température sur la cinétique de séchage d'échantillons initialement saturés (longueur des échantillons = 80 mm ; épaisseur des échantillons = 5 mm) 217
Figure 141 : Influence de la température sur la cinétique de séchage d'échantillons initialement saturés (longueur des échantillons = 80 mm ; épaisseur des échantillons = 10 mm) 217
Figure 142 : Influence de la température sur la cinétique de séchage d'échantillons initialement saturés (longueur des échantillons = 160 mm ; épaisseur des échantillons = 5 mm) 218
Figure 143 : Influence de la température sur la cinétique de séchage d'échantillons initialement saturés (longueur des échantillons = 160 mm ; épaisseur des échantillons = 10 mm) 218
Figure 144 : Influence de la température sur la cinétique de séchage d'échantillons initialement non saturés (longueur des échantillons = 80 mm ; épaisseur des échantillons = 5 mm) 219
Figure 145 : Influence de la température sur la cinétique de séchage d'échantillons initialement non saturés (longueur des échantillons = 80 mm ; épaisseur des échantillons = 10 mm) 219
Figure 146 : Influence de la température sur la cinétique de séchage d'échantillons initialement non saturés (longueur des échantillons = 320 mm ; épaisseur des échantillons = 5 mm) 220
Figure 147 : Influence de la température sur la cinétique de séchage d'échantillons initialement non saturés (longueur des échantillons = 320 mm ; épaisseur des échantillons = 10 mm) 220
Figure 148 : Géométries d'échantillons utilisés pour l'étude du séchage de billons isolés d'eucalyptus 221
Figure 149 : Cinétiques expérimentales de séchage obtenues pour les billons entiers n°1 et 2 222
Figure 150 : Cinétiques expérimentales de séchage obtenues pour les demis billons n°3 et 4 222
Figure 151 : Cinétiques expérimentales de séchage obtenues pour les demis billons n°5 et 6 223
Figure 152 : Cinétiques expérimentales de séchage obtenues pour les quarts de billons n°7 et 8 223
Figure 153 : Aspect des échantillons d'eucalyptus en fin de séchage à 110 °C (devant) et à 160 °C (derrière). 224
Figure 154 : Vitesse de perte de masse en fonction de la masse pour les échantillons séchés à 160 °C..... 224
Figure 155 : Identification de la courbe caractéristique de séchage pour une planchette de hêtre (80×10×100 mm) à 60 °C 227
Figure 156 : Courbes aérauliques établies selon la norme NF-E 51.705 (Source Aldes)..... 230

Table des tableaux

Tableau 1 : Propriétés de quelques combustibles lignocellulosiques (d'après Demirbas, 1997) 37
Tableau 2 : Objectifs français d'utilisation du bois de feu (d'après MEDAD, 2007 ; MEEDDAT, 2008)..... 39
Tableau 3 : Propriétés typiques du fioul lourd et d'une bio-huile obtenue par pyrolyse flash du bois (d'après Czernik et Bridgwater, 2004)..... 44
Tableau 4 : Amélioration des propriétés des bio-huiles par hydrotraitement (d'après Zhang *et al.*, 2005) 45
Tableau 5 : Teneur en eau requise suivant le type de procédé de conversion thermochimique utilisé (d'après McKendry, 2002b ; Pang, 2008)..... 46
Tableau 6 : Composition des différentes couches de la paroi cellulaire (d'après Guiatrd, 1987) 49
Tableau 7 : Dimensions des échantillons de hêtre 79
Tableau 8 : Etat des échantillons avant le séchage..... 79
Tableau 9 : Géométrie des échantillons selon la classe de diamètre 82
Tableau 10 : Valeurs identifiées des coefficients de transferts externes pour une planchette (80×100×10 mm) 100
Tableau 11 : Valeurs identifiées des coefficients de transferts externes pour un billon (85 mm de diamètre et 300 mm de longueur) 100
Tableau 12 : Valeurs des paramètres du modèle identifiés pour une planchette de hêtre (80×10×100 mm) 103
Tableau 13 : Valeurs des paramètres du modèle identifiés pour un billon d'eucalyptus (Ø 85×300 mm)..... 103
Tableau 14 : Valeurs retenues de perméabilités pour alimenter *TransPore* (m^2)..... 106
Tableau 15 : Conditions opératoires pour les essais de séchage de plaquettes forestières en lit fixe..... 146
Tableau 16 : Caractéristiques de l'écoulement d'air à l'attaque du lit fixe..... 152
Tableau 17 : Caractéristiques de la plaquette forestière de hêtre *type*..... 153
Tableau 18 : paramètres de l'activité adimensionnelle pour des plaquettes de hêtre (21×21×5 mm)..... 154
Tableau 19 : Caractéristiques de la paroi de la tour de séchage..... 168
Tableau 20 : Caractéristiques des plaquettes forestières de hêtre à sécher..... 169
Tableau 21 : Paramètres du modèle identifiés pour une plaquette forestière de hêtre grossière (60×40×20 mm) 169
Tableau 22 : Calcul des caractéristiques de la monocouche équivalente à l'enveloppe du séchoir à optimiser, à partir des Equations 3.33, 3.34 et 3.35..... 173
Tableau 23 : Impact de l'isolation de la paroi sur le bilan énergétique du séchoir 173
Tableau 24 : Paramètres du modèle identifiés pour une plaquette forestière de hêtre finement broyée (20×20×5 mm) 174
Tableau 25 : Résumé des aspects qualitatifs, quantitatifs et énergétiques des configurations étudiées 176
Tableau 26 : Caractéristiques des billons d'eucalyptus à sécher..... 178
Tableau 27 : Calcul des caractéristiques de la monocouche équivalente à l'enveloppe du séchoir à concevoir, à partir des Equations 3.33, 3.34 et 3.35..... 179
Tableau 28 : Influence des conditions climatiques le long du tunnel sur la vitesse de séchage du bois 182
Tableau 29 : Influence du taux de recyclage des gaz évacués sur le débit d'air sec 187
Tableau 30 : Résumé de l'influence du taux de recyclage des gaz évacués sur la longueur optimisée du tunnel189
Tableau 31 : Effet du taux de recyclage sur la température de l'air injecté dans un séchoir en configuration contre-courant 190
Tableau 32 : Dimensions des billons d'eucalyptus séchés..... 221
Tableau 33 : Perte de masse, par rapport à l'état initial, des échantillons d'eucalyptus..... 223
Tableau 34 : Valeurs des paramètres de la courbe caractéristique de séchage pour une planchette de hêtre (80×10×100 mm) 227

Notations

- **Symboles**

a	*Activité de surface*	
A	*Section transversale*	m^2
C	*Concentration molaire de l'air*	$mol.m^{-3}$
c_P	*Capacité calorifique massique à pression constante*	$J.\ kg^{-1}.K^{-1}$
D	*Diamètre*	m
e	*Epaisseur*	m
E	*Module de Young*	Pa
ht	*Hauteur*	m
h	*Enthalpie massique*	$J.kg^{-1}$
H	*Enthalpie*	J
H	*Fonction Heaviside*	
h_c	*Coefficient de transfert externe de chaleur*	$W.m^{-2}.K^{-1}$
h_m	*Coefficient de transfert externe de masse*	$m.s^{-1}$
HR	*Humidité relative*	
f	*Fonction de fluage*	Pa^{-1}
g	*Courbe caractéristique de séchage*	
j_c	*Densité de flux de chaleur*	$W.m^{-2}$
j_m	*Densité de flux de masse*	$kg.s^{-1}.m^{-2}$
K	*Nombre total d'itérations*	
l	*Largeur*	m
L	*Longueur*	m
L^*	*Longueur relative*	
L_v	*Chaleur latente de vaporisation*	$J.kg^{-1}$
m	*Masse*	kg
M	*Masse molaire*	$kg.mol^{-1}$
Nu	*Nombre de Nusselt*	
p	*Profondeur*	m
P	*Pression*	Pa
PCI	*Pouvoir calorifique inférieur*	$J.kg^{-1}$
PCS	*Pouvoir calorifique supérieur*	$J.kg^{-1}$
Pr	*Nombre Prandtl*	
$\mathscr{P}_e$	*Puissance électrique*	W
q_c	*Flux de chaleur*	$J.s^{-1}$
Q_c	*Quantité d'énergie thermique*	J
Q_e	*Quantité d'énergie électrique*	J ou $kW.h$
q_m	*Débit massique*	$kg.s^{-1}$

R	*Constante universelle des gaz parfaits*	$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
Re	*Nombre de Reynolds*	
S	*Aire entre deux courbes*	*Unité arbitraire*
$Surf$	*Surface*	m^2
$Surf_{spé\ lin}$	*Surface spécifique linéaire*	m
t	*Temps*	s
T	*Température*	K
v	*Vitesse*	$m.s^{-1}$
V	*Volume*	m^3
x	*Distance horizontale au point d'entrée du bois*	m
X	*Teneur en eau sur base sèche*	
z	*Distance verticale au point d'entrée du bois*	m

- **Lettres grecques**

α	*Activité de surface adimensionnelle*	
β	*Taux de recyclage de l'air*	
γ	*Facteur d'augmentation du débit d'air sec*	
η	*Facteur d'amortissement*	$Ps.s$
ε	*Déformation*	
λ	*Conductivité thermique*	$W.m^{-1}.K^{-1}$
μ	*Viscosité dynamique*	$Pa.s$
ρ	*Masse volumique*	$kg.m^{-3}$
σ	*Contrainte*	Pa
ϕ	*Teneur en eau adimensionnelle*	
Φ	*Porosité macroscopique*	
ψ	*Sphéricité*	

- **Indices et exposants**

a	*Air sec*
atm	*Atmosphérique*
b	*Bois*
$bé$	*Béton*
cr	*Critique*
c	*Caractéristique*
db	*Sèche (dry bulb)*
db	*Base sèche (dry basis)*
$éq$	*Equilibre*
exp	*Expérimental*

ext	*Extérieur*
init	*Initial*
int	*Intérieur*
g	*Gaz ou air humide*
h	*Humide*
l	*Eau liquide*
lm	*Laine minérale*
max	*Maximal*
part	*Particule*
pyro	*Pyromètre*
r	*Rosée*
rés	*Résistance*
résol	*Résolution*
rp	*Régime permanent*
surf	*Surface du bois ou couche limite de l'air*
v	*Vapeur d'eau*
vs	*Vapeur saturante*
wb	*Base humide (wet basis)*
w	*Paroi (wall)*
0	*Anhydre*
∞	*Ambiance (hors couche limite)*
$\bar{x}$	*Valeur moyenne de la variable x*
$\dot{x}$	*Dérivée temporelle de la fonction x*

Constantes

Les grandeurs présentées ici sont des constantes ou des fonctions utilisées comme telles pour la gamme de température de notre étude.

Constante	Valeur	Unité
$c_{P,\,a}$	*1023*	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
$c_{P,\,b}$	*1400*	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
$c_{P,\,bét}$	*1008*	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
$c_{P,\,inox}$	*450*	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
$c_{P,\,l}$	*4180*	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
$c_{P,\,lm}$	*1030*	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
$c_{P,\,v}$	*1873*	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
M_a	$28{,}836\times10^{-3}$	$kg.mol^{-1}$
M_v	18×10^{-3}	$kg.mol^{-1}$
P_{atm}	*101325*	*Pa*
R	*8,31451*	$J\cdot mol^{-1}.K^{-1}$
$\lambda_{bét}$	*1,65*	$W\cdot m^{-1}.K^{-1}$
λ_{lm}	*0,039*	$W\cdot m^{-1}.K^{-1}$
λ_{inox}	*30*	$W\cdot m^{-1}.K^{-1}$
$\rho_{bét}$	*2150*	$kg.m^{3}$
ρ_{inox}	*7900*	$kg.m^{3}$
ρ_{lm}	*100*	$kg.m^{3}$

Abréviations

3B	*Bois - biomatériaux - biomasse*
ABRAF	*Associação brasileira de produtores de florestas plantadas*
A.R.BO.LOR.	*Association pour la recherche sur le bois en Lorraine*
ADEME	*Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie*
BP	*Before Present*
BP	*British Petroleum*
c-f	*Contre-courant (counter-flow)*
CFD	*Computational fluid mechanics*
CIRAD	*Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement*
CRC	*Chemical rubber company*
CRE	*Commission de régulation de l'énergie*
CV	*Control volume (volume de contrôle)*
EIA	*Energy information administration*
ENGREF	*École nationale du génie rural, des eaux et des forêts*
EnR	*Énergie renouvelable*
EROEI	*Énergie récupérée sur énergie investie (Energy returned on energy invested)*
ESEM	*Environmental scanning electron microscopy*
FAO	*Food and agriculture organization*
FCPR	*Formation complémentaire par la recherche*
IEA	*International energy agency*
IFN	*Inventaire forestier national*
IFP	*Institut français du pétrole*
INPL	*Institut national polytechnique de Lorraine*
IPCC	*Intergovernmental panel on climate change*
LERFoB	*Laboratoire d'étude des ressources forêt bois*
MAAPRAT	*Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche, de la ruralité et de l'aménagement du territoire*
MDF	*Middle density fiberboard*
MEEDDAT	*Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire*
MEDAD	*Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables*
NIMP	*Normes internationales pour les mesures phytosanitaires*
p-f	*Co-courant (parallel-flow)*
PPI	*Programmation pluriannuelle des investissements*
PRECOND	*Pré-conditionnement de la biomasse par pyrolyse rapide pour une application biocarburants ou biocombustibles*
psf	*Point de saturation des fibres*
RP2E	*École doctorale sciences et ingénierie ressources procédés produits environnement*

T3D	*TransPore 3-D*
TCR	*Taillis à courte révolution*
tep	*Tonne équivalent pétrole*
TORBIGAP	*Torréfaction et conditionnement de la biomasse en vue de l'injection dans un réacteur de gazéification sous pression*
UA	*Unité arbitraire*
UN	*United Nations*
VER	*Volume élémentaire représentatif*
VMé	*Modèle de Van Meel étendu*
VMo	*Modèle original de Van Meel*

Introduction générale

Ce travail de thèse s'inscrit dans une démarche globale de conversion de la biomasse forestière en énergie renouvelable (EnR). Selon la directive 2009/28/CE du 23 avril 2009, la biomasse est définie comme « la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture (y compris les substances végétales et animales), de la sylviculture et des industries connexes, y compris la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux ».

L'étude simple, peut-être parfois simpliste, du contexte actuel alliant crise énergétique et environnementale, due à l'utilisation massive d'hydrocarbures d'origine fossile, permet d'expliquer l'engouement pour les bioénergies. La question délicate qui en découle est de savoir comment valoriser au mieux une ressource certes renouvelable et abondante mais aussi en quantité limitée. En effet, une exploitation minière de la biosphère ne peut être envisagée dans le cadre d'une démarche de développement durable. Par ailleurs, d'importantes innovations technologiques en matière de conversion énergétique de la biomasse sont attendues afin de faciliter son utilisation et d'étendre le champ des applications possibles.



Figure 1 : Voiture à gazogène (Das Bundesarchiv, 1946)

À titre d'exemple, il n'est aujourd'hui plus envisagé de mettre en œuvre le bois natif, solide, pour l'alimentation des moyens de transport, tel que cela a été fait dans les années 1940 (Figure 1). En revanche, les attentes de la société vis-à-vis de la biomasse forestière pour la production de carburants liquides sont au cœur de l'actualité. Avant de pouvoir proposer de tels biocarburants à la pompe, les industriels, avec l'appui de la recherche, doivent être en mesure de lever les verrous technologiques entravant la faisabilité des procédés (flux matière, efficacité énergétique, qualité des produits, etc. et *a fortiori* rentabilité économique).

Le travail de doctorat présenté dans ce manuscrit n'a pas la prétention de dressé un panorama exhaustif des filières de valorisation de la biomasse forestière de l'amont (production de la ressource) à l'aval (utilisation des bioénergies). En effet, nous nous concentrerons sur une des étapes déterminantes qu'est le préconditionnement, par séchage en continu, de la biomasse forestière avant sa conversion thermochimique.

Il s'agira, dans le premier chapitre, de discuter de l'importance de cette étape, d'effectuer un état de l'art sur le sujet pour enfin identifier les lacunes en la matière. Cet exercice nous amènera à montrer la pertinence des outils numériques comme aide à la conception et à l'optimisation de séchoirs, sous réserve qu'ils soient adaptés au cas particulier du séchage en continu du bois fragmenté. Les deux chapitres suivants seront ainsi destinés au développement et à la validation d'un tel outil en couplant étude numérique et expérimentale du séchage. À l'issue des travaux décrits dans les deuxième et

troisième chapitres nous serons en mesure de respectivement prédire le comportement de particules de bois isolées, via un modèle semi-analytique utilisant le concept de courbes caractéristiques de séchage, et simuler le procédé industriel dans son ensemble, grâce à la structuration double-échelle du modèle. Enfin, le dernier chapitre proposera deux études de cas réalistes en guise de démonstration du potentiel de ce modèle pour l'aide à la conception et à l'optimisation d'installations industrielles.

Chapitre 1 : Réduction de la teneur en eau du bois en vue de sa valorisation énergétique : un préconditionnement nécessaire

Introduction du chapitre 1

Le but de ce chapitre est de fournir les éléments nécessaires à la compréhension des enjeux et de la pertinence de l'étude. En effet, même si la valorisation énergétique de la biomasse forestière remonte à la nuit des temps, l'engouement qu'elle suscite auprès de la société et des pouvoirs publics est beaucoup plus récent. Il nous semble donc important de discuter des attraits et des limites de ce type de biomasse avec pour toile de fond le tournant historique inéluctable que constituera l'après pétrole, quelle qu'en soit l'échéance. Nous insisterons, sur le potentiel du bois énergie, du point de vue tant quantitatif que technologique.

Ceci nous amènera à montrer que le développement de cette EnR s'accompagnera d'une demande croissante en bois sec et que les séchoirs en continu se multiplieront. L'optimisation de cette étape de séchage, fortement endothermique, sera un poste clef pour maximiser le rendement énergétique des filières de valorisation de la biomasse forestière, qu'elles soient traditionnelles ou innovantes. Nous montrerons alors l'intérêt des outils numériques comme appui à la conception et à l'optimisation des séchoirs.

Cependant, la modélisation du procédé ne peut s'effectuer sans une connaissance précise du produit mis en œuvre. C'est pourquoi, nous aurons préalablement décrit la nature chimique et la l'anatomie du matériau bois pour expliquer ses interactions avec l'eau.

Les trois années de doctorat se sont déroulées dans le cadre d'une formation complémentaire par la recherche (FCPR), financée par le ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche, de la ruralité et de l'aménagement du territoire (MAAPRAT). Ainsi, ce chapitre revêt une importance particulière car il tend à montrer que les connaissances acquises ne se limitent pas au domaine des transferts de chaleur et de masse en milieu poreux mais permettent de cerner les enjeux liés aux nouvelles voies de valorisation de la biomasse.

I : Valorisation énergétique du bois

A travers ce premier paragraphe, nous souhaitons discuter de l'importance stratégique du bois énergie, décrire les technologies utilisées et prometteuses avant de conclure sur le caractère délétère de l'eau vis-à-vis des procédés de conversion thermochimique.

I-1 : Importance stratégique du bois énergie

I-1-1 : Contexte favorable au développement des EnR

I-1-1-1 : Ecueils liés à l'utilisation des énergies fossiles

Pour l'année 2007, les émissions mondiales de dioxyde de carbone dues aux activités humaines sont estimées à 35 Gt, parmi lesquels 80 % sont dues à l'utilisation des énergies fossiles (UN Statistic Division, 2010).

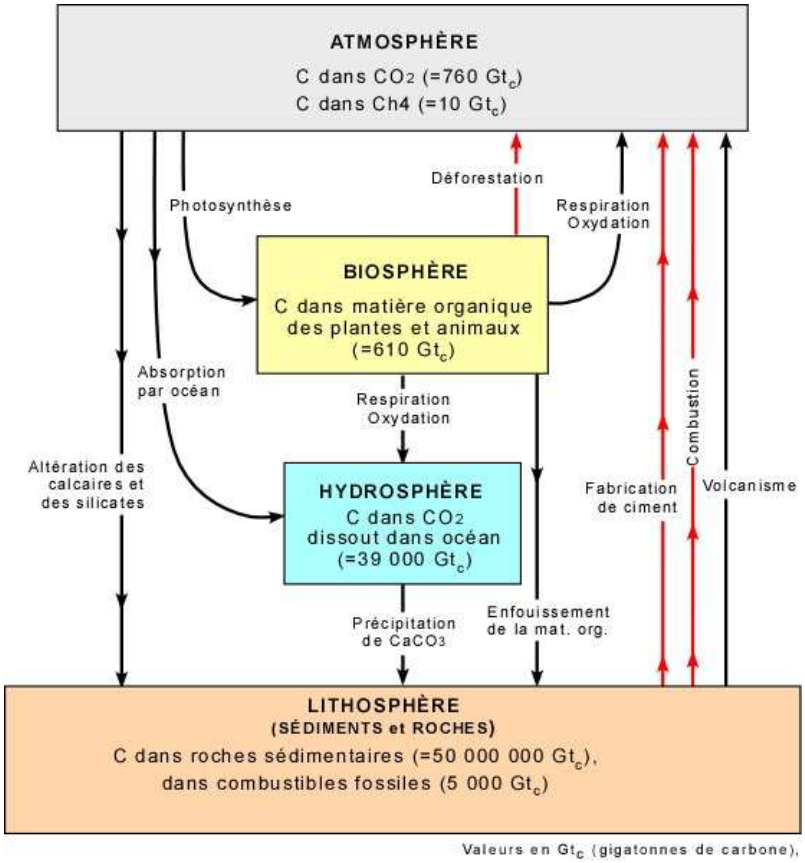


Figure 2 : Cycle du carbone (Bourque, 2010 d'après Berner et Berner, 1996 ; Kump *et al.*, 1999)

Environ le tiers de cette quantité additionnelle de gaz à effet de serre est absorbée dans la biosphère par photosynthèse. Cependant, le solde reste dans l'atmosphère et contribue au réchauffement climatique (IPCC, 2007 ; Figure 2). En outre, le renouvellement des réserves est très lent, ce qui conduit à un épuisement progressif des gisements connus. Certaines études évaluent l'épuisement complet du pétrole conventionnel aux environs de 2050 et celui du charbon dans 150 ans (IFP, 2008). De même, l'exploitation des gisements de pétrole non conventionnel (schistes et sables bitumeux) est actuellement sujette à de nombreuses controverses. L'augmentation du taux de dioxyde de carbone atmosphérique et la raréfaction des hydrocarbures incitent la société à développer de nouvelles voies de production d'énergies et de matériaux.

Dans ce contexte, les pouvoirs publics encouragent l'utilisation des énergies renouvelables et décident d'objectifs de substitution des carburants fossiles.

I-1-1-2 : Engagements d'utilisation des EnR

En 2005, de nombreux pays ratifièrent le protocole de Kyoto qui fixe des objectifs de réduction des gaz à effet de serre pour 2012 par rapport à 1990 : la plupart des pays de l'Union Européenne, dont la France, doivent réduire de 8 % leurs émissions (UN, 1997a). Ceci doit se traduire tant par des économies d'énergie que par l'essor des énergies renouvelables. Une concertation visant à définir un accord succédant au protocole de Kyoto a débuté lors des conférences des Nations Unies à Copenhague en 2009 et à Cancun en 2010.

Au niveau national, le parlement français a par ailleurs voté la loi de Programme fixant les Orientations de la Politique Energétique qui décrit des objectifs forts pour le pays en matière d'énergie

à plus ou moins courte échéance (Loi n°2005-781 du 13 juillet 2005) : d'ici fin 2010, la part des EnR devait atteindre 10 % de l'énergie primaire consommée et d'ici 2050, la France doit diviser par quatre ses émissions de gaz à effet de serre.

Enfin, au niveau communautaire, nous pouvons citer l'exemple de la directive 2009/28/CE du parlement européen et du conseil (Directive 2009/28/CE du 23 avril 2009) inclue dans le « Paquet Energie Climat ». Ce texte fixe à 20 % la part des EnR dans la consommation énergétique totale de l'Union Européenne en 2020. L'effort est réparti entre les différents Etats membres en fonction de leur PIB, par principe de solidarité. Ainsi, l'objectif de la France est porté à 23 %.

I-1-2 : Développement des bioénergies : nécessité de capter, stocker et distribuer l'énergie solaire

À l'échelle de l'humanité, l'énergie solaire peut être considérée comme renouvelable ou tout du moins pérenne. À titre de comparaison, la consommation annuelle d'énergie dans le monde est de 11,3 Gtep tandis que le flux solaire annuel à la surface de la Terre est de 92×10^3 Gtep (BP, 2010). L'énergie reçue à la surface de la Terre étant presque 10^4 fois plus importante que la consommation, le soleil a un grand potentiel pour satisfaire nos besoins si nous sommes capables d'exploiter une partie infime de ce flux. Pour ce faire, nous devons être capables de capter, de stocker et de distribuer cette énergie. Bien évidemment, cette énergie peut être exploitée directement grâce à l'utilisation de panneaux solaires, thermiques ou photovoltaïques. Il existe également des méthodes alternatives telles que celles utilisant l'énergie mécanique du vent ou l'énergie chimique de la biomasse. La production d'électricité au moyen d'éoliennes ou de panneaux photovoltaïques pose le problème du lissage des pics et creux de production. *A contrario,* les végétaux captent et stockent naturellement et efficacement l'énergie solaire par photosynthèse : chaque année, environ 105 Gt de dioxyde de carbone sont réduits en molécules organiques (Field, 1998), ce qui correspond à 71 Gtep (FAO, 1997), c'est-à-dire à sept fois la consommation mondiale d'énergie. Ainsi, le règne végétal est le plus important producteur primaire de la biosphère. Ces molécules organiques peuvent être oxydées via divers procédés, naturels ou artificiels, et libèrent ainsi l'énergie stockée. Les émissions de dioxyde de carbone issues de l'utilisation des bioressources sont alors compensées par la photosynthèse, ce qui confère un caractère renouvelable à ce type d'énergie.

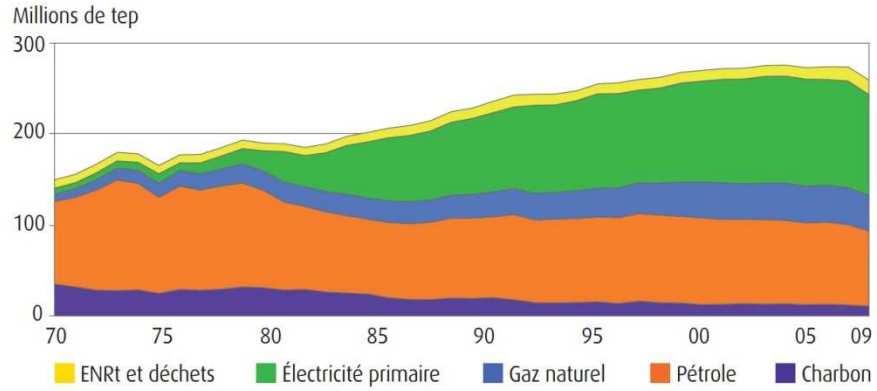


Figure 3 : Consommation d'énergie primaire en France, corrigée du climat (Commissariat général du développement durable, 2010)

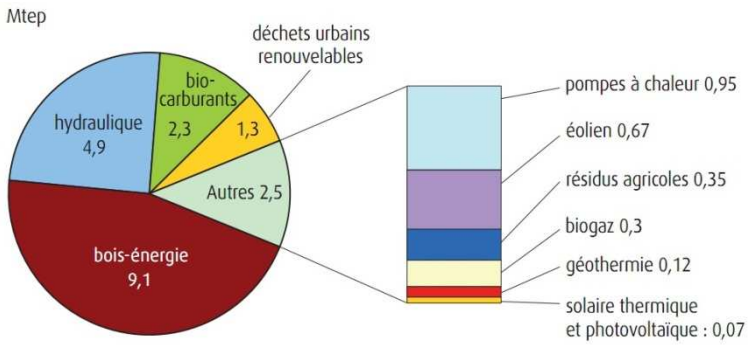


Figure 4 : Production d'EnR par filière en France en 2009 (Commissariat général du développement durable, 2010)

De nos jours, la conversion énergétique de la biomasse ne représente que 10 % de la consommation énergétique mondiale (IFP, 2008) et 5,2 % de la consommation énergétique française (Figure 3). Le poids de la biomasse au sein du bouquet énergétique global est donc faible. Cependant, ceci correspond à environ 50 % des EnR consommées sur Terre (IFP, 2008 ; Figure 4). Une politique promouvant les bioénergies aura donc un impact significatif sur la part totale des EnR. De plus, la biosphère est la seule source renouvelable de molécules renouvelables. Ainsi, il s'agit de l'unique alternative au pétrole pour la synthèse de carburants liquides, de plastiques ou tout autre produit issu de la chimie du carbone. La biosphère, et en particulier les végétaux, sera de plus en plus mise à contribution.

I-1-3 : Intérêt de la biomasse forestière

I-1-3-1 : Enseignements de la première génération de biocarburants

Dans les décennies à venir, la proportion de biomasse convertie sous forme de biocarburants augmentera. À titre d'exemple, la France s'est engagée à incorporer 7% de biocarburants en 2010 et 10% en 2015 (Loi n° 2005-1719 du 30 décembre 2005 de finances pour 2006). Aujourd'hui, la première génération de biocarburants permet de substituer les carburants d'origine fossile en plus ou moins large proportion. D'une part, l'éthanol est produit dans les bioraffineries à partir du saccharose (canne à sucre, betterave, etc.) ou d'amidon (céréales, pomme de terre, etc.) et est ajouté à l'essence (E10, E85). D'autre part, le diester est produit à partir de plantes oléagineuses (colza, tournesol, etc.) pour être mélangé au gazole. En 2006, leur production mondiale a atteint 24,4 Mtep, répartie en 40 Mm3 d'éthanol et 3 Mm3 de diester (IEA, 2008). Le rendement des procédés utilisés dépend fortement de la matière première mise en jeu. La production d'éthanol-carburant à partir de la canne à sucre est une preuve de l'efficacité de la conversion énergétique de la biomasse : le taux de retour énergétique (EROEI) est estimé entre 3 et 10 (Dias De Oliveira *et al.*, 2005 ; Hammerschlag, 2006 ; Solomon, 2010). La conversion de maïs est un autre exemple de production de biocarburants de première génération, courante aux Etats-Unis. Malheureusement, sa pertinence est discutable : son EROEI est généralement compris entre 1,1 et 1,65 (Dias De Oliveira *et al.*, 2005 ; Hall *et al.*, 2009 ; Solomon, 2010). Certaines études font même état d'un EROEI inférieur à 1 (Pimentel et Patzek, 2005 ; Pimentel *et al.*, 2007). En effet, dans les deux cas, l'éthanol est obtenu par fermentation alcoolique grâce à des microorganismes vivants mais le taux de sucre fermentescible est plus élevé dans la canne à sucre que dans le maïs.

Quelle que soit l'efficacité du procédé, les matières premières utilisées sont également comestibles : ce sont des ingrédients de base de l'alimentation humaine. En conséquence, à travers de nombreuses organisations environnementales, la société se pose la question de la durabilité de telles productions.

I-1-3-2 : Mise en œuvre de la biomasse lignocellulosique

Il est donc prévu qu'une seconde génération de biocarburants remplace la première. Ces biocarburants seront produits à partir de matériaux lignocellulosiques. Sauf dans les graines et les organes de réserves, il s'agit du constituant principal des plantes supérieures : il est par exemple présent en grande quantité dans le bois et les résidus agricoles (paille, bagasse, pulpe, etc.). Cette matière lignocellulosique, naturellement synthétisée par les végétaux au niveau de leur paroi cellulaire, est un enchevêtrement de polymères parmi lesquels la cellulose et la lignine sont les deux principaux composés. Ce sont respectivement des glucides et des polyphénols qui sont difficilement hydrolysables et non digestibles par les humains. Leur valorisation énergétique ne rentre pas en compétition frontale avec les usages agroalimentaires. La cellulose est la matière organique la plus abondante sur Terre. La ressource mondiale est estimée à plus de 10^{11} t. La lignine est le second polymère le plus répandu. Ensemble, ces deux composants représentent en quantité plus de 70 % de la biosphère (Stevanovic et Perrin, 2009). En outre, la matière lignocellulosique possède un Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) intéressant, environ 18 à 21 $MJ.kg^{-1}$ (Demirbas, 1997).

Des systèmes de cultures sont développés pour produire en abondance de la biomasse lignocellulosique. Premièrement, il peut s'agir de systèmes dédiés à la production de biomasse. Dans ce cas, les végétaux cultivés sont souvent non comestibles (*Miscanthus* × *giganteus*, chanvre, eucalyptus, peuplier, etc.). Deuxièmement, les déchets de l'agriculture ou de la sylviculture peuvent être amassés, et ensuite convertis en bioénergies, ce qui optimise la valeur ajoutée sur la récolte puisque la plante entière est utilisée. En effet, ces résidus peuvent représenter une part importante du végétal : la production paille de blé peut atteindre 10 $t.ha^{-1}.an^{-1}$ et, en futaie, le volume du houppier de chêne ou de hêtre représente 0,8 à 1,5 t par m^3 de grume.

I-1-3-3 : Bois énergie : une biomasse lignocellulosique de choix

Du point de vue quantitatif, les forêts renferment près de 80 % de la biomasse lignocellulosique totale (Stevanovic et Perrin, 2009). La biomasse forestière contribuera donc à elle seule à une part importante de la réponse des bioénergies face au défi énergétique. De plus, son exploitation permet de limiter les changements d'affectation des terres arables.

Du point de vue qualitatif, le bois possède un PCS élevé par rapport aux autres types de biomasse lignocellulosique combiné à un taux de cendre faible (Tableau 1).

Type de biomasse	PCS ($MJ.kg^{-1}$)	Taux de cendre (%)
Bois de feuillu	18,8	2,7
Bois de résineux	20,0	1,7
Tige de maïs	17,8	3,7
Paille de blé	17,0	13,5
Grignon d'olive	19,0	3,6
Feuille de tabac	15,0	17,2

Tableau 1 : Propriétés de quelques combustibles lignocellulosiques (d'après Demirbas, 1997)

La mise en œuvre de la biomasse forestière permet ainsi d'optimiser la masse de matière première à récolter, transporter et convertir. La quantité limitée de cendres produites est, quant à elle,

particulièrement avantageuse puisqu'elle réduit le coût de traitement de ce que l'on considère aujourd'hui comme un déchet. Par ailleurs, un faible taux de cendre va de pair avec une exportation limitée d'éléments minéraux. Or, cette exportation, si elle est réduite, peut être compensée par le cycle géochimique du sol. En revanche, si cette exportation est trop importante, elle devra être compensée par des fertilisants minéraux, énergétiquement coûteux et parfois mal acceptée par la société. En outre, la composition élémentaire du bois indique que le chlore et la silice ne sont présents qu'à l'état de traces. Or, ces éléments sont respectivement responsables de la corrosion accélérée des parois métalliques (par formation d'acide chlorhydrique) et de l'abaissement de la température de fusion des cendres, ce qui peut provoquer une vitrification de celles-ci dans le réacteur.

Enfin, d'un point de vue écologique, les systèmes de production de biomasse à long cycle sont considérés comme bénéfiques puisqu'ils ont tendance à être modérément anthropisés : les écosystèmes ont le temps de se mettre en place. De ce point de vue, la gestion forestière traditionnelle, dont les cycles de production sont généralement compris entre 40 et 200 ans, doit être préférée au taillis à courte ou très courte révolution (cycles de 2 à 10 ans) et aux cultures annuelles ou biannuelles.

Ainsi, la biomasse forestière est une source intéressante et abondante de polymères carbonés, réduits et structurés, qui peuvent être valorisés sous forme d'énergie, de matériaux ou de molécules plateformes pour la chimie.

I-1-4 : Limites à l'exploitation de la biomasse forestière

La valorisation énergétique de la biomasse lignocellulosique semble à première vue parfaitement adaptée pour remplacer les carburants d'origine fossile : cette biomasse est renouvelable, abondante et ne concurrence pas directement l'alimentation humaine. Cependant, ces bioénergies doivent être produites dans le cadre du développement durable. Le prélèvement doit rester raisonnable de telle sorte que les surfaces de production primaire restent constantes : sur l'Île de Pâques, la fabrication et le transport des statues monolithiques prit fin lorsque le territoire fut totalement dépourvu d'arbres. Ensuite, les résidus agricoles ou sylvicoles peuvent être récoltés seulement si la pérennité de la fertilité du sol est assurée (ADEME, 2005). En outre, toute la biomasse produite n'est pas disponible pour la production d'énergie : certaines zones doivent être protégées des activités humaines pour préserver des écosystèmes fragiles, riches en diversité ou rares. Et, étant les producteurs primaires de la biosphère, les végétaux sont le premier maillon de la plupart des chaines trophiques. Les animaux consomment une proportion importante de la biomasse lignocellulosique et nous devons donc être attentifs à ne pas dérégler cet équilibre en surexploitant cette ressource naturelle. Enfin, même si la production de matière lignocellulosique n'est pas en conflit frontal avec celle de nourriture, il est nécessaire de considérer qu'en raison du développement de ces nouvelles voies de valorisation non alimentaire de la biomasse et de l'accroissement de la population mondiale, une pression intense va s'exercer sur les terres arables. Indirectement, les bioénergies et les biomatériaux vont donc concurrencer l'alimentation.

Le constat demeure cependant : la récolte de biomasse doit s'intensifier en accord avec les fondements du développement durable. Parallèlement, nous devons veiller à la mise en place d'une économie circulaire du carbone bio-sourcé en insistant sur la hiérarchie des usages (alimentation, matériaux, énergie et fertilisation). À terme, en raison de tensions sur la ressource, la valorisation énergétique de la biomasse sera probablement envisagée comme l'ultime étape précédant le retour au sol des inorganiques.

I-2 : Modes de valorisation énergétique

I-2-1 : Le feu : d'Homo erectus à nos jours

I-2-1-1 : Combustion du bois de feu

La maitrise du feu d'*Homo erectus*, 450 000 ans BP, lui a permis de s'extirper un peu plus de sa condition animale. Jusqu'alors, seule l'utilisation généralisée d'outils (les plus modernes étant en pierre de taille) permet de distinguer du point de vue comportemental l'humanité du reste du règne animal. À titre de comparaison, les premières sépultures avérées sont datées de 100 000 ans BP.

À travers les âges, l'Homme a découvert de nouveaux usages du feu, par combustion du bois essentiellement. Dans un premier temps, le feu lui a permis de se chauffer, de cuire des aliments et de s'éclairer. Puis la chaleur produite a été domestiquée pour par exemple durcir des poteries et, plus tard, pour mettre en mouvement des moteurs à vapeur. La conversion du bois en énergie lumineuse, thermique et mécanique fut ensuite éclipsée par l'exploitation des gisements d'hydrocarbures et la maitrise de l'électricité.

Actuellement, la combustion du bois est toujours la principale voie de valorisation énergétique de la biomasse (World Energy Council, 2007). Traditionnellement, l'énergie produite est utilisée pour se chauffer et cuisiner. En France, les pouvoirs publics encouragent le développement des unités de production de chaleur à partir du bois, principalement dans l'habitat collectif et l'industrie. Ceci va de pair avec une augmentation de la production d'électricité à partir de la biomasse par cogénération. En ce qui concerne l'habitat individuel, il est prévu que la consommation de bois énergie reste constante jusqu'en 2020. Cependant, grâce à l'amélioration du parc d'appareils de chauffage, un doublement des maisons chauffées au bois est à prévoir (Tableau 2).

Secteur	Type d'énergie	Situation en 2006	Objectifs en 2012	Objectifs en 2020
Individuel	**Chaleur**	7400 ktep soit 5,75 millions de logements	7400 ktep soit 7,3 millions de logements	7400 ktep soit 9 millions de logements
Collectif & tertiaire	**Chaleur**	200 ktep	600 ktep	2000 ktep
Industrie	**Chaleur**	1200 ktep	1900 ktep	3200 ktep
Cogénération	**Chaleur** **Electricité**	0 tep 200 ktep	540 ktep *non estimé*	2400 ktep 1400 ktep

Tableau 2 : Objectifs français d'utilisation du bois de feu (d'après MEDAD, 2007 ; MEEDDAT, 2008)

L'essor du bois de feu repose, d'une part, sur l'augmentation du prix des énergies fossiles couplée aux allègements fiscaux pour les installations productrices d'EnR et, d'autre part, sur la vulgarisation des systèmes automatiques d'alimentation en combustibles et de décendrage (Rogaume, 2005a). Ces systèmes sont disponibles pour les équipements de toutes tailles : du poêle à granulés à la chaudière industrielle.

Pour la construction individuelle, il est possible d'implanter un réseau de chaleur afin de mutualiser l'investissement de ces systèmes automatiques coûteux, (Rogaume, 2005b). Celui-ci permet de distribuer au moyen d'un fluide caloporteur, généralement de l'eau, la chaleur produite par une chaudière unique vers plusieurs bâtiments. De ce fait, la puissance accrue de la chaudière utilisée, par rapport aux appareils destinés à l'habitat individuel, permet d'accepter du bois plus humide et donc moins cher. Le coût du kWh sortie chaudière peut être réduit. Pour favoriser l'implantation de ce type

d'installations (chaudières à biomasse et réseaux de chaleur), l'Etat français, à travers l'ADEME, a mis en place le *fonds chaleur*, un plan de financement de 1,2 Mrd€ sur la période 2009-2011.

Enfin, il est possible d'ajouter de la valeur au kWh thermique produit par combustion de la biomasse en la convertissant en énergie électrique. Pour ce faire, les unités de cogénération couplent une chaudière à un alternateur par l'intermédiaire d'une turbine à vapeur. (Levy, 1996 ; Rogaume, 2005b). Le tarif d'achat de l'électricité est fixé par l'arrêté du 27 janvier 2011 et est compris entre 12,15 et 16,87 c€ par kWh pour les installations dont l'efficacité énergétique globale (production l'électricité et valorisation de la chaleur fatale) est supérieure à 50 %. Dans le cas contraire, le tarif d'achat chute à 4,34 c€ par kWh. À titre de comparaison, le tarif de vente est de 8,15 c€ par kWh. Or les rendements électriques étant toujours inférieurs à 50 % (de l'ordre de 35 %), il est important de valoriser toute l'année la chaleur fatale pour que l'installation ne soit pas un non-sens énergétique et économique. Parallèlement, l'État subventionne par appel à projets les « installations de production d'électricité à partir de biomasse » d'une puissance minimale comprise entre 3 et 12 MWe (selon l'appel à projets) afin de multiplier les unités industrielles de cogénération en France. Ces appels à projets sont connus sous le nom de CRE 1 à 4 car la Commission de Régulation de l'Énergie est consultée lors de la phase d'instruction des dossiers. Ces dispositifs (tarif d'achat et appels à projets) visent à faciliter l'atteinte de l'objectif français de 23 % d'EnR à l'horizon 2020, décliné par type d'EnR dans les arrêtés du 15 décembre 2009 relatifs à la Programmation Pluriannuelle des Investissements (PPI) de production de chaleur et d'électricité.

I-2-1-2 : Le charbon de bois : un concentré énergétique au fort pouvoir réducteur

Par pyrolyse lente, le bois est transformé en charbon. Nous parlons alors de carbonisation (FAO, 1985, 1987 ; Deglise et Donnot, 2004). Lors de ce procédé de conversion thermochimique, le bois est chauffé jusqu'à 400 °C en atmosphère inerte. Il est en résulte une altération profonde de la matière lignocellulosique. D'un point de vue énergétique, ceci se traduit par une augmentation du PCS : celui passe de 18 à 21 $MJ.kg^{-1}$ pour le bois natif à 30 à 35 $MJ.kg^{-1}$ pour le charbon. Cette densification énergétique va de pair avec une augmentation significative de la proportion massique de carbone : la valeur initiale de 50 % augmente pour atteindre 65 à 85 %. Celle-ci est compensée par une diminution de la proportion massique d'oxygène. Le charbon de bois donc possède un fort pouvoir réducteur.

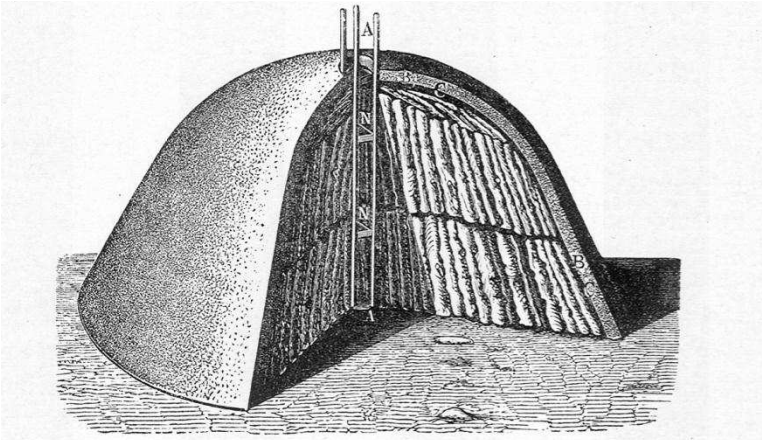


Figure 5 : Meule de carbonisation traditionnelle (Ledebur, 1895)

La carbonisation est traditionnellement réalisée au moyen de meules (Figure 5) : plusieurs stères de bois sont empilés en tas circulaire autour d'une cheminée centrale remplie de bois sec. Le tout est recouvert d'un mélange de terre et de débris végétaux formant une couche parfaitement hermétique.

Le charbonnier allume le bois contenu dans la cheminée et obtient du charbon de bois quelques jours plus tard.

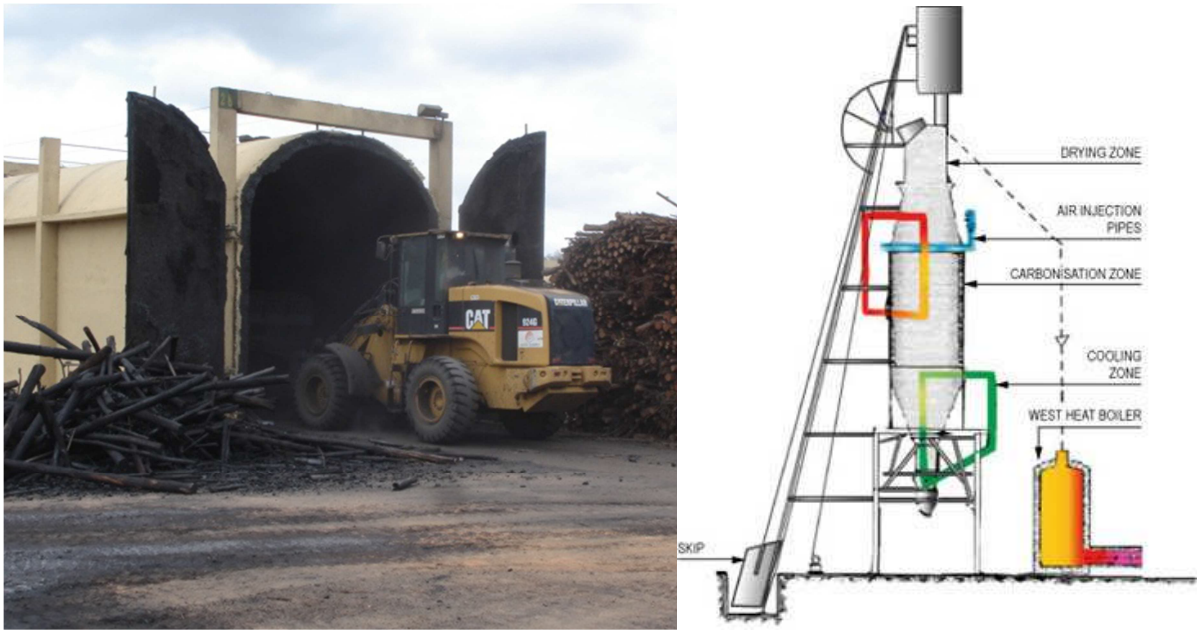


Figure 6 : Fours de carbonisation industriels. À droite : four batch (photo Perré, 2009). À gauche : tour de carbonisation de type Lambiotte (BaltCarbon)

Pour un meilleur contrôle des flux d'air et pour éviter d'avoir à reconstruire l'édifice à chaque fournée, des meules en tôle ou en briques ont été mises au point. Les fours de carbonisation se sont ensuite modernisés (Figure 6) : leur taille est devenue compatible avec les moyens de manutention mécanisés actuels et certains peuvent fonctionner en continu. Par ailleurs, ce type d'installation dispose de systèmes de récupération et de traitement des effluents liquides et gazeux, ce qui limite leur impact environnemental.

Compte tenu de sa densité énergétique accrue, le charbon de bois fut pendant plusieurs siècles un combustible de choix. Lors de la révolution industrielle, de grandes quantités furent par exemple utilisées pour alimenter les machines à vapeur : les locomobiles, locomotives, bateaux, etc. Par ailleurs, son pouvoir réducteur fut mis à profit pour la production de métaux dès l'âge de bronze (1800 ans avant JC). Le développement de la métallurgie, la mécanisation industrielle au XVIIIe et XIXe siècle et la croissance démographique ont contribué à l'essor de la production de charbon de bois et à la déforestation de nombreuses régions du monde. Ce désastre écologique fit peu à peu place au suivant, à savoir l'augmentation du taux de dioxyde de carbone atmosphérique, lorsque le charbon minéral substitua le charbon de bois.

Dans les pays industrialisés, la production de charbon de bois est aujourd'hui anecdotique. Par exemple, en Europe 530 000 t ont été produites en 2009 (FAO, 2011) tandis que 1,14 milliard de tonnes de charbon minéral étaient consommées (EIA, 2010). Cependant, il y a fort à parier que dans le contexte actuel de réchauffement climatique, le charbon de bois, renouvelable, verra sa production s'accroitre, et ce malgré une ressource en charbon minéral estimée à plus d'un siècle de consommation.

I-2-2 : Biogaz et biocarburants

Afin de convertir la biomasse forestière, solide, en fluide, liquide ou gaz, deux voies peuvent être mises en œuvre : la première fait intervenir des réactions biochimiques en phase aqueuse tandis que la seconde met en jeu des réactions chimiques en phase gazeuse.

I-2-2-1 : Conversion par voie humide : l'éthanol cellulosique

L'éthanol cellulosique est obtenu par fermentation des polymères glucidiques de la matière lignocellulosique (Broust *et al.*, 2008).

Deux étapes préalables à la fermentation sont nécessaires. Premièrement, les polyholosides doivent être activés par un prétraitement : la biomasse est mise en contact avec un acide, une base ou de l'ozone. Il en résulte une délignification, une hydrolyse partielle de l'hémicellulose et une déstructuration de la cellulose. Deuxièmement, les polymères glucidiques subissent une hydrolyse. S'il s'agit d'une hydrolyse chimique, la vitesse de réaction est commandée par la concentration en acide, la température et la pression. L'hydrolyse peut également faire appel au génie biologique en utilisant des enzymes naturelles ou synthétiques.

Les oses produits sont ensuite isolés puis convertis en éthanol au moyen de microorganismes (levures ou bactéries). Ces derniers sont généralement différents de ceux utilisés pour les biocarburants de première génération qui ne sont réellement efficaces que sur un substrat contenant des hexoses. Dans le cas présent, l'hydrolyse de l'hémicellulose induit une concentration non négligeable de pentose qu'il est important de valoriser pour optimiser le rendement du procédé. Enfin, l'éthanol est concentré par distillation et déshydratation.

Aujourd'hui, l'EROEI de l'éthanol cellulosique atteint des valeurs comprises entre 4,4 et 6,1 (Hammerschlag, 2006) et il va encore augmenter avec l'amélioration des systèmes de production de biomasse et des procédés de conversion.

La pertinence de la mise en œuvre du bois pour ce type de procédé est sujet à discussion : la biomasse forestière présente, d'un côté, un ratio *pentose sur hexose* plus faible (notamment pour les résineux) que celui de la biomasse agricole, ce qui est un avantage pour l'étape de fermentation, et, d'un autre côté, un taux de lignine élevé, ce qui est en défaveur d'un prétraitement aisé et efficace.

La biomasse, au sens large, peut être également convertie en méthane par voie biochimique (Moletta, 2008) : nous parlons alors de méthanisation. Cependant, il n'est pas fait état dans la littérature de filière spécifique mettant en œuvre la biomasse forestière.

Les conversions biochimiques font intervenir des organismes vivants pour lesquels l'eau est indispensable. Ces voies humides ne nécessitent donc pas une étape préalable de séchage de la biomasse. Le préconditionnement du bois énergie étudié dans le cadre de ce doctorat ne concerne donc pas ces filières.

I-2-2-2 : Conversion par voie sèche

La filière BtL (pour *Biomass to Liquid*) permet la production de synfuels à partir de bois énergie par apport de chaleur.

I-2-2-2-a : Gazéification

$$(C_6H_9O_4) / H_2O + O_2 \text{ (en défaut)} \rightarrow x\,CO + y\,H_2 + z\,CO_2$$

Figure 7 : Réaction de dégradation de la biomasse lors de la gazéification autothermique (Deglise et Donnot, 2004)

Lors de la gazéification, la biomasse est chauffée à une température supérieure à 800 °C. Pour que la réaction soit autothermique, l'atmosphère n'est pas inerte mais appauvrie en dioxygène. Elle est alors fractionnée sous forme de gaz simples et réduits ou partiellement oxydés que sont le monoxyde de carbone et le dihydrogène (Figure 7). Du fait de l'exothermicité de cette réaction de dégradation, la gazéification est un procédé autoentretenu.

Les utilisations potentielles de ce syngaz sont multiples :

- le mélange gazeux obtenu présente un pouvoir calorifique faible, de 4 à 6 MJ.Nm^{-3}. Il peut néanmoins être utilisé sous cette forme comme carburant pour alimenter un moteur ou une turbine à gaz (McKendry, 2002b). Ce syngaz peut également être produit et valorisé par une centrale électrique à cycle combiné à gazéification intégrée. Dans ce cas, la chaudière est alimentée non pas directement en biomasse solide mais en gaz produit à partir de biomasse au moyen d'un gazéifieur intégré à l'installation. La combustion étant homogène, l'excès d'air peut alors être contrôlé plus finement que lorsque la chaudière est alimentée directement en biomasse solide (combustion hétérogène). Le rendement de ces centrales électriques à cycle combiné à gazéification intégrée est donc plus élevé que celui des unités de cogénération « classiques ».
- la méthanation est une voie de conversion catalytique du syngaz en méthane (Figure 8) :

$$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$$

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$$

Figure 8 : Réactions de méthanation (Waldner et Vogel, 2005)

Le gaz naturel de synthèse (GNS), au pouvoir calorifique accru, peut être injecté dans le réseau de gaz urbain après avoir été purifié,

- le syngaz peut être converti en bio-gazole de seconde génération par synthèse de Fischer-Tropsch :

$$\left(n + {}^{m}\!/_{2}\right) H_2 + n\,CO \xrightarrow{Co/Fe} C_nH_m + n\,H_2O$$

Figure 9 : Synthèse de Fischer-Tropsch (Broust *et al.*, 2008)

Il s'agit d'un ensemble de réactions chimiques à pression élevée (10 à 40 bar) et température modérée (200 à 350 °C) qui permettent la synthèse d'hydrocarbures de longueurs variées (Figure 9),

- de l'éthanol peut être synthétisé à partir du syngaz dans un fermenteur grâce à *Clostridium ljungdahlii* (Younesi *et al.*, 2005 ; Guo *et al.*, 2010). Cette voie de synthèse de l'éthanol à partir de la biomasse lignocellulosique permet de convertir la lignine, composé qui peut représenter 30 % de la masse du bois (Stevanovic et Perrin, 2009).

La gazéification est un type de procédé développé depuis le XIXe siècle. Elle est notamment utilisée à l'échelle industrielle en Allemagne lors de la seconde guerre mondiale pour la production de carburant liquide à partir de charbon. En revanche, la volonté de mettre en œuvre la biomasse à grande échelle est récente puisque contemporaine à la prise de conscience du réchauffement climatique. La maîtrise de cette technologie n'est donc pas aujourd'hui suffisante pour pouvoir utiliser le syngaz sans purification préalable. En effet, la présence de goudrons détériore les équipements utilisés en aval de la gazéification, que ce soit les pales des turbines à gaz, par abrasion, ou les réacteurs chimiques, par empoisonnement des catalyseurs.

I-2-2-2-b : Liquéfaction

Le bois est converti en bio-huile par liquéfaction. Comme pour la carbonisation, ce procédé consiste en la pyrolyse de la biomasse, c'est-à-dire le chauffage de la biomasse en atmosphère inerte. La différence entre la liquéfaction et la carbonisation repose sur les conditions opératoires : le temps de séjour et la température conditionnent les proportions de liquide, gaz et solide (Deglise et Donnot, 2004). Pour liquéfier la biomasse, le produit finement broyé doit être rapidement chauffé à 500 °C puis refroidi en moins d'une seconde. Ainsi, ce procédé est également appelé *pyrolyse flash*. Le liquide obtenu est un mélange d'eau, de composés cycliques (gaïacol, de pyrocatéchol, syringol, vanilline, furane carboxaldéhyde, isoeugénol, pyranones, etc.), et d'autres acides carboxyliques (acide acétique, acide formique, etc.) (Mohan *et al.*, 2006). Il présente donc des caractéristiques incompatibles avec une valorisation énergétique directe (Tableau 3).

Propriété		**Bio-huile**	**Fioul lourd**
Teneur en eau (%)		15-30	0,1
Densité		1,2	0,94
pH		2,5	-
Composition élémentaire massique (%)	**C**	54-58	85
	H	5,5-7,0	11
	O	35-40	1
PCS (MJ.kg^{-1})		16-19	40
Viscosité à 50 °C (Pa.s)		0,04-0,1	0,18

Tableau 3 : Propriétés typiques du fioul lourd et d'une bio-huile obtenue par pyrolyse flash du bois (d'après Czernik et Bridgwater, 2004)

En premier lieu, le pH très acide provoque la détérioration des réacteurs par corrosion. Ceci s'accompagne d'une abrasion de l'équipement due à la présence de particules solides non solubles. Ensuite, le pouvoir calorifique du liquide n'est pas supérieur à celui du bois, ce qui peut être expliqué par une teneur en eau et une composition en oxygène élevées. Enfin, ce produit est instable dans le temps, ce qui se traduit notamment par une augmentation critique de la viscosité.

Dans l'état, les bio-huiles peuvent être valorisées selon trois voies. Premièrement, elles peuvent subir une gazéification telle que présentée précédemment. La liquéfaction correspond alors à une étape de densification de la biomasse et s'opère de manière décentralisée dans des agroraffineries. De plus, l'état liquide facilite la pulvérisation du bois dans le gazéifieur. Deuxièmement, les propriétés peuvent être améliorées par craquage ou hydrotraitement catalytique (Samolada *et al.*, 1998 ; Zhang *et al.*, 2005).

Propriété		Bio-huile originelle	Bio-huile hydrogénée
Densité		1,12	0,93
Composition élémentaire massique (%)	**C**	60,4	87,7
	H	6,9	8,9
	O	41,8	3
PCS ($MJ.kJ^{-1}$)		21,3	41,4

Tableau 4 : Amélioration des propriétés des bio-huiles par hydrotraitement (d'après Zhang *et al.*, 2005)

L'huile améliorée (Tableau 4) peut alors être utilisée, pure ou en mélange, dans des moteurs ou turbines en substitut de gazole ou comme matière première pour la production de polymères synthétiques (Chiaramonti *et al.*, 2007). Troisièmement, les bio-huiles peuvent être utilisée par l'industrie agroalimentaire en tant qu'arôme ou conservateur. Elles sont alors connues sont le nom de *liquid smoke*.

Ces procédés mis en œuvre pour la production des biocarburants de deuxième génération, par voie sèche ou voie humide, permettent d'utiliser la plante entière. Ils produisent donc moins de déchets que ceux de première génération qui n'utilisent que les sucres fermentescibles ou les acides gras. Ceci explique que leurs rendements soient généralement supérieurs et qu'ils soient mieux acceptés par la société. Ces voies prometteuses de valorisation énergétique de la biomasse forestière sont au stade de développement : suivant le procédé considéré, le bois est actuellement converti en carburant liquide dans des réacteurs expérimentaux (en laboratoire) ou pilotes (à l'échelle industrielle).

Pour soutenir le développement des filières de production de biocarburants de seconde génération, l'Etat français finance des programmes de recherche pilotés par l'ADEME et l'Agence Nationale de la Recherche. Il s'agit, d'une part, d'identifier, de comprendre et de faire sauter les verrous technologiques et, d'autre part, de mettre en place des plateformes de démonstration.

I-3 : Influence de la teneur en eau de la matière première

I-3-1 : Choix du procédé de conversion thermochimique

La connaissance de la teneur en eau initiale d'un type de biomasse est très importante pour le choix du procédé de conversion énergétique (McKendry, 2002a). En effet, les algues, le fumier et certaines herbacées (canne à sucre) sont des matières premières très humides et sont adaptées aux voies de conversion humides (fermentation alcoolique, méthanisation, hydrolyse enzymatique, etc.) (McKendry, 2002b). D'autres types de biomasse lignocellulosique, issus de plantes annuelles et pluriannuelles (bois, paille, bagasse, etc.), sont considérés comme ayant une faible teneur en eau et sont économiquement plus adaptés aux modes de valorisation par voie sèche : gazéification, pyrolyse ou combustion (McKendry, 2002c, b).

I-3-2 : Dégradation de l'efficience du procédé

I-3-2-1 : Diminution du pouvoir calorifique

L'eau résiduelle provoque une chute du pouvoir calorifique du bois (Núñez-Regueria *et al.*, 2001 ; Rogaume, 2005a). D'une part, l'eau contenue dans le bois humide ne participe pas la production d'énergie thermique alors que le pouvoir calorifique est mesuré par unité de masse brute. D'autre part, une partie de l'énergie libérée lors de la combustion de la matière lignocellulosique est utilisée pour

évaporer l'eau contenue dans le combustible et formée lors de la combustion. Dans la plupart des installations, l'eau doit demeurer sous forme de vapeur tout au long de la cheminée. Sa liquéfaction provoquerait la corrosion de l'équipement.

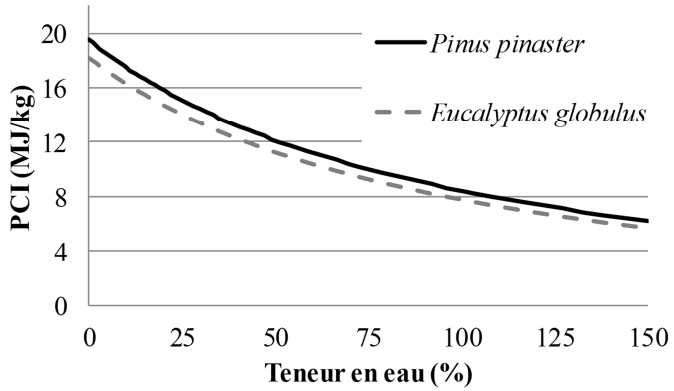


Figure 10 : Influence de la teneur en eau du bois sur le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) (d'après Rogaume, 2005a)

À travers l'exemple d'un feuillu (*Eucalyptus globulus*) et d'un résineux (*Pinus pinaster*), la Figure 10 montre que le pouvoir calorifique inférieur (PCI) est affecté négativement par une augmentation de teneur en eau du bois.

I-3-2-2 : Altération de la qualité des produits et endommagement des réacteurs

Cette diminution du PCI se traduit par une chute de la température de flamme, une baisse de rendement énergétique (Ståhl *et al.*, 2004) et une augmentation de la production de suies et de goudrons (Bryden et Hagge, 2003). Ces deux types de particules présentent de multiples inconvénients. D'une part, elles provoquent des dommages aux équipements : encrassement des réacteurs au cours du refroidissement du syngaz (en amont d'un moteur à explosion, d'un procédé Fischer-Tropsch, etc.) ou au niveau de points froids, érosion des pales de turbines fonctionnant au syngaz, etc. D'autre part, leur émission dans l'atmosphère n'est pas sans poser des problèmes de santé publique : cancer de la peau ou de la langue en cas d'exposition prolongée (Fontaine, 2009).

Remarque : la présence de goudrons dans le syngaz n'est pas toujours critique, par exemple dans le cas des centrales électriques à cycle combiné à gazéification intégrée : le syngaz n'y est pas refroidi entre la gazéification et la post combustion.

I-3-3 : Exemple de teneur en eau préconisée en vue de la conversion thermochimique du bois

Ainsi, la conversion thermochimique de la biomasse requière une matière première ayant une teneur en eau faible et homogène pour optimiser la performance du procédé (Tableau 5).

Type de procédé	Combustion	Gazéification	Liquéfaction
Teneur en eau requise	Jusqu'à 100 %	10-15 %	5-10 %

Tableau 5 : Teneur en eau requise suivant le type de procédé de conversion thermochimique utilisé (d'après McKendry, 2002b ; Pang, 2008)

Dans le cas de la combustion, la teneur en eau du bois requise dépend de la taille de la chaudière. Elle peut atteindre 100 % pour un combustible mis en œuvre dans des installations industrielles, qui

peuvent être alimentées en flux tendu avec des plaquettes forestières fraichement broyées. En revanche, les chaudières dimensionnées pour l'habitat individuel nécessitent du produit plus sec, l'optimum technico-économique se situant aux alentours de 15 à 20 % (Pang, 2008).

Certaines centrales électriques à cycle combiné à gazéification intégrée peuvent être alimentées avec de la biomasse présentant une teneur en eau comprise entre 25 et 30 %. Au sein du gazéifieur, une phase de séchage précède la phase de gazéification proprement dite qui, elle, ne se produit que lorsque la biomasse a atteint une teneur en eau comprise entre 10 et 15 %. Ceci permet d'augmenter artificiellement le rendement de l'installation. En effet, la valeur de ce rendement est définie, dans l'arrêté du 27 janvier 2011 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations de cogénération à biomasse, comme le ratio entre l'énergie (électricité et chaleur) valorisée, hors autoconsommation, et l'énergie primaire en entrée de centrale. Or, d'une part, l'énergie primaire est d'autant plus faible que la biomasse est humide et, d'autre part, l'énergie consommée dans la première partie du gazéifieur pour sécher la biomasse n'est pas considérée, au titre de l'arrêté, comme une autoconsommation (contrairement à de la chaleur qui aurait pu être mise en œuvre dans un séchoir amont). En outre, le coût de cette biomasse humide est moindre.

I-3-4 : Importance du séchage

I-3-4-1 : Nécessité de réduire la teneur en eau de la biomasse forestière

Au moment de la récolte, l'humidité du bois peut être plus élevée que ces prérequis. À titre d'exemple, il n'est pas rare que la teneur en eau du pin fraîchement abattu atteigne des valeurs supérieures à 100 %. La première opération visant à réduire cette teneur en eau avant le broyage consiste en un ressuyage en forêt ou sur plateforme des billons ou rémanents pendant plusieurs semaines. À l'issue de ce délai, la teneur en eau a significativement diminué mais demeure supérieure aux valeurs à atteindre.

Ceci explique qu'une étape de préconditionnement de la biomasse forestière, telle que le séchage, soit nécessaire.

I-3-4-2 : Autres avantages du séchage vis-à-vis de la conversion thermochimique de la biomasse forestière

En outre, le séchage de la biomasse « améliore » certaines propriétés mécaniques intéressantes pour sa conversion énergétique. Par exemple, la résilience diminue avec la teneur en eau : les économies d'énergie lors du broyage peuvent excéder 40 % si la biomasse est préalablement séchée (Bergman *et al.*, 2005 ; Repellin *et al.*, 2010). Il s'agit d'un avantage considérable pour la gazéification en lit fluidisé sous pression. En effet, ce procédé requiert une taille maximale de particule d'environ 500 µm. Dans ce cas, le broyage est une étape extrêmement coûteuse en énergie, en particulier si la biomasse utilisée est du bois qui se caractérise par une structure fibreuse. Les économies réalisées lors de cette étape auront donc un impact significatif sur le bilan énergétique global de ce type de conversion thermochimique.

De plus, la matière lignocellulosique, bien que difficilement hydrolysable, est tout de même périssable du fait de son origine biologique. La présence d'eau favorise le développement d'une population microbienne qui dégrade la biomasse. Les réactions de dégradation sont exothermiques et entrainent un échauffement du produit. Cet auto-échauffement peut par exemple être utilisé pour accélérer la cinétique de séchage naturel des plaquettes forestières en tas (Ast, 2009). Dans certain cas, ceci peut représenter un danger : si la température augmente brusquement et si la biomasse est finement fractionnée, un phénomène d'auto-inflammation peut se produire (Li *et al.*, 2005). Par ailleurs, la

dégradation biologique de la biomasse s'accompagne d'une perte de masse, jusqu'à 3 % par mois (Hamelinck *et al.*, 2005) et donc d'une baisse de son potentiel énergétique. Le séchage de la biomasse forestière prévient cette dégradation biologique en limitant le développement de cette population microbienne : les conditions de milieu ne sont plus favorables à la vie.

Enfin, aujourd'hui, la carte mondiale de distribution de la production biologique ne se superpose pas avec celle de la consommation d'énergie. Ainsi, des flux internationaux de biomasse sont à prévoir (IEA Bioenergy, 2010). Dans ce cas, l'étape de transport sera déterminante dans l'analyse globale du cycle de vie du procédé de valorisation énergétique. Le séchage permet de réduire le coût de cette étape en réduisant la masse déplacée (McIlveen-Wright *et al.*, 2001).

En conclusion, quel que soit le mode de conversion thermochimique du bois énergie, le séchage permet d'augmenter l'efficacité du procédé tout en limitant les sources de pollution. Ainsi, il s'agit d'une des étapes clefs de la valorisation énergétique de la biomasse par voie sèche. Elle doit donc être parfaitement maitrisée afin d'optimiser la ligne de production.

II : Principales caractéristiques du bois vis-à-vis de ses interactions avec l'eau

Pour être capable d'étudier le séchage du bois, il est important d'avoir une connaissance précise de ce matériau et notamment de ses interactions avec l'eau et son environnement.

II-1 : De la molécule à l'arbre, description multi-échelle du bois

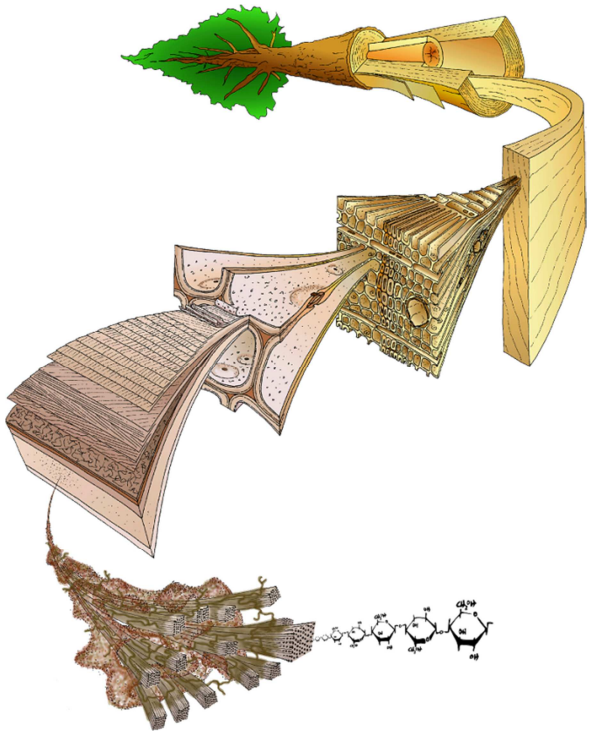


Figure 11 : Structure hiérarchisée du bois (Copyright University of Canterbury, 1996. Artwork by Mark Harrington)

Le bois est un tissu végétal que l'on trouve dans toutes les structures rigides (racines, tronc et branches) des arbres et arbustes, feuillus et résineux. Dans l'arbre, il assure les rôles d'adaptation de la forme (port de l'arbre, réaction à des perturbations mécaniques), de conduction de la sève brute et de réserve en période défavorable. Ce matériau est constitué d'une superposition de couches coaxiales de cellules (Figure 11).

II-1-1 : Propriétés et proportion des macro-polymères dans la paroi végétale lignifiée

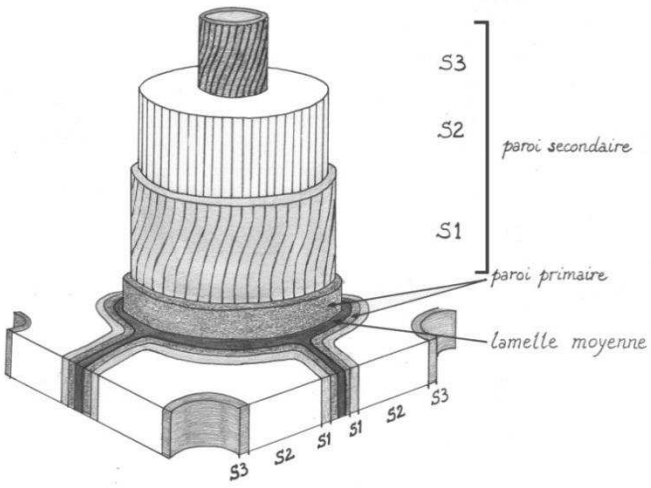


Figure 12 : Structure multi-lamellaire de la paroi végétale

La paroi végétale présente une structure elle-même multi-lamellaire (Figures 11 et 12). Les couches et sous-couches de cette paroi se différencient les unes des autres par leur composition chimique et par l'organisation de leurs constituants (Tableau 6).

Couche de la paroi		Cellulose	Hémicellulose	Lignine
Lamelle moyenne		5 %	10 %	85 %
Paroi primaire		10 %	15 %	75 %
Paroi secondaire	**S1**	30 %	30 %	40 %
	S2	50 %	30 %	20 %
	S3	50 %	35 %	15 %

Tableau 6 : Composition des différentes couches de la paroi cellulaire (d'après Guiatrd, 1987)

Globalement on considère que le bois de feuillu est constitué de 38 à 49 % de cellulose, 23 à 30 % d'hémicellulose et 19 à 26 % de lignine (Rowell *et al.*, 2000). L'affinité de ces trois composés vis-à-vis de l'eau explique celle de la paroi. Pour les décrire, nous nous référons à l'ouvrage intitulé *Chimie du bois* (Stevanovic et Perrin, 2009).

II-1-1-1 : Cellulose

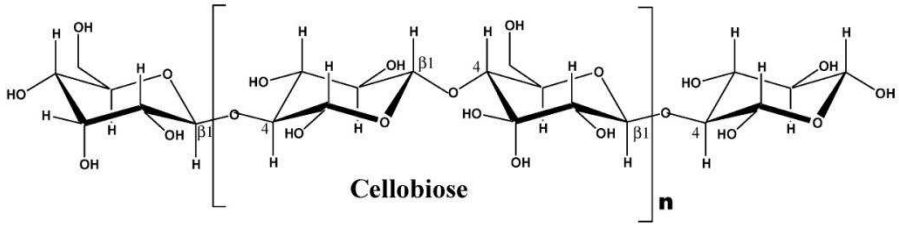


Figure 13 : La cellulose, une succession de cellobioses liés en β(1→4) (Mohan *et al.*, 2006)

La cellulose est le composé principal du bois. Il s'agit d'un polyholoside à haut poids moléculaire ($(C_6H_{10}O_5)_n$). Chaque molécule est constituée d'un enchaînement de cellobioses (deux β-D-anhydroglucopyranoses) liés par une liaison glycosidique β(1→4) (Figure 13).

Compte tenu de la configuration du premier carbone asymétrique, de nombreuses liaisons hydrogène intra et intermoléculaires peuvent se former et les chaînes formées deviennent linéaires. En outre, les liaisons hydrogène intermoléculaires favorisent la formation de complexes supramoléculaires appelés microfibrilles. Au sein de ces microfibrilles, les molécules de cellulose sont liées de façon ordonnée ou non pour former respectivement la cellulose cristalline ou la cellulose amorphe. Ces deux types de cellulose ont des propriétés très différentes : la cellulose amorphe présente une affinité pour l'eau supérieure à celle de la cellulose cristalline. Cette affinité supérieure s'explique par le fait que les sites des liaisons hydrogène de la cellulose amorphe sont plus accessibles pour les molécules d'eau qui, lorsqu'elles s'intercalent entre deux molécules de cellulose, provoquent un gonflement.

II-1-1-2 : Hémicelluloses

Les hémicelluloses forment une classe des polysaccharides très variée. Elles sont constituées d'une chaîne principale ramifiée.

Chez les feuillus, les glucuronoxylanes constituent le type d'hémicellulose le plus répandu (14 à 35 % de la masse du bois). La chaîne principale est constituée de β-D-xylopyranoses liés en β(1→4). Les ramifications correspondent à des acides 4-O-méthylglucuroniques liés en α(1→2) à la chaîne principale et à des groupements acétyles liés au carbone 2 ou 3 des xyloses.

Les hémicelluloses sont intimement liées à la cellulose dans la paroi où elles constituent une matrice amorphe ayant des propriétés hydrophiles.

II-1-1-3 : Lignines

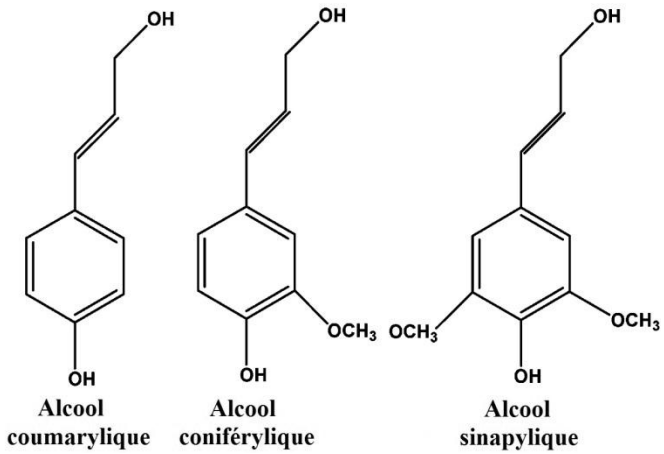


Figure 14 : Unités précurseurs des lignines (Mohan *et al.*, 2006)

Les lignines sont un ensemble de polymères polyphénoliques de poids moléculaire élevé, de composition et structure variables et complexes. Elles résultent de la polymérisation de trois alcools phénoliques : alcool coumarylique, coniférylique et sinapylique (Figure 14). La variabilité des lignines repose sur la multiplicité des unités de base et des types de liaisons. La présence de nombreux noyaux aromatiques confère des propriétés hydrophobes à la matrice amorphe qu'elle constitue dans la paroi végétale.

II-1-2 : Observation microscopique des tissus du bois

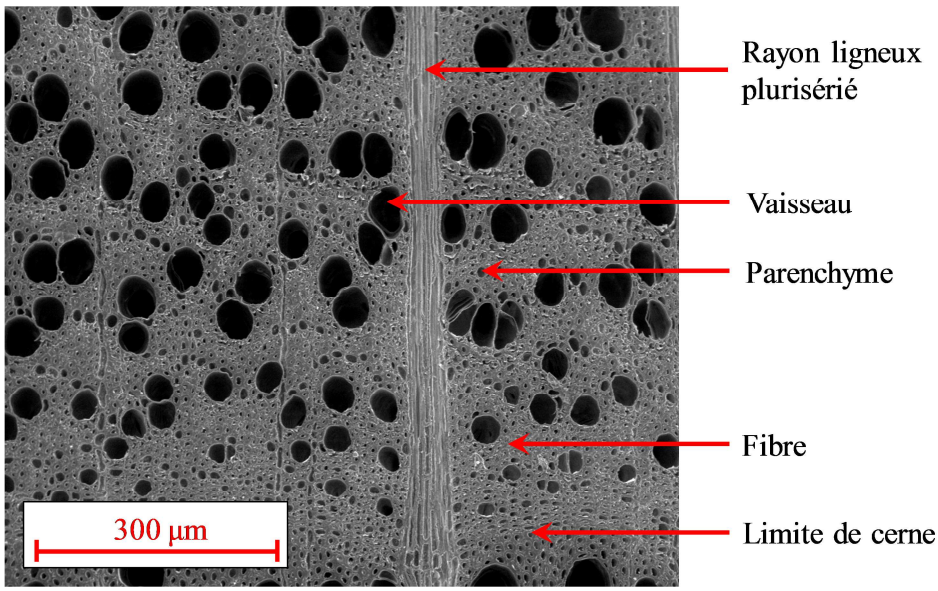


Figure 15 : Coupe transversale de hêtre (*Fagus sylvatica* L.) observée au microscope électronique (cliché ESEM Huber, 2004)

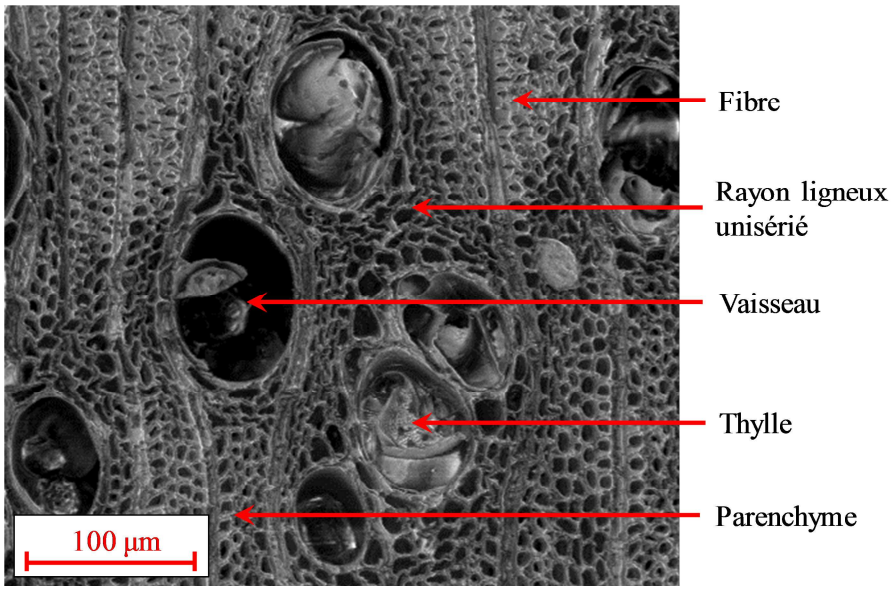


Figure 16 : Coupe transversale de gommier bleu (*Eucalyptus globulus*) observée au microscope électronique (cliché ESEM Redman, 2010)

Le bois, ou xylème secondaire, est constitué de cellules allongées. Chez les feuillus évolués, ces cellules présentent un diamètre compris entre 20 et 200 µm pour une la longueur de 0,3 à 0,6 mm (Jodin, 1994). L'organisation des différents types cellulaires du bois, appelée plan ligneux, est définie génétiquement (Figures 15 et 16). Elle est propre à chaque essence et constitue donc un critère de reconnaissance (Schweingruber, 1978). Dans le cas des feuillus, nous pouvons distinguer trois types cellulaires :

- les fibres dont la paroi épaisse permet d'assurer le soutien mécanique de la tige,
- les vaisseaux dont les larges lumens permettent la conduction de la sève brute,
- les cellules de parenchyme ; ce sont les seules cellules vivantes présentes dans le bois : elles accumulent ou délivrent les réserves.

Ces cellules du bois sont produites par divisions et différenciations de cellules souches organisées en une couche cylindrique externe nommée assise libéro-ligneuse. La plupart des cellules s'organisent selon l'axe du tronc ; seules les cellules de parenchyme organisées dans les rayons ligneux sont orientées selon le diamètre du tronc. Chaque cellule est connectée à ses voisines par des voies de passage pour les fluides. Les petites présentes sur les faces latérales de la cellule sont nommées *ponctuations* tandis que les plus larges aux extrémités des vaisseaux sont nommées *perforations*.

Au cours de la vie de l'arbre, les couches internes du bois subissent un phénomène complexe de modifications physicochimiques appelé duraminisation. Les phénomènes observables (ou non, suivant l'essence) sont notamment une coloration du bois, une diminution de la teneur en eau et une modification des paramètres physiques liés aux transferts de masse (réduction très significative de la perméabilité du bois, Perré, 2007a). Il est donc indispensable de différencier aubier (couches externes, siège de l'ascension de la sève brute) et duramen (couches internes) lors de l'étude du séchage du bois

II-1-3 : Orientation dans le billon et anisotropie des propriétés du bois

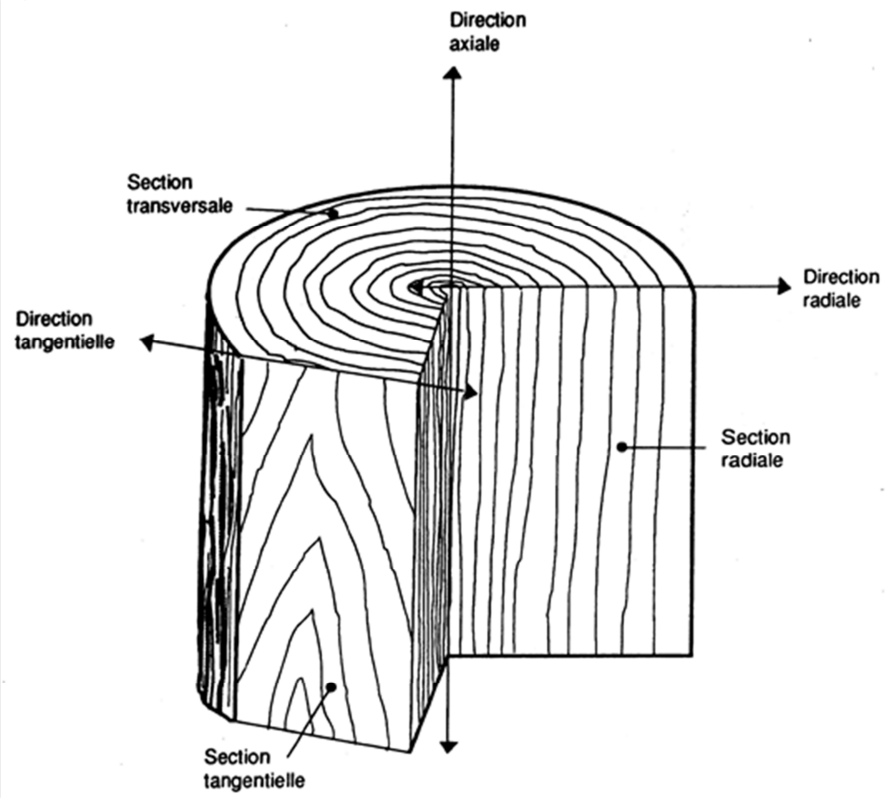


Figure 17 : Directions et plans d'étude du bois (Guiatrd, 1987)

Afin d'étudier les propriétés physiques du bois, il est primordial d'y associer un repère tridimensionnel. En effet, les paramètres, tels que la perméabilité et la diffusivité, sont notamment affectés par l'orientation des cellules, par la disposition des voies de passage à leur surface et la présence éventuelle de thylles. Compte tenu de la géométrie du tronc, globalement cylindrique, et de son mode de formation, par superposition de couches concentriques, le repère adéquat est orthotrope cylindrique (Figure 17).

II-2 : L'eau dans le bois

II-2-1 : Localisation de l'eau dans le bois

II-2-1-1 : Porosité du bois et eau libre

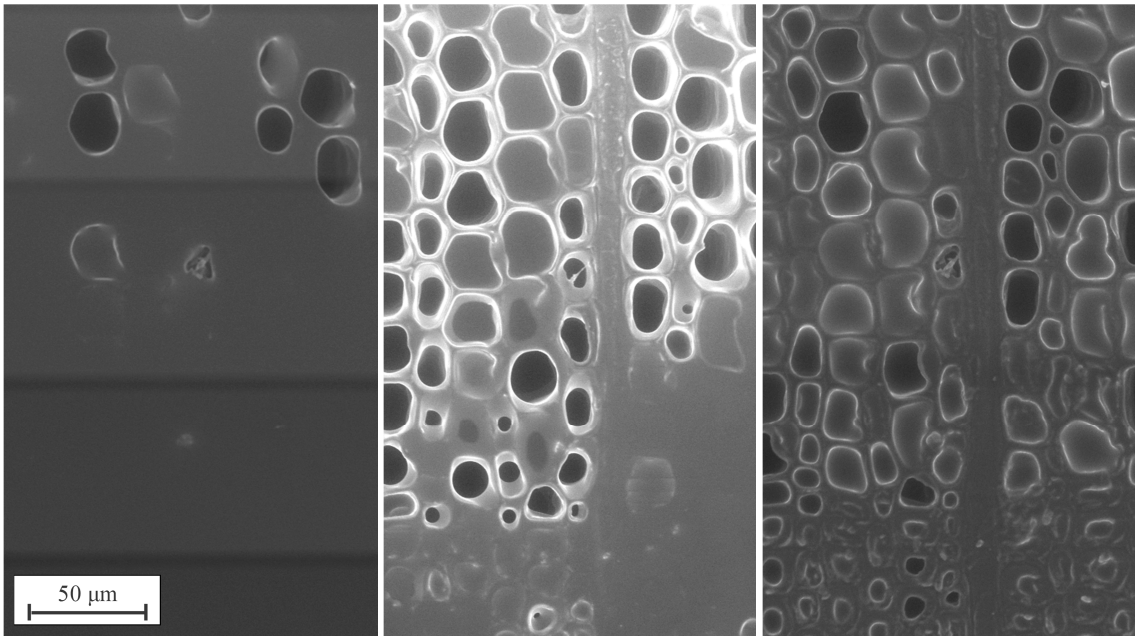


Figure 18 : Variations de la quantité d'eau libre lors du séchage (de gauche à droite) de l'épicéa commun (*Picea abies* L.) observées au microscope électronique (clichés ESEM Perré, 2003)

La présence de lumens au centre des cellules confère un caractère poreux au bois. L'eau peut s'accumuler dans ces vides intracellulaires sous forme liquide (Figure 18). Nous parlons alors d'eau libre. Les cavités de faible diamètre sont reliées entre elles par les ponctuations et les perforations. En outre, ces cavités sont ouvertes à la surface de la pièce de bois. L'eau y est retenue par pression capillaire.

II-2-1-2 : Hygroscopicité de la paroi végétale et eau liée

Les groupements hydroxyles de la cellulose, notamment lorsque la structure de celle-ci est amorphe, et de l'hémicellulose permettent d'établir des liaisons hydrogène avec l'eau. Ainsi, l'hydrophilie de la matière lignocellulosique confère au bois un caractère hygroscopique. Nous parlons alors d'eau liée.

Les liaisons hydrogènes mises en jeu entre l'eau et les macromolécules de la paroi sont certes non covalentes mais demeurent fortes. De ce fait, l'eau liée présente une enthalpie inférieure à celle de l'eau libre. Son enthalpie de vaporisation est donc plus élevée puisque la vapeur possède la même enthalpie quelle que soit l'origine de l'eau. Cette différence d'enthalpie de vaporisation correspond à la chaleur différentielle de sorption (Perré, 2007a).

II-2-2 : Teneur en eau du bois

II-2-2-1 : Teneur en eau

La teneur en eau est le rapport entre la masse d'eau contenue dans la pièce de bois et la masse du bois. Suivant la discipline d'étude, nous pouvons considérer la teneur en eau sur base sèche (Equation 1.1) ou sur base humide (Equation 1.2).

$$X_{db} = \frac{m_{b,h} - m_{b,0}}{m_{b,0}} \tag{1.1}$$

$$X_{wb} = \frac{m_{b,h} - m_{b,0}}{m_{b,h}} \tag{1.2}$$

La masse anhydre est obtenue en séchant le bois à 103 °C jusqu'à obtenir stabilisation de la masse.

La première formule est généralement utilisée pour le bois d'œuvre et la seconde pour le bois énergie. Cependant, l'étude du séchage est traditionnellement associée au bois d'œuvre. Malgré la destinée de la biomasse forestière séchée dans le cadre de cette étude, nous utiliserons la teneur en eau du bois sur base sèche qui est notée *X* dans le reste du manuscrit. Ce choix a pour principal avantage d'assurer une relation linéaire entre masse d'eau et teneur en eau. Pour le lecteur habitué à la base humide, il est toujours possible de convertir ces grandeurs grâce à la relation simple liant ces deux teneurs en eau du bois :

$$X_{db} = \frac{X_{wb}}{1 - X_{wb}} \tag{1.3}$$

II-2-2-2 : Point de Saturation des Fibres

Du fait de la chaleur différentielle de sorption, l'évaporation de l'eau libre et celle de l'eau liée se succèdent lors du séchage. Dans un premier temps, lorsque le bois est à l'état vert, les pores du bois se vident. S'il s'agit de la première désorption. Quand les pores sont vides, l'eau lié aux parois commence à s'évaporer provocant des variations dimensionnelles du matériau. La teneur en eau correspondant simultanément à la disparition de la dernière « goutte » d'eau libre et au début de l'évaporation de l'eau liée est connue sous le nom de point de saturation des fibres (psf). Sa valeur, se situant à environ 30 % de teneur en eau, varie sensiblement avec la température (Siau, 1984) :

$$X_{psf}\left(\%\right) = 32,5 - 0,1 \times T\left(°\mathrm{C}\right) \tag{1.4}$$

La plage de teneur en eau inférieure à ce psf correspond au domaine hygroscopique du bois.

Au cours d'un essai de sorption, une partie de la particule de bois peut renfermer de l'eau libre tandis qu'une autre a déjà atteint le domaine hygroscopique. De ce fait, lors du séchage, le psf n'a de sens que localement : une teneur moyenne égale au psf ne traduit pas le passage de l'intégralité de la pièce de bois dans le domaine de l'eau liée.

II-2-2-3 : Teneur en eau d'équilibre

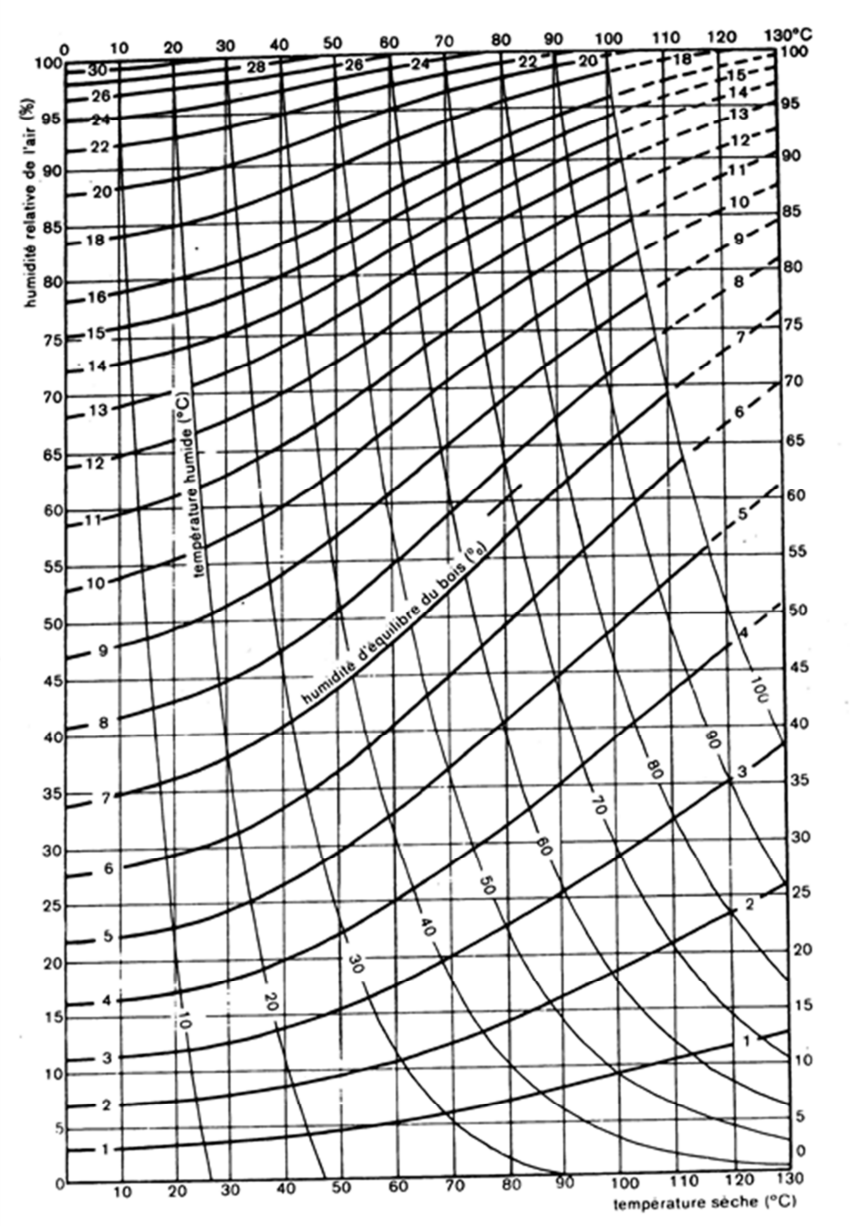


Figure 19 : Isothermes de sorption du bois (Jodin, 1994 d'après Keylwerth, 1969 et Joly et More-Chevalier, 1980)

Étant un matériau hygroscopique, le bois s'équilibre en humidité avec l'air ambiant. La valeur de la teneur en eau d'équilibre du bois dépend de la pression de vapeur et de la température de l'air, identique à celle du bois à l'équilibre (Figure 19). Elle est définie grâce à l'isotherme de sorption. De très nombreuses formulations ont été proposées dans la littérature pour interpoler les points expérimentaux. Notre choix s'est porté sur l'expression simple suivante (Perré et Degiovanni, 1990) :

$$\frac{P_v^{\infty}}{P_{vs}\left(T_{db}^{\infty}\right)} = 1 - \exp\left(-0,76427 \times \frac{X_{éq}}{X_{psf}} - 3.6787 \times \left(\frac{X_{éq}}{X_{psf}} \right)^2 \right) \qquad (1.5)$$

II-3 : Echanges d'eau entre le bois et son environnement

Lors du séchage, le bois échange de l'eau avec son environnement. Pour décrire efficacement ce procédé, nous devons préalablement comprendre les phénomènes physiques internes et externes mis en jeu ainsi que leur influence sur la cinétique de séchage.

II-3-1 : Mode de transferts de l'eau

Une description détaillée des phénomènes de transferts couplés de chaleur et de masse en milieu poreux hygroscopique observés lors du séchage est accessible dans l'ouvrage *Fundamentals of wood drying* (Perré, 2007a). Dans cette partie, nous nous limiterons à une description succincte des transferts de masse en insistant sur l'effet de la température de séchage.

II-3-1-1 : Transferts de masse internes

II-3-1-1-a : Migration d'eau libre

A basse température, inférieure à 100 °C, l'unique moteur de la migration d'eau libre est la pression capillaire : l'évaporation de l'eau à la surface du bois provoque une courbure du ménisque de l'interface air/eau et crée une force de succion transmise, de pore en pore, vers les couches profondes. Il en résulte un déplacement d'eau libre du cœur de la pièce de bois vers la surface. Au début de séchage, cette migration capillaire permet à l'intégralité de la surface de la pièce de bois d'être alimentée en eau liquide. Ce phénomène s'achève lorsqu'une bulle de gaz rompt la continuité de la phase liquide. La rupture intervient plus ou moins précocement sous l'effet combiné du diamètre des pores et de la perméabilité liquide.

A température supérieure au point d'ébullition de l'eau, la pression partielle de vapeur est plus grande que la pression extérieure. Il en résulte une surpression gazeuse interne qui va participer à l'expulsion de l'eau libre de la particule et accélérer ainsi son séchage. Outre le niveau de température atteint au cœur de la particule, l'intensité de cette surpression gazeuse et donc la quantité d'eau libre déplacée vont dépendre principalement de la géométrie de la particule et des valeurs de perméabilité relative gazeuse selon ses directions matérielles.

II-3-1-1-b : Migration d'eau liée

L'eau liée à la paroi cellulaire peut migrer sous l'effet d'un gradient de fraction molaire, en accord avec la loi de Fick. Cette diffusion d'eau liée est thermohydroactivée.

II-3-1-1-c : Migration de vapeur

A basse température, la migration de vapeur, du cœur vers la surface du bois, résulte principalement du gradient de la fraction molaire de vapeur dans l'air. Cette diffusion obéit à la loi de Fick.

A haute température, le flux convectif peut être prépondérant par rapport au flux diffusif. Le mode de transfert particulièrement efficace est la conséquence d'un gradient de pression totale de gaz. Elle obéit à la loi de Darcy.

II-3-1-2 : Transferts de masse externes

L'essentiel des transferts de masse externes s'effectuent à l'état gazeux. À basse température, la vapeur d'eau migre dans la couche limite selon un mode diffusif. En revanche, à haute température, la résistance à la diffusion de vapeur dans cette couche limite devient nulle. Il en résulte une migration convective de la vapeur d'eau. L'influence de ce changement de mode de migration sur la formulation des transferts de masse est abordée dans le chapitre suivant.

En outre, à haute température, une expulsion d'eau à l'état liquide à la surface du bois peut se produire en réponse à une surpression gazeuse interne.

II-3-2 : Influence du retrait et des fentes sur la surface d'échange

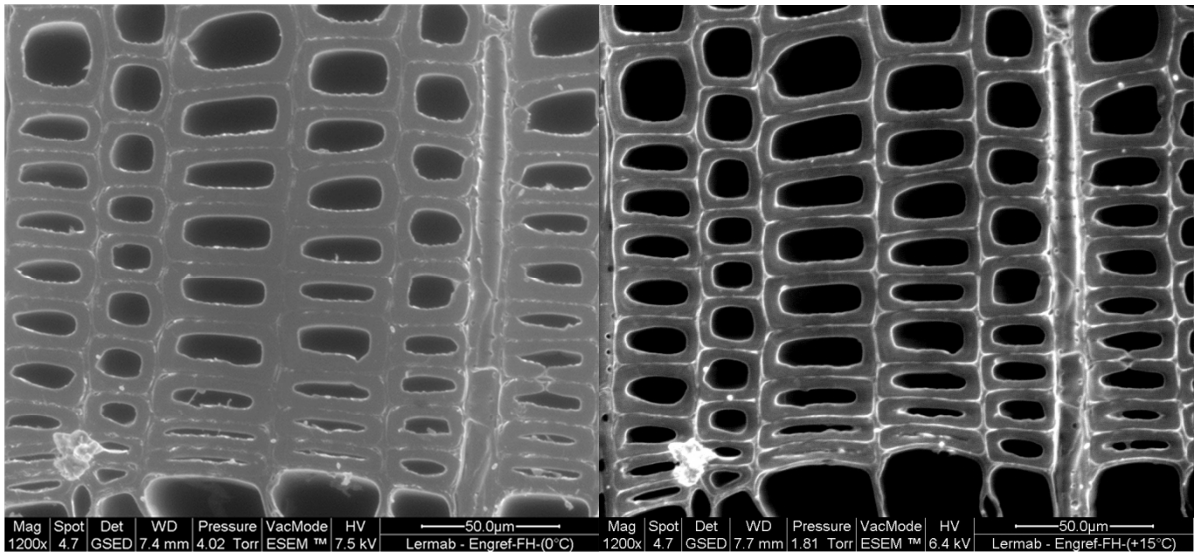


Figure 20 : Différence d'épaisseur des parois des cellules du bois du sapin pectiné (*Abies alba* M.) au psf, à gauche, et sec à l'air, à droite (clichés ESEM Huber, 2004)

Dans le domaine hygroscopique, une baisse de la teneur eau du bois s'accompagne d'une diminution de l'épaisseur de la paroi des cellules du bois (Figure 20). Lors du séchage, ces retraits microscopiques se traduisent à l'échelle de la pièce de bois par, d'une part, une réduction des dimensions de la pièce de bois et donc de la surface d'échange et, d'autre part, le développement de contraintes internes pouvant provoquer l'apparition de déformations et de fentes.

L'intensité de la modification de la surface d'échange et son influence sur la cinétique de séchage peuvent être prise en compte dans la modélisation du séchage. En revanche, l'impact des déformations sur l'intensité des transferts externes, via l'aéraulique, est mal connu. De même, l'occurrence des fentes, leur impact sur la surface d'échange, via leur profondeur, et sur les transferts externes dans les cavités nouvellement formées sont particulièrement difficiles à prédire.

III : Utilisation des séchoirs en continu pour le préconditionnement de la biomasse lignocellulosique

Plus des trois quarts de la biomasse récoltée chaque année est convertie en énergie par combustion (World Energy Council, 2007). Comparé aux autres, il s'agit d'un procédé qui supporte une matière première ayant une teneur en eau relativement élevée et hétérogène. De plus, la valeur ajoutée est

faible, c'est pourquoi le coût de l'étape de préconditionnement doit être réduit autant que possible. Ceci explique qu'aujourd'hui le séchage naturel du bois énergie soit courant : il ne s'agit pas du moyen de préconditionnement le plus efficace mais il fournit une biomasse suffisamment sèche tout en nécessitant peu d'infrastructures. Il peut en outre être facilement amélioré par l'emploi d'un hangar de séchage ou d'une bâche respirante *Toptex*.

Cependant, l'utilisation de bois énergie séché industriellement augmentera dans un futur proche avec l'essor de la gazéification et de la liquéfaction. En effet, le séchage artificiel est le moyen d'obtenir une matière première ayant une teneur en eau faible et homogène, ce qui est essentiel pour la production de biocarburants par conversion thermochimique. Il est prévu que cette production soit quintuplée entre 2006 et 2030 (IEA, 2008). Par rapport aux séchoirs de type *batch*, les séchoirs en continu nécessitent un investissement supérieur mais ils sont souvent préférés compte tenu de leur parfaite intégration dans la ligne de production : la manutention et les stockages sont réduits, ce qui permet de faire des économies de main d'œuvre. En outre, les phases non productives que sont la mise en régime et le refroidissement deviennent négligeables dans le cadre d'un fonctionnement ininterrompu.

Nous présentons maintenant de manière concise les différents types de séchoirs (Mujumdar, 2007 ; Arlabosse, 2008 ; Pang, 2008 ; Ast, 2009). Pour de plus amples informations, nous vous invitons à vous référer au *Handbook of industrial drying* (Mujumdar, 2007).

III-1 : Diversité des modes de préconditionnement et intérêt du séchage

III-1-1 : Description générale des modes de préconditionnement

Il existe actuellement une diversité de modes préconditionnement de la biomasse forestière en vue de sa conversion thermochimique. Nous pouvons citer le séchage (décrit dans les paragraphes suivants), la torréfaction et la liquéfaction.

La torréfaction, ou rétification, est une pyrolyse ménagée du bois : le produit est chauffé à une température généralement comprise entre 200 et 300 °C sous atmosphère inerte. Le produit sec obtenu est intermédiaire entre le bois natif et le charbon, tant par l'aspect que par le comportement. Le PCS augmente de 5 à 25 % pour atteindre une valeur comprise entre 21 et 25 $MJ.kg^{-1}$ (Almeida *et al.*, 2010). La torréfaction constitue donc un mode de densification énergétique. Les modifications chimiques constatées sont une dégradation de l'hémicellulose et de la cellulose cristalline et une condensation de la lignine (Rousset *et al.*, 2006). La réduction du taux d'holocellulose hydrophile se traduit par une diminution de la teneur en eau d'équilibre du bois et du psf. La reprise d'humidité est donc limitée (Almeida *et al.*, 2009), même lors d'un long transport de la biomasse, parfois par voie maritime. Le gain énergétique est donc double : la masse d'eau transportée est moindre, tout comme la différence entre PCS et PCI. Enfin, il est important de noter que la résilience du bois torréfié diminue significativement lors du traitement. Il en résulte des économies d'énergie lors du broyage du bois (Pierre *et al.*, 2010) en fines particules. Cet aspect fut étudié dans le cadre du projet TORBIGAP (torréfaction et conditionnement de la biomasse en vue de l'injection dans un réacteur de gazéification sous pression) financé par l'ANR (CIRAD, 2006).

Le principe de la liquéfaction et son intérêt comme moyen de préconditionnement sont déjà discutés dans le paragraphe I-2-2-2-b de ce même chapitre. Nous souhaitons simplement ajouter que cette filière fut étudiée dans le cadre du projet PRECOND (pré-conditionnement de la biomasse par pyrolyse rapide pour une application biocarburants ou biocombustibles) financée également par l'ANR (Broust *et al.*, 2010).

L'inconvénient majeur de ces procédés globalement endothermiques réside dans la température de réaction (comprise entre 200 et 900 °C). En effet, ils peuvent rarement utiliser de la chaleur fatale produite par une installation annexe et nécessitent donc une source d'énergie propre. Or, la chaleur a un coût d'autant plus élevé que la température à atteindre l'est. Ceci explique qu'un séchage soit souvent mis en œuvre en amont : l'utilisation d'une source chaude à haute température dédiée au séchage du bois serait un non-sens.

III-1-2 : Comparaison des types de séchoir et critères de choix

III-1-2-1 : Séchoir rotatif

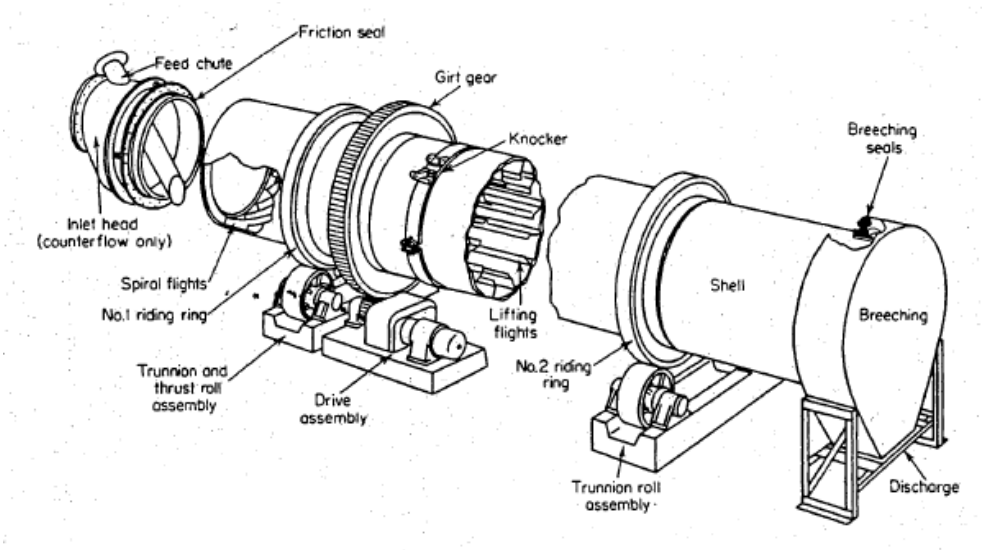


Figure 21 : Séchoir rotatif direct (Perry et Chilton, 1973)

Ce type de séchoir consiste en un cylindre en rotation autour d'un axe légèrement incliné par rapport à l'horizontal (Figure 21). Le bois fragmenté entre par l'extrémité surélevée du cylindre et, grâce aux effets couplés de la rotation et de la gravité, se déplace jusqu'à l'évacuation localisée au niveau de la partie basse du cylindre. Ainsi, les paramètres intrinsèques du produit (taille de particule, sphéricité, densité, etc.) influencent significativement sa vitesse de traversée et donc son temps de séjour. Ce temps de séjour peut être réglé en ajustant l'inclinaison du cylindre et sa vitesse de rotation. Ce mode de déplacement impose que la biomasse soit bien calibrée pour éviter que certaines particules ne traversent le séchoir plus vite que d'autres. Dans le cas contraire, une teneur en eau homogène à la sortie du séchoir ne peut être garantie.

Le cylindre rotatif mélange les particules en continu. Ainsi, toutes les particules sont soumises au même profil de conditions climatiques le long du séchoir. Ce mélange peut être amélioré par la disposition d'aubes périphériques fixées sur la face intérieure du cylindre : les particules sont soulevées puis déversées. Il s'agit d'un moyen efficace d'atteindre l'homogénéité de teneur en eau désirée. Cependant, il est important de noter que ce type d'appareil n'est pas adapté au séchage des particules de grande taille telles que les billons. En effet, leur chute dans le cylindre endommagerait rapidement la paroi et les aubes.

L'apport de chaleur peut s'effectuer selon divers modes. Nous pouvons ainsi différencier les séchoirs rotatifs directs et indirects. Dans le premier cas, de l'air chaud est injecté dans le cylindre : le produit à sécher et le gaz vecteur de chaleur sont en contact l'un avec l'autre. Dans le second cas, soit la paroi

du séchoir est chauffée (au moyen d'une flamme ou de résistances électriques), soit de la vapeur circule dans des tubes placés à l'intérieur du séchoir. Les séchoirs rotatifs indirects sont utiles si le bois est finement broyé. En effet, un écoulement d'air dans le cylindre balayerait la biomasse. Cependant, le transfert de chaleur par convection est plus efficace que celui par conduction, c'est pourquoi les séchoirs rotatifs directs présentent un meilleur rendement. La présence d'aubes périphériques permet d'améliorer cette performance : quand elles tombent, les particules traversent le courant d'air, ce qui favorise les échanges de chaleur et de masse. Par conséquent, si le calibre des particules est adéquat, un séchoir rotatif direct doit être privilégié. De plus, leur conception et leur fabrication étant plus aisée, le coût d'investissement est plus faible.

Les séchoirs rotatifs sont adaptés pour le préconditionnement d'une biomasse forestière dont la granulométrie est faible à moyenne : de la sciure à la plaquette forestière.

III-1-2-2 : Séchoir à lit fluidisé

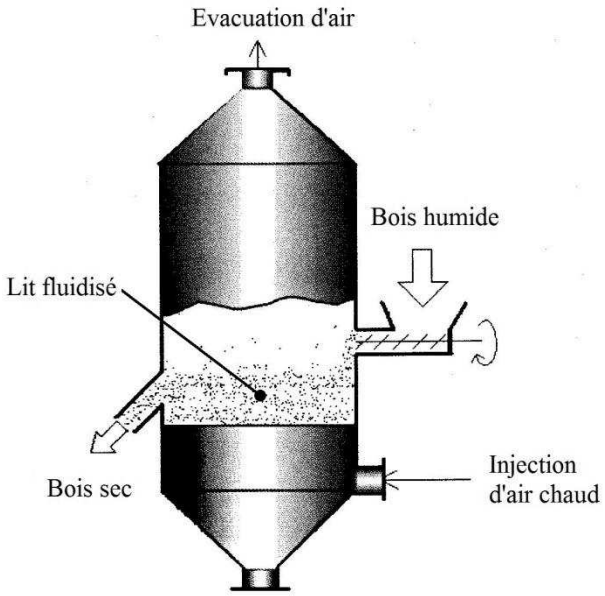


Figure 22 : Séchoir à lit fluidisé (d'après Mujumdar, 2007)

Dans un séchoir à lit fluidisé, le produit granulaire est mis en suspension par un gaz vecteur de chaleur. Habituellement, le gaz vecteur est un puissant courant d'air ascendant qui traverse le lit de particules de bois : le lit a un comportement similaire à un fluide visqueux. La condition *sine qua none* est que la vitesse d'air soit plus élevée (de deux à quatre fois) que la vitesse minimum de fluidisation. Celle-ci dépend de la viscosité de l'air et principalement des caractéristiques des particules : la fluidisation est d'autant plus aisée que les particules sont petites, sphériques et d'une faible densité. Ainsi, la taille maximale des particules est limitée par le flux d'air chaud disponible : couramment, cette taille s'étend de 50 à 2000 µm. *A contrario*, les particules plus petites sont soufflées : la vitesse d'air est supérieure à leur vitesse terminale de chute.

Les séchoirs à lit fluidisés conventionnels sont constitués d'une tour de séchage verticale (Figure 22). Le bois humide pénètre par le haut de la tour et le produit sec est évacué en bas : il s'agit d'une configuration *contre-courant*. Pour que la vitesse d'air soit uniforme dans le séchoir, la base de la tour doit être équipée d'un distributeur. Ainsi, pour un type de particule donné, où qu'elle soit injectée dans la section de la tour, son temps de séjour sera identique. Il est donc important que la variabilité des géométries de particules soit réduite pour que cette durée reste la même d'une particule à l'autre. En

effet, des différences de temps de séjour seraient une source d'hétérogénéité de la teneur en eau du bois à la sortie du séchoir.

Grâce à ce mélange intense de la biomasse granulaire, les coefficients de transferts externes atteignent des valeurs élevées. En termes d'échange de chaleur et de masse, le séchage en lit fluidisé est l'un des séchages convectifs les plus efficaces. En outre, le temps de séjour est faible compte tenu de la taille réduite des particules et de l'intensité de la convection. Ceci facilite le contrôle du procédé par ajustement du débit et de la température d'air puisque l'inertie du système est relativement faible. Néanmoins, l'injection de cet important débit d'air s'accompagne d'une quantité significative d'énergie électrique.

Les séchoirs à lit fluidisé sont adaptés au préconditionnement de particules de faibles dimensions. Ils sont par exemple utilisés pour le séchage des sciures et des copeaux dans les unités de pelletisation.

III-1-2-3 : Séchoir à lit fixe mobile

Un lit de particules non agité est traversé par un flux modéré d'air chaud : les particules de bois ne sont pas en suspension. La configuration d'un séchoir à lit fixe mobile est similaire à celle d'un séchoir à lit fluidisé excepté que la vitesse d'air est plus faible que la vitesse minimale de fluidisation. Le bois amassé dans la tour se déplace par gravité : il est introduit en haut de la tour et est déchargé à la base de celle-ci. Le temps de séjour est directement corrélé au débit de bois sec évacué. Les caractéristiques de l'écoulement d'air, quant à elles, ne régulent pas ce temps de séjour. Ainsi, même si c'est habituellement le cas, le flux d'air n'est pas nécessairement ascendant. Les particules sont immobiles les unes par rapport aux autres. Il est donc primordial que le flux d'air soit identique sur toute la section de la tour. L'efficacité du distributeur d'air placé à la base du séchoir conditionne l'homogénéité de la teneur en eau finale.

Le taux de remplissage de la tour étant élevé, le temps de séjour du bois peut y être important : de quelques heures à plusieurs jours. Le principal avantage des séchoirs à lit fixe mobile est leur capacité à utiliser de l'air à basse température (40 à 200 °C). L'énergie peut par exemple provenir d'installations solaires ou d'un système de récupération de chaleur fatale issue d'une unité industrielle annexe (tour de carbonisation, etc.). Ceci réduit le coût du séchage puisqu'une source de chaleur dédiée n'est pas nécessaire. Cependant, la durée importante du temps de séjour induit des coûts d'immobilisation de la biomasse. Mais, d'un point de vue économique, ceci est compensé par un faible coût d'investissement et par l'optimisation du volume du séchoir. Néanmoins, si le lit est très épais, les pertes de charges de l'air le long du séchoir sont importantes. La puissance électrique du ventilateur n'est donc pas négligeable.

Les séchoirs à lit fixe mobile sont adaptés au préconditionnement de particules de dimensions moyennes : en raison du faible coût de ce procédé, il s'agit d'une bonne alternative au séchage naturel des plaquettes forestières destinées à la combustion.

III-1-2-4 : Séchoir tunnel

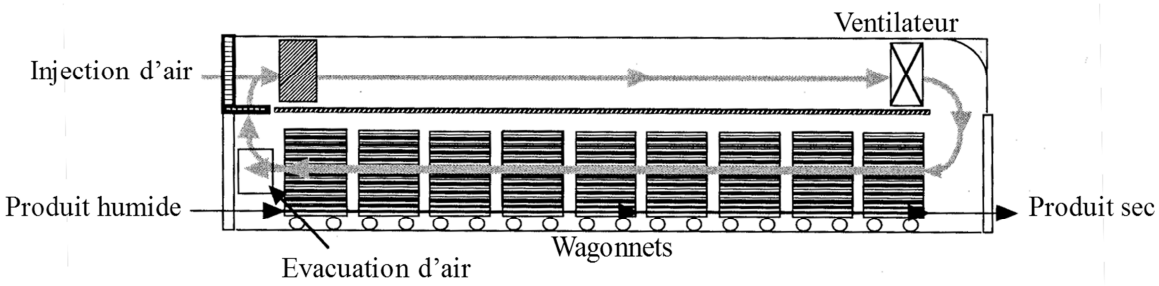


Figure 23 : Séchoir tunnel *type* en configuration contre-courant (d'après Mujumdar, 2007)

Le bois fragmenté traverse un tunnel de séchage (au moyen d'un tapis roulant ou de wagonnets) dans lequel circule de l'air chaud (Figure 23). Compte tenu du mode de transport du bois, le temps de séjour ne dépend pas de la géométrie et de la taille des particules. Ceci est un avantage lorsqu'il existe une dispersion importante de ces paramètres dans le lit de particules. En outre, ce type de séchoir peut facilement être configuré pour une large gamme de granulométries moyennes du lit : en tenant compte du temps caractéristique moyen de séchage des particules, la vitesse du système de convoyage peut être ajustée pour obtenir la teneur en eau désirée en sortie du tunnel. Néanmoins, la vitesse d'air définit la taille minimale de particule : celles-ci ne doivent pas être soufflées. De ce fait, il est très difficile d'y sécher des sciures ou des copeaux de bois. Enfin, ces séchoirs peuvent supporter des particules de grandes tailles en raison de leur robustesse mécanique. En effet, les particules sont immobiles au sein du lit et ne risquent donc pas d'endommager des éléments de l'installation.

La flexibilité est donc l'avantage principal des tunnels de séchage.

L'efficacité de ce type de séchage est principalement déterminée par la configuration aéraulique. L'air chaud peut être injecté autour ou à travers le lit. Dans le premier cas, les transferts de chaleur et de masse entre le bois et l'air ne sont pas optimaux : il existe une grande disparité des conditions climatiques à travers le lit provoquant une hétérogénéité de teneur en eau entre son centre et sa périphérie en sortie du séchoir. Pour éviter ce constat, le lit doit être fin. Avec la seconde configuration, l'hétérogénéité de teneur en eau constatée est plus faible car le flux d'air est forcé à travers le lit. Pour réduire davantage cette hétérogénéité, le tunnel peut être compartimenté, ce qui permet de faire circuler l'air à travers le lit du haut vers le bas dans une partie du séchoir et inversement dans une autre. Ainsi, le lit peut être plus épais, ce qui se traduit, pour un flux de biomasse donné, par moindre un encombrement au sol de l'installation.

Suivant le sens de circulation de l'air par rapport à celui du bois, deux configurations aérauliques peuvent être définies : co-courant et contre-courant. Le long du séchoir, l'air échange de la chaleur et de l'eau à la surface des particules et de l'enveloppe du séchoir. La configuration aéraulique, par l'intermédiaire de l'évolution spatiale des conditions climatiques le long du tunnel, détermine la cinétique de séchage du bois fragmenté.

Les séchoirs tunnel sont préconisés pour le préconditionnement d'une biomasse forestière dont la granulométrie est moyenne à grande : de la plaquette forestière au billon.

Dans le cadre de ce doctorat, nous nous limiterons à l'étude des lits condensés. Ceci concerne les séchoirs à lit fixe mobile et les séchoirs tunnel.

III-2 : Conception et optimisation des séchoirs en continu

III-2-1 : Complexité liée au séchage en continu du bois énergie

À la complexité des variations temporelles de teneur en eau au sein du produit se superpose celle des variations spatiales des paramètres de l'écoulement d'air à la surface des particules. Ces deux types de variations le long du séchoir sont intimement liés et une modification de la matière première entraine l'apparition de nouveaux profils de conditions climatiques : si la vitesse de séchage est contrôlée par les transferts internes, une réduction de la granulométrie du produit peut être envisagée ; faut-il encore être capable de déceler ce contrôle des transferts internes.

En outre, lorsqu'il s'agit de sécher de la biomasse forestière, il ne faut pas perdre de vue que l'origine naturelle de la matière première se traduit souvent par une hétérogénéité de la teneur en eau initiale au sein du lit. Or, cette hétérogénéité doit impérativement être prise en compte en entrée de séchoir pour prédire sa valeur en sortie. De plus, lorsque les particules de bois séchées sont de grande dimension, il peut être important d'estimer l'hétérogénéité de teneur en eau dans leur section.

Enfin, le sur-séchage doit, coûte que coûte, être évité pour réduire le temps de séjour, optimiser le flux matière de l'installation et effectuer des économies d'énergie. Il faut garder à l'esprit que l'énergie peut représenter jusqu'à 70 % du coût du cycle de vie d'un séchoir convectif (Mujumdar, 2007).

Pour les ingénieurs, le design des séchoirs en continu adaptés à la biomasse forestière et le choix des conditions climatiques à appliquer sont donc particulièrement fastidieux.

III-2-2 : Outils d'aide à la conception et à l'optimisation de séchoirs

III-2-2-1 : Abaques et retour sur expérience

L'expérience des constructeurs de séchoirs n'est à sous-estimer sous aucun prétexte. Il s'agit de la principale source d'inspiration pour le design de nouveaux séchoirs et l'intuition de ces professionnels est très généralement pertinente. Ce retour sur expérience permet la création d'abaques qui reflètent le savoir-faire de chaque entreprise.

Néanmoins, de manière empirique, l'identification de solutions techniques et l'estimation du gain obtenu sont très coûteuses en temps et en argent.

III-2-2-2 : Prédiction des cinétiques de séchage par la modélisation

Les outils numériques peuvent constituer une aide précieuse aux ingénieurs pour le dimensionnement de leur équipement et pour l'optimisation des conditions climatiques à y appliquer.

III-2-2-2-a : À l'échelle de la particule

- *Méthodes numériques*

À l'échelle de la particule de bois, les modèles à éléments ou volumes finis sont utiles pour prédire l'évolution du champ de teneur en eau et de contraintes au sein de la particule. Ils permettent une meilleure compréhension des mécanismes du séchage (Patankar, 1980 ; Prat, 1991 ; Turner, 1996). S'ils comportent un module de calcul dédié à la mécanique des solides déformables, ces modèles sont capables de prévoir la probabilité d'apparition des fentes et l'intensité des déformations en fonction des conditions de séchage (Salin, 1992 ; Pang, 2000). Il est ainsi possible d'identifier les conduites de

séchage prévenant ou limitant l'apparition de ces défauts. Cette capacité est bénéfique pour le séchage du bois d'œuvre. Cependant, l'inconvénient majeur des modèles à éléments ou volumes finis réside dans leur temps de calcul important.

L'équipe d'accueil dispose d'un tel outil numérique, développé par P. Perré : *TransPore* (Perré, 1987 ; Perré et Degiovanni, 1990 ; Perré et Turner, 1999). Il permet de simuler les transferts couplés de chaleur et de masse en milieu poreux. Par ailleurs, il peut éventuellement être couplé à un module de réactions chimiques (Rousset *et al.*, 2006) et à un module mécanique (Perré et Passard, 1995 ; Mauget et Perré, 1999) pour simuler respectivement les réactions de dégradation de la matière lignocellulosique à haute température et les déformations de la pièce de bois. Une présentation de *TransPore* est disponible en Annexe I.

En dépit de la complexité de ces approches, certains phénomènes sont difficiles à prendre en compte. Par exemple, l'impact des fentes sur la cinétique de séchage ne peut être prédit par les modèles continus en raison de la nature discrète des fissures. Seules les méthodes utilisant des éléments discrets ou les méthodes FEM avec réadaptation itérative du maillage au cours de la simulation sont conçues pour résoudre ce problème mais les temps de calcul sont particulièrement élevés (Wittel, Kun, *et al.*, 2003 ; Wittel, Schulte-Fischedick, *et al.*, 2003 ; Wittel *et al.*, 2005).

– *Méthodes analytiques*

Les modèles analytiques, utilisant le concept de courbe caractéristique de séchage, permettent de prédire l'évolution temporelle des paramètres moyens de la particule de bois (Sander, 2007).

La notion de *courbe caractéristique de séchage* est introduite par Van Meel (Van Meel, 1958). L'auteur a montré que, pour une plage de conditions de climatiques restreinte, les cinétiques obtenues (vitesse moyenne de séchage en fonction de teneur en eau moyenne) peuvent être réduites, au moyen d'une normalisation appropriée, en une courbe unique : la courbe caractéristique de séchage. L'utilisation de cette courbe permet donc d'étendre la description globale du processus de séchage de pièces de bois pour une gamme d'humidité relative et de température d'air avoisinant les conditions climatiques choisies pour son identification.

Les modèles analytiques tiennent compte de l'effet des déformations, des retraits et des fentes sur la cinétique de séchage. En revanche, ils ne sont pas capables de prédire l'occurrence ni l'intensité de ces phénomènes. Ces modèles ne sont donc pas utilisables pour optimiser la qualité de séchage du bois d'œuvre mais peuvent être adaptés au séchage du bois énergie.

L'approche globale du séchage à l'échelle de la particule permet de limiter le nombre d'équations différentielles décrivant le système. Ainsi, la résolution de ces équations de conservation sur la durée du séchage nécessite un temps de calcul très réduit. L'emploi de ce type de modèle est donc adapté à l'étude du séchage simultané de plusieurs milliers de particules, tel que c'est le cas pour le bois énergie.

Cependant, dans la formulation de ces modèles analytiques, il est souvent supposé que l'intégralité de l'énergie échangée entre l'air et le bois est utilisée pour évaporer l'eau. Cette lacune entraine une faible concordance entre les cinétiques simulées et les résultats expérimentaux au cours de certaines périodes de séchage et notamment pendant la phase de mise en régime du bois (Saastamoinen et Impola, 1997 ; Chen, 2005). En outre, sans tenir compte de la chaleur sensible, les modèles ne permettent ni de simuler fidèlement l'évolution de la teneur en eau du bois si la température d'air varie, tel que l'on peut le constater le long des séchoirs en continu, ni de prédire les phénomènes de condensation ou de mise en régime.

III-2-2-2-b : À l'échelle du séchoir

À l'échelle du séchoir, de nombreux modèles ont d'ores et déjà été développés par la communauté scientifique afin de simuler le procédé. Ces modèles sont capables de prédire l'évolution des paramètres du bois et de l'air lors de leur séjour dans l'enceinte. Ce type d'information permet aux ingénieurs de lever voire d'anticiper les verrous techniques pour garantir un fonctionnement optimal du séchoir.

– *Logiciels commerciaux et codes ouverts*

Certains modèles, tels que le modèle *dryPAK*, *Symprosis* ou *DrySel* (Zhen-Xiang et Mujumdar, 2008), sont développés en vue d'être commercialisés. Ils sont généralement (relativement) faciles d'utilisation, notamment grâce à l'intégration d'une interface graphique. En outre, chacun de ces logiciels tente de se démarquer de ses concurrents, « simplement » en offrant la possibilité d'être adaptés à une grande diversité de séchoirs, ou comme dans le cas de *dryPAK* (Pakowski, 1999), en prédisant la consommation des équipements électriques annexes, tel que les ventilateurs.

Parallèlement à la commercialisation de ces logiciels, des codes ouverts sont développés par des équipes de recherche qui en restent propriétaires (Perré et Rémond, 2006 ; Pang *et al.*, 2008). Certes l'utilisation de ces codes ouverts est souvent moins intuitive. Cependant, contrairement aux logiciels commercialisés, ils ont notamment vocation à être adaptés à des configurations originales dans le cadre du développement d'un nouveau type d'équipement. Ils deviennent alors des outils précieux pour la compréhension des phénomènes mis en jeu au sein des réacteurs. À titre d'exemple, ils peuvent expliquer d'éventuels emballements thermiques lors du séchage à haute température.

– *Intérêt d'une approche multi-échelle*

Les paramètres de la masse d'air évoluent selon la direction d'écoulement. Ce profil de conditions climatiques dépend des transferts de chaleur et de masse au niveau des surfaces d'échange (les particules de bois et la paroi du séchoir) et réciproquement : l'humidité relative et la température de l'air influencent la vitesse de séchage de chaque particule et vice-versa. Par conséquent, pour simuler le séchage en continu d'un lit de particules de bois, le couplage bidirectionnel entre les deux échelles spatiales (particule ↔ séchoir) doit être considéré.

Certaines approches numériques utilisent le concept de micro-modèles distribués pour traiter ce couplage (Perré et Rémond, 2006 ; Perré, 2007b). Elles permettent la simulation de situations qui sont très proches des configurations industrielles. En effet, il est possible de prédire l'évolution des paramètres du bois au cours du séchage pour chaque particule. Chacune de ces particules peut avoir son identité propre, ce qui constitue un gain indéniable dans le cadre du séchage du bois énergie : d'une part, le matériau présente une forte variabilité naturelle (densité, teneur en eau initiale, perméabilité gazeuse et liquide, etc.) et, d'autre part, les modes de production des particules (tronçonnages, broyage, etc.) ne peuvent garantir une parfaite homogénéité de taille et de géométrie des particules. Cette prise en compte de l'identité propre de chaque particule constitue un avantage par rapport aux modèles qui considèrent le produit à sécher comme homogène macroscopiquement, ce qui est généralement le cas les logiciels commerciaux.

Conclusion du chapitre 1

À travers la diversité des modes de valorisation de la biomasse forestière et l'aspect stratégique des énergies produites, il apparait évident qu'une intense pression s'exercera sur le gisement. Par ailleurs, à ces défis énergétiques se superpose celui de la chimie du végétal. En effet, il y a fort à parier que le carbone renouvelable se substituera de plus en plus au carbone d'origine fossile et que les bioproduits (plastiques, lubrifiants, solvants, etc.) s'imposeront sur nos étals. Or la biomasse est la seule source de carbone renouvelable.

De ce fait, il est primordial que toutes ces filières optimisent leurs rendements pour pouvoir envisager un partage de la ressource. Nous avons pu montrer que la qualité du préconditionnement conditionnera l'optimisation de ces rendements pour les modes de valorisation par voie sèche. Le séchage s'impose alors comme une technique efficace et peu coûteuse dès lors qu'il est bien maîtrisé. Pour s'en assurer, nous avons montré que les outils de simulation se révèlent être d'une aide précieuse. Cependant, ces outils, traditionnellement appliqués à l'étude du séchage du bois d'œuvre, dévoilent leurs limites lorsqu'il s'agit de simuler le séchage simultané d'un grand nombre de pièces de bois en conditions climatiques variables.

Par ailleurs, il ne faut pas perdre de vue le fait que l'étude du séchage de bois fragmenté n'intéresse pas seulement les procédés de conversion thermochimique. Le matériau peut être déstructuré pour être mis en œuvre dans des composites. À titre d'exemple, pour 2009, les productions mondiales de panneaux MDF et de panneaux de particules sont respectivement estimées à 59 et 92 Mm^3 (FAO, 2011).

Chapitre 2 : Etude du séchage de particules isolées

Introduction du chapitre 2

Afin de pouvoir prédire le comportement d'un lit de bois fragmenté le long d'un séchoir en continu, il est primordial de pouvoir simuler le séchage de particules isolées et d'estimer les flux locaux à la surface de celles-ci. Le modèle en question doit être capable de prédire l'évolution de la teneur en eau et de la température d'une particule en conditions climatiques variables, sur une large plage de conditions climatiques. Ceci implique que le code soit capable de prédire les transferts couplés masse/chaleur dans la particule et intègre l'effet de la pression de gaz sur les transferts internes dans le cas du séchage à haute température. En raison de la très forte anisotropie des propriétés de transfert dans le bois et de la géométrie des particules, la description du milieu dans le code doit être tridimensionnelle. Le laboratoire d'accueil dispose d'un tel outil numérique : *TransPore*. Cependant, étant un modèle de type *volumes finis*, son temps de calcul important n'est pas compatible avec la nécessité de simuler simultanément le séchage de plusieurs milliers de particules, telles qu'on peut en dénombrer dans un séchoir à biomasse. Aussi, il n'est pas adapté à décrire les transferts dans des particules de géométries parfois complexes et pouvant se fissurer au cours de séchage sévères.

Pour ce travail, nous préférons donc à *TransPore* un modèle semi-analytique reposant sur le concept de courbe caractéristique de séchage (Van Meel, 1958). En effet, nous pouvons espérer que ce dernier présente un temps de calcul est très faible.

Après avoir décrit le modèle original de Van Meel, son intérêt et ses limites, nous présenterons l'extension proposée pour ce modèle. Puis nous nous attarderons sur la méthode d'identification des paramètres de ce nouveau modèle. Nous terminerons ce chapitre en démontrant sa pertinence pour notre application et en éprouvant sa robustesse.

I : Description du modèle de Van Meel étendu

I-1 : Modèle original de Van Meel

I-1-1 : Formulation

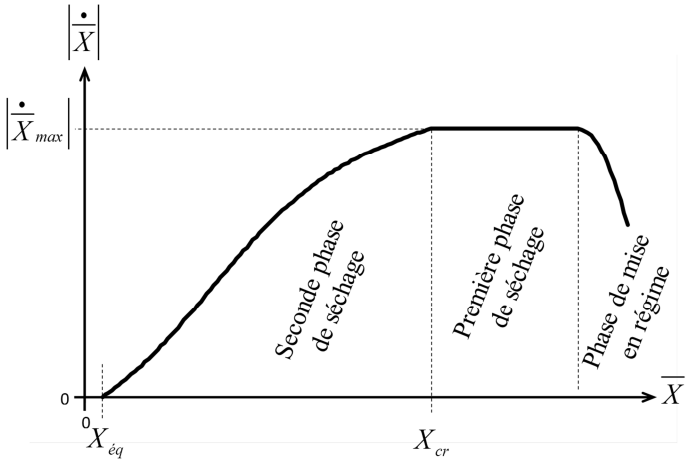


Figure 24 : Evolution *type* de la vitesse de séchage (valeur absolue)

I-1-1-1 : Utilisation des courbes caractéristiques de séchage

Le modèle de Van Meel permet de calculer la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau du bois (Van Meel, 1958 ; Figure 24). Cette vitesse de séchage $\dot{\overline{X}}$ est liée à la vitesse maximale de séchage $\dot{\overline{X}}_{max}$ grâce à la courbe caractéristique de séchage *g* identifiée à partir de résultats expérimentaux (Equation 2.1). Cette vitesse maximale de séchage, également appelée vitesse de première phase peut être mesurée lorsque l'intégralité de la surface de la particule est alimentée en eau libre. L'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau contenue dans le bois est alors minimale et correspond à la chaleur latente de vaporisation. La valeur de la vitesse de première phase dépend uniquement de la surface de la particule, de l'écart psychométrique et des coefficients de transferts externes.

$$\dot{\overline{X}} = \dot{\overline{X}}_{max} \times g(\phi) \quad \Leftrightarrow \quad g(\phi) = \dot{\overline{X}} \Big/ \dot{\overline{X}}_{max} \tag{2.1}$$

La fonction *g* (adimensionnelle) sert à l'estimation de l'évolution de la vitesse de séchage quand la teneur en eau à la surface de la particule de bois diminue. Sa valeur est égale à 1 en première phase de séchage.

I-1-1-2 : Notion de teneur en eau adimensionnelle et critique

La variable ϕ représente la teneur en eau adimensionnelle :

$$\phi = \begin{cases} 1 \quad si \quad \overline{X} > X_{cr} \\ \dfrac{\overline{X} - X_{éq}}{X_{cr} - X_{éq}} \quad si \quad \overline{X} < X_{cr} \end{cases} \tag{2.2}$$

La teneur en eau critique est la teneur en eau en deçà de laquelle la vitesse de séchage est inférieure à la vitesse maximale de séchage (Figure 24). Elle correspond au premier instant où une partie de la surface de la particule n'est plus alimentée en eau liquide par capillarité. L'usage de cette teneur en eau adimensionnelle permet de normaliser l'intervalle de la seconde phase de séchage, quelles que soient les valeurs des teneurs en eau critique et d'équilibre.

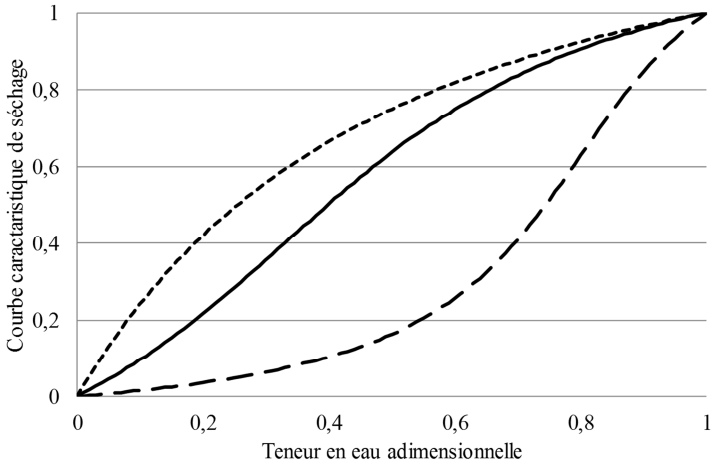


Figure 25 : Exemples de comportements de séchage lors de la seconde phase

De même *g* est une normalisation de la vitesse de séchage, ses valeurs étant comprises entre 1 (lors de la première phase de séchage) et 0 (à l'équilibre). Ceci facilite la comparaison des comportements de différents matériaux soumis aux mêmes conditions climatiques (Figure 25).

I-1-2 : Intérêt et limites du modèle original

Nous pouvons noter que la température n'impacte pas directement le modèle. Or, lors du séchage du bois, il existe un fort couplage entre les transferts de chaleur et de masse. Pour de nombreux modèles analytiques, tels que le modèle de Van Meel, ce couplage est implicite. Ils ne prennent pas en compte l'évolution de la température du bois car la phase de mise en régime et les variations de conditions de séchage en cours de procédé sont exclues de leur domaine de validité. La principale hypothèse est donc que toute la chaleur transférée de l'air vers le bois est utilisée pour évaporer l'eau. Ceci est pertinent tant que la température de séchage est constante.

Cependant, le but de cette étude du séchage de particules isolées est de développer un modèle semi-analytique pouvant être implémenté dans un modèle double-échelle capable de simuler la perte de teneur en eau le long d'un séchoir en continu qui peut atteindre une longueur (ou hauteur, suivant la configuration) de 20 à 25 m. Ce type de séchoir implique de larges variations de la température du bois. Ceci est dû aux variations spatiales de la température de l'écoulement d'air le long du séchoir et à la phase de mise en régime dans la première partie du séchoir (alimentation ininterrompue en particules froides).

Le choix du modèle de Van Meel dans sa version original comme base de travail est tout de même pertinent compte tenu de son faible temps de calcul : une fois implémenté dans un modèle à double-échelle, il permettrait de simuler le séchage simultané d'un grand nombre de particules. Mais pour être adapté à la configuration des séchoirs en continu, nous décidons d'améliorer ce modèle de Van Meel.

I-2 : Amélioration du modèle original : couplage explicite entre transferts de chaleur et de masse

Par *amélioration*, nous entendons l'*extension* du domaine de validité du modèle de Van Meel à la phase de mise en régime et aux variations climatiques de conditions en cours de procédé. Pour y parvenir, nous conservons le concept de courbe caractéristique de séchage et nous tenons compte du couplage entre transferts de chaleur et de masse de façon explicite.

I-2-1 : Formulation du modèle non simplifié

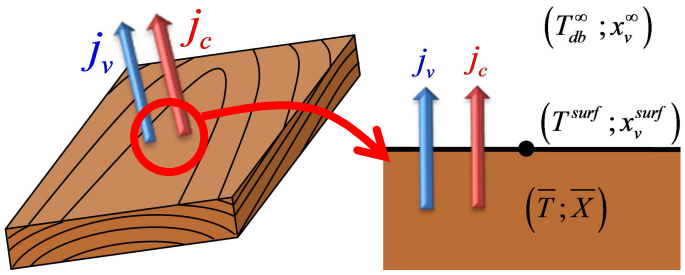


Figure 26 : Flux de chaleur et de masse à la surface de la particule

La simulation du séchage consiste à suivre la teneur en eau et la température du bois par calcul numérique en estimant l'intensité des flux de masse et de chaleur à la surface de la particule (Figure

26). Les équations de conservation de chaleur et de masse sont écrites en considérant le bois humide comme un milieu diphasique : l'eau et la matière lignocellulosique anhydre.

I-2-1-1 : Equation de conservation de la masse

L'équation de conservation de masse rend compte du flux de vapeur d'eau moyen échangé entre l'air et l'échantillon (j_v). Elle indique que l'intégration des flux de vapeur à la surface de la particule est égale à la variation de la masse d'eau de cette dernière :

$$j_v \times Surf_{part} = -\dot{\overline{X}} \times m_0 \tag{2.3}$$

I-2-1-1-a : À basse température

Quand la température est basse, le mode de transfert de la vapeur dans la couche limite est essentiellement de type diffusif. Dans ce cas, l'intensité du flux de vapeur j_v est fonction de la différence des fractions molaires de vapeur x_v dans la couche limite d'air à la surface de la particule (*surf*) et dans l'air (∞) :

$$j_v = h_m \times C \times M_v \times \left(x_v^{surf} - x_v^{\infty} \right) \tag{2.4}$$

h_m est le coefficient de transfert externe de masse, C la concentration molaire de l'air et M_v la masse molaire de l'eau.

La fraction molaire de vapeur peut être écrite à partir des pressions partielles :

$$x_v = \frac{P_v}{P_{atm}} \tag{2.5}$$

A partir des Equations 2.3, 2.4 et 2.5 nous pouvons déduire la forme suivante de l'équation de conservation de la masse :

$$\dot{\overline{X}} \times m_0 = -h_m \times C \times M_v \times Surf_{part} \times \left(\frac{P_v^{surf}}{P_{atm}} - \frac{P_v^{\infty}}{P_{atm}} \right) \tag{2.6}$$

I-2-1-1-b : Description de l'activité de surface

Nous proposons d'évaluer la pression de vapeur à la surface de la particule en fonction de la teneur en eau adimensionnelle en introduisant l'activité de surface a. La notion d'activité de surface dérive donc du concept de courbe caractéristique de séchage décrit par Van Meel. Dans la couche limite, cette fonction (adimensionnelle) permet de lier la pression de vapeur à la pression de vapeur saturante. Elle dépend de l'humidité relative *HR* et de la teneur en eau adimensionnelle :

$$P_v^{surf} = a\left(\phi, HR\right) \times P_{vs}\left(T^{surf}\right) \tag{2.7}$$

Toutes les propriétés de transfert de chaleur et de masse du matériau ainsi que la géométrie de l'échantillon sont contenues dans la valeur de l'activité de surface. Cette fonction décroît tout au long du séchage, de la valeur 1, quand l'intégralité de la surface de la particule est alimentée par capillarité en eau libre, à la valeur de *HR*, strictement inférieure à un, quand le bois est en équilibre avec l'air.

Des Equations 2.6 et 2.7, on en déduit l'Equation 2.8 :

$$\dot{\overline{X}} \times m_0 = -h_m \times C \times M_v \times Surf_{part} \times \left(\frac{a(\phi, HR) \times P_{vs}\left(T^{surf}\right)}{P_{atm}} - \frac{P_v^{\infty}}{P_{atm}} \right) \quad (2.8)$$

I-2-1-1-c : Généralisation à une gamme de conditions plus larges

Si la température de séchage augmente au-delà de 100 °C, le mode prépondérant de transfert de la vapeur dans la couche limite n'est plus la diffusion mais devient la convection (Bird *et al.*, 2002). Pour tenir compte de l'ensemble des cas possibles, l'Equation 2.4 peut être généralisée :

$$j_v = h_m \times C \times M_v \times \ln \frac{1 - x_v^{\infty}}{1 - x_v^{surf}} \quad (2.9)$$

L'Equation 2.8 devient :

$$\dot{\overline{X}} \times m_0 = -h_m \times C \times M_v \times Surf_{part} \times \ln \frac{P_{atm} - P_v^{\infty}}{P_{atm} - a(\phi, HR) \times P_{vs}\left(T^{surf}\right)} \quad (2.10)$$

I-2-1-2 : Equation de conservation de la chaleur

Le bilan d'énergie prend en compte la chaleur latente de vaporisation de l'eau ainsi que la chaleur sensible du bois humide :

$$j_c \times Surf_{part} = -m_0 \times \left(c_{P,b} + \overline{X} \times c_{P,l}\right) \times \dot{\overline{T}} + m_0 \times L_v\left(T^{surf}\right) \times \dot{\overline{X}} \quad (2.11)$$

L'intensité du flux de chaleur moyen à la surface de la particule (j_c) est proportionnelle à la différence des températures dans la couche limite (*surf*) et dans l'air (∞) :

$$j_c = -h_c \times \left(T_{db}^{\infty} - T^{surf}\right) \quad (2.12)$$

À partir des Equations 2.12 et 2.11 nous pouvons déduire la forme suivante de l'équation de conservation de la chaleur :

$$m_0 \times \left(c_{P,b} + \overline{X} \times c_{P,l}\right) \times \dot{\overline{T}} - m_0 \times L_v\left(T^{surf}\right) \times \dot{\overline{X}} = h_c \times \left(T_{db}^{\infty} - T^{surf}\right) \times Surf_{part} \quad (2.13)$$

I-2-2 : Simplification du modèle

I-2-2-1 : Hypothèse de l'homogénéité des paramètres du bois et de l'air

Actuellement, les inconnues du modèle sont au nombre de trois ($\overline{X}$, $\overline{T}$ et T^{surf}) alors que le système ne comporte que deux équations. Pour simplifier le modèle, nous faisons l'hypothèse que la température de la particule est homogène :

$$T^{surf} = \overline{T} \quad (2.14)$$

Les Equations 2.10 et 2.13 deviennent respectivement :

$$\dot{\overline{X}} \times m_0 = -h_m \times C \times M_v \times Surf_{part} \times \ln \frac{P_{atm} - P_v^{\infty}}{P_{atm} - a(\phi, HR) \times P_{vs}(\overline{T})} \quad (2.15)$$

$$m_0 \times \left(c_{P,b} + \overline{X} \times c_{P,l}\right) \times \dot{\overline{T}} - m_0 \times L_v(\overline{T}) \times \dot{\overline{X}} = h_c \times \left(T_{db}^{\infty} - \overline{T}\right) \times Surf_{part} \quad (2.16)$$

La démonstration de cette expression de l'équation de conservation de la chaleur est consultable en Annexe II.

Le couple d'Equations 2.15 et 2.16 constituent le modèle de Van Meel étendu : il se caractérise, d'une part, par sa simplicité grâce à l'adoption du concept de courbe caractéristique décrit par Van Meel et, d'autre part, par la prise en compte du couplage entre transferts de chaleur et de masse de façon explicite.

I-2-2-2 : Intérêt, limite et alternative à l'hypothèse

L'hypothèse d'homogénéité des paramètres du bois et l'introduction de l'activité de surface constituent un niveau de simplification fondamental du modèle de Van Meel étendu par rapport aux modèles complets, tels que *TransPore*. En effet, il devient possible de résumer les phénomènes internes par l'intermédiaire des valeurs moyennes de teneur en eau et de température du bois.

Le système à deux équations et deux inconnues obtenu est particulièrement rapide à résoudre avec l'outil informatique. Ceci est en accord avec le cahier des charges du modèle attendu : réduire le temps de calcul du modèle *particule* pour obtenir un modèle *séchoir* interactif. Par ailleurs, l'hypothèse de l'homogénéité de la température est valide tant que la taille des particules est faible, c'est-à-dire si le nombre de Biot est inférieur à 0,1 (Bird *et al.*, 2002). Ceci est souvent le cas de la valorisation énergétique du bois.

En revanche, il existe des cas où les particules sont de grande dimension. Par exemple, avant d'être carbonisé, le bois peut se présenter sous forme de petits billons (cf. Chapitre 2 : II-1-1-2-a). Dans ce cas, l'hypothèse d'homogénéité de la température n'est plus valide. Une troisième équation est alors nécessaire pour lier $\overline{T}$ et T^{surf} en tenant compte de l'histoire de la particule lors du séchage. Pour identifier cette troisième équation, nous proposons de faire appel à une mémoire évanescente. Le travail en question est présenté dans l'Annexe III. Par manque de temps, les paramètres du modèle n'ont pas pu être identifiés et cette troisième équation n'est pas introduite dans le modèle.

Dans le cadre de cette étude, limitée dans le temps, l'hypothèse d'homogénéité de la température est maintenue quelles que soient la taille et la géométrie de la particule.

I-2-3 : Résolution numérique du système

La simulation du séchage est basée sur la résolution des équations de conservation précédemment établies (Equations 2.15 et 2.16). Ces équations sont discrétisées dans le temps en utilisant la formulation des séries de Taylor, tronquées au premier ordre, via un schéma explicite. L'état du système et les flux sont supposés constants entre les instants t (inclus) et $t+\Delta t$ (exclus).

$$\frac{\overline{X}(t+\Delta t) - \overline{X}(t)}{\Delta t} \times m_0 = -h_m \times C \times M_v \times Surf_{part} \times \ln \frac{P_{atm} - P_v^{\infty}}{P_{atm} - a(\phi(t), HR) \times P_{vs}(\overline{T}(t))} \quad (2.17)$$

$$h_c \times \left(T_{db}^{\infty} - \overline{T}(t)\right) \times Surf_{part} = m_0 \times \left(c_{P,b} + \overline{X}(t) \times c_{P,l}\right) \times \frac{\overline{T}(t+\Delta t) - \overline{T}(t)}{\Delta t} - m_0 \times L_v\left(\overline{T}(t)\right) \times \frac{\overline{X}(t+\Delta t) - \overline{X}(t)}{\Delta t} \quad (2.18)$$

Les Equations 2.17 et 2.18 ainsi discrétisées ont été codées en *Fortran 90* dans le programme de simulation *Wood_**particle**_drying* compilé au moyen du logiciel *Compaq Visual Fortran v6.6*.

En connaissant l'état initial du système et en résolvant les équations de conservation, nous pouvons donc prédire les valeurs des paramètres inconnus au pas de temps suivant, et ceci est réitéré jusqu'à l'état final. Pour ce faire, l'utilisateur spécifie l'état initial de l'échantillon (géométrie, température et teneur en eau) et indique l'évolution des paramètres de l'air (température, humidité relative et coefficients de transferts externes). Le modèle numérique bénéficie alors de tous les éléments pour simuler fidèlement le séchage d'une particule isolée tout en conservant un temps de calcul réduit.

La formulation de notre modèle et la résolution numérique du système d'équations étant décrites, la partie suivante présente comment déterminer l'activité de surface et les coefficients de transferts externes de chaleur et de masse.

Remarque : Lors de travaux préliminaires, nous avons testé la discrétisation des Equations 2.15 et 2.16 via un schéma totalement implicite. Les équations ainsi obtenues étant fortement couplées et non linéaires, elles étaient résolues selon la méthode de Newton-Raphson. Afin de réduire le temps de calcul, le pas de temps Δt était ajusté automatiquement de 0,1 à 1000 secondes selon les conditions de convergence du modèle. Quelle que soit la méthode de discrétisation, nous n'avons pas observé de différence au niveau de la qualité des prédictions. En revanche, nous avons noté que la méthode de Newton-Raphson est plus gourmande en temps de calcul que lorsque l'on choisit un schéma explicite, même si dans ce dernier cas le pas de temps est bridé à une valeur fixe de 10 secondes. Nous avons donc abandonné le la discrétisation selon un schéma implicite.

II : Identification des paramètres du modèle à partir de cinétiques expérimentales de séchage

L'activité apparente est une fonction d'ajustement qui dépend de l'intensité des transferts à la surface de la particule. Or, cette intensité des transferts dépend des conditions opératoires et de l'histoire de leurs variations, de la teneur en eau initiale, de la géométrie, de la taille, de l'essence de la particule, etc. L'activité de surface doit donc être identifiée à différents niveaux de température, pour diverses géométries et tailles de particules, etc.

II-1 : Obtention des cinétiques expérimentales

L'activité de surface utilisé dans le bilan de masse (Equation 2.15) est identifié à partir de cinétiques expérimentales de séchage de particules de bois isolées.

II-1-1 : Matériel végétal

II-1-1-1 : Planchettes de hêtre

II-1-1-1-a : Contexte local

En France, l'essentiel du bois énergie est et sera, lors de la décennie à venir, utilisé par combustion (cf. Chapitre 1 : I-2-1-1). La facilité de manutention et d'alimentation, de plus en plus automatisée, dans les chaudières, explique l'essor actuel de la transformation du bois de feu en plaquettes forestières. Outre les bois de tempête et les bois scolytés, ces plaquettes forestières sont essentiellement issues des produits de première éclaircie et des rémanents d'exploitation. De ce fait, la nature du gisement dépend principalement des ressources forestières ventilées par essence. En Meurthe-et-Moselle le hêtre est la deuxième essence forestière en termes de surface ou de volume, derrière le chêne, et la première en termes de production brute (IFN, 2010). Par ailleurs, l'agglomération nancéienne est bordée à l'Ouest par la forêt domaniale de Haye où le hêtre est l'essence principale (IFN, 2009). Ainsi, il existe un gisement potentiel aux abords directs de Nancy ; l'approvisionnement en ce type de matériel végétal est donc aisé. Enfin, cette essence est l'une des mieux étudiées par l'équipe 3B du LERFoB depuis deux décennies, sous différents angles et notamment le séchage (Agoua, 2001 ; Perré et Karimi, 2002 ; Perré et Thiercelin, 2006 ; Tarmian et Perré, 2009). Il existait préalablement à cette étude de nombreux outils expérimentaux et numériques adaptés à l'étude du bois de hêtre.

C'est dans ce contexte local que nous avons choisi d'étudier le comportement des plaquettes forestières de hêtre lors de leur séchage.

II-1-1-1-b : Préparation des échantillons

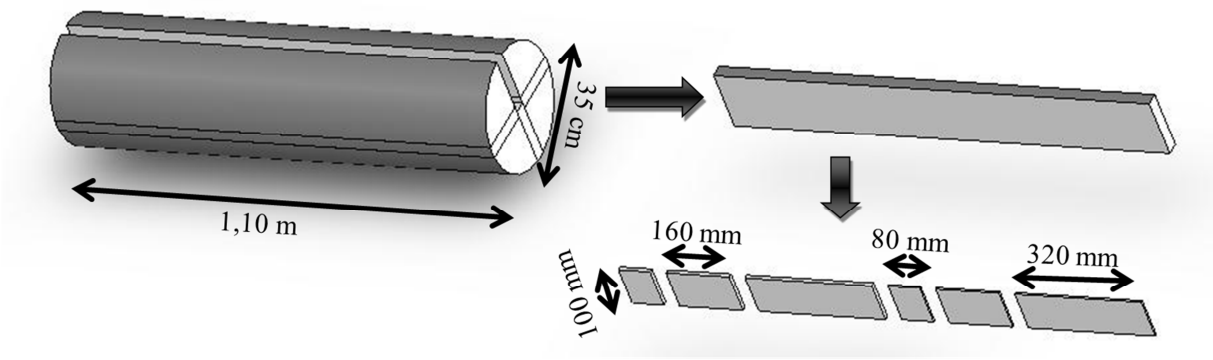


Figure 27 : Débit du billon de hêtre

Un billon vert de hêtre issu de la forêt domaniale de Haye est sélectionné pour cette étude (Figure 27). Il a un diamètre moyen de 35 cm pour une longueur de 1,10 m.

En tenant compte des contraintes liées au dispositif expérimental, les échantillons sont usinés sous forme de planchettes fines (cf. Chapitre 2 : II-1-2-2-a). À partir des cinétiques obtenues nous déduirons le comportement des plaquettes forestières.

Dans un premier temps, quatre planches diamétrales d'une épaisseur de 3 cm sont débitées au moyen d'une scie à ruban. Elles sont numérotées de 1 à 4, les couples (1 ; 2) et (3 ; 4) étant diamétralement opposés. Puis ces planches sont usinées (dégauchies, rabotées et sciées) afin d'obtenir la dimension finale des échantillons (Tableau 7).

Longueur (L)	Largueur (R)	Epaisseur (T)
80, 160 ou 320 mm	100 mm	5 ou 10 mm

Tableau 7 : Dimensions des échantillons de hêtre

Quelques précautions s'imposent lors de cet usinage. D'une part, les bords de chaque planche sont éliminés pour exclure des échantillons la moelle et le bois juvénile vers le centre du billon et l'aubier vers sa périphérie. D'autre part, nous prenons garde à conserver un débit sur quartier parfait lors de la réduction de la taille des planches. Ce type de débit, contrairement au débit sur dosse, permet de limiter les variations du rapport bois initial sur bois final, notamment pour les planchettes de faible épaisseur.

Les résultats obtenus à partir de ce pool d'échantillons permettront de caractériser l'influence de la longueur et de l'épaisseur sur l'activité de surface. Afin d'accentuer l'effet de la longueur, une couche de résine époxyde (*Pattex Epoxy Pro*) est apposée aux extrémités des échantillons de 320 mm. Ceci annule les transferts de masse dans la direction longitudinale, ce qui permet d'obtenir expérimentalement le comportement une planche infiniment longue.

Les échantillons obtenus sont à l'état vert mais, comme ils proviennent du duramen, ont une teneur en eau d'environ 60 %, valeur éloignée de la teneur en eau à saturation. Cette teneur en eau est même, *a priori*, inférieure à la teneur en eau critique définie dans la formulation de notre modèle. Les résultats que l'on obtiendra seront donc tronqués, car il n'y aura pas de première phase : les résultats obtenus ne permettront pas l'indentification de l'intégralité de l'activité de surface. Les échantillons sont donc séparés en deux groupes. Ceux du premier groupe sont séchés tels quels. Ceux du second groupe sont saturés et atteignent une teneur en eau d'environ 110 % (*a priori* supérieure à la teneur en eau critique) avant d'être séchés. Pour ce faire, ils sont placés dans une cloche à vide et sont immergés dans de l'eau déminéralisée. Ils subissent alors des cycles de vide/pression pendant une semaine environ. Compte tenu de la taille limitée de la cloche à vide, aucun échantillon de 320 mm n'a subi ce traitement. La répartition des échantillons est présentée dans le Tableau 8. Chaque catégorie contient des échantillons de 5 et 10 mm d'épaisseur.

L = 80 mm	L = 160 mm	L = 320 mm
Saturés / Non saturés	Saturés	Non saturés (extrémités encollées)

Tableau 8 : Etat des échantillons avant le séchage

Ceci permet, en outre, de tester l'influence de la teneur en eau initiale sur la cinétique de séchage.

Pour une géométrie donnée, les échantillons jumeaux sont sélectionnés selon la même direction longitudinale. Dans cette direction, les variations de propriétés du bois sont bien moins importantes que dans le plan transverse (Siau, 1984 ; Skaar, 1988). Cette précaution permet donc d'attribuer les modifications de la cinétique de séchage au changement de valeur du paramètre étudié et non à la variabilité naturelle du bois.

II-1-1-2 : Billons d'eucalyptus

II-1-1-2-a : Contexte « exotique »

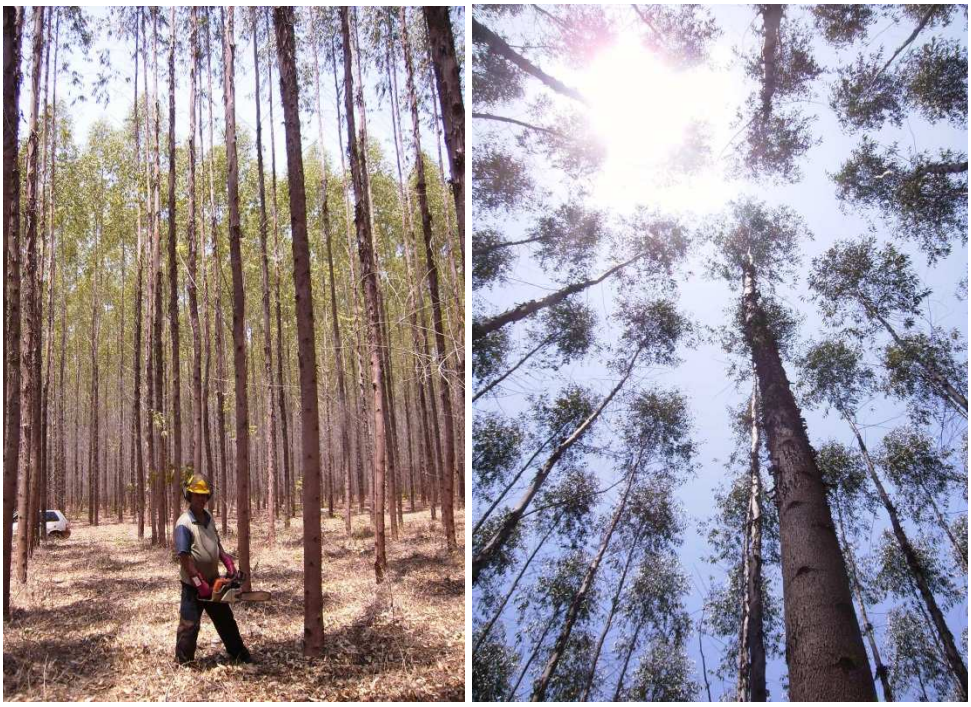


Figure 28 : Taillis à courte révolution d'eucalyptus (6 ans)



Figure 29 : Augmentation des surfaces de plantation d'eucalyptus au Brésil (ABRAF, 2010)

Au Brésil, les surfaces d'eucalyptus cultivés en taillis à courte révolution (TRC) ne cessent de s'accroître (Figures 28 et 29). Le choix de cette essence s'explique par son extrême productivité, il n'est pas rare qu'elle atteigne 40 $m^3.ha^{-1}.an^{-1}$ (ABRAF, 2010). Dans la plupart des cas, la biomasse produite est destinée à la filière papetière, convertie en énergie thermique par combustion ou, ce qui nous intéresse ici, transformée en charbon, à hauteur respective de 49, 30 et 19 % (ABRAF, 2010). En

effet, dans ce pays, la sidérurgie est l'un des secteurs les plus gourmands en charbon, 9,6 Mt en 2008, (Ministério de Minas e Energia, 2010) et la houille traditionnellement utilisée dans les hauts fourneaux pour réduire l'oxyde en fer tend à être substituée par du charbon de bois. Ce virage résulte de la mise en application du protocole de Kyoto (UN, 1997b) et l'avènement des crédits « carbone ». Le bon développement de cette filière alternative est favorisé notamment par des conditions de production de biomasse facilitées. L'installation de peuplement d'eucalyptus est possible sur de grandes superficies, notamment les terres agricoles du Sudeste, et la productivité de ces plantations est forte grâce au climat tropical.

Cependant, cette transition n'est pas sans écueil technologiques : l'eau contenue dans le bois (nécessaire à la vie de l'arbre) et surtout l'hétérogénéité de la teneur en eau altèrent la qualité du procédé de carbonisation et *a fortiori* celle de l'acier.

L'équipe d'accueil a donc été contactée par *Vallourec & Mannesmann Tubes* pour qu'elle identifie les solutions techniques adéquates à l'optimisation de la phase de séchage de l'unité industrielle implantée dans l'Etat du Minas Gerais.

La difficulté repose notamment sur la géométrie des particules. Dans les hauts fourneaux, le charbon joue à la fois un rôle chimique (réduction de l'oxyde de fer) et mécanique (soutien du lit). Pour cette dernière fonction, il est donc nécessaire que la granulométrie du charbon soit supérieure à un seuil. Le processus de carbonisation, d'un autre côté, produit des fragments d'autant plus petits que la particule carbonisée est petite. Il existe donc une taille minimale pour les particules soumises au séchage puis à la carbonisation. Généralement, la longueur caractéristique doit être supérieure à 10 cm et parfois il peut s'agir de billons de bois de 2 m de long et 20 cm de diamètre. Bien évidemment, cette granulométrie importante est contraire aux prérequis d'un séchage rapide.

II-1-1-2-b : Préparation des échantillons

Dans le cadre du contrat de collaboration liant *AgroParisTech* à *Vallourec & Mannesmann Tubes*, quatre eucalyptus ont été abattus au Brésil : les trois premiers succombent à l'assaut d'une tronçonneuse en novembre 2007 lors de la première campagne d'essais et le dernier est terrassé en octobre 2010 dans le cadre de la seconde campagne. Il s'agit de clones d'hybrides MN463 (*Eucalyptus camaldulensis* × *Eucalyptus urophylla*) cultivés en TCR (plantés selon un maillage carré de 3 m soit 1110 plants.ha^{-1}) et récoltés à l'âge de six ans. Ces eucalyptus étaient des arbres élancés, d'environ 30 m de haut pour 20 cm au diamètre à 1,30 m (Figure 28). Les arbres abattus sont ensuite débités en billons de 1,5 m, conditionnés en caisse et rapidement expédiés par avion vers la France afin de garantir la fraîcheur du bois. Conformément à la règlementation internationale en vigueur concernant l'exportation de matériel végétal, ce bois est soumis à une fumigation au bromure de méthyle selon la norme NIMP15 (FAO, 2006) avant de quitter le sol brésilien. L'alternative « environmentally friendly » à ce traitement chimique est un traitement thermique qui impose que le cœur du bois atteigne la température de 56 °C pendant 30 min. C'est solution est inadaptée dans le cadre de notre étude car elle engendrerait une diminution importante de la teneur en eau du bois avant même le début des essais expérimentaux.

Au total, près de deux tonnes de bois sont transportées d'un pays à l'autre.

A réception, ces billons ont été à nouveau usinés pour obtenir des échantillons identiques aux pièces de bois séchées au Brésil sur le site industriel de l'entreprise : il s'agit de petits billons de 30 cm de long, fendus ou non, selon leur diamètre, en demi ou en quart (Tableau 9).

Diamètre	< 12 cm	12 à 16 cm	> 16 cm
Fendu	Non	En demi	En quart

Tableau 9 : Géométrie des échantillons selon la classe de diamètre

Comme pour le hêtre, afin de mettre en exergue l'influence du paramètre étudié il est nécessaire de limiter la variabilité naturelle du bois d'un échantillon à l'autre. Les échantillons jumeaux sont donc prélevés contigus et selon la même génératrice.

II-1-2 : Description du dispositif expérimental

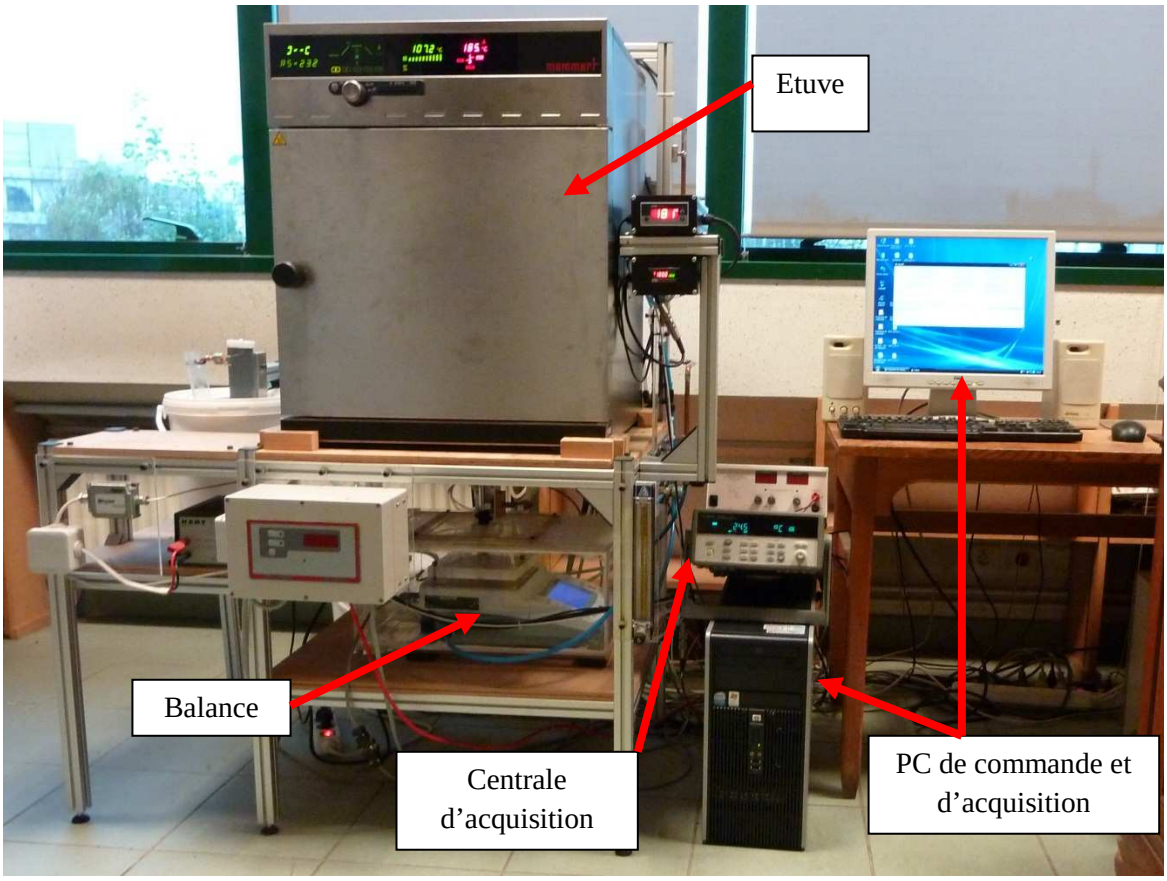
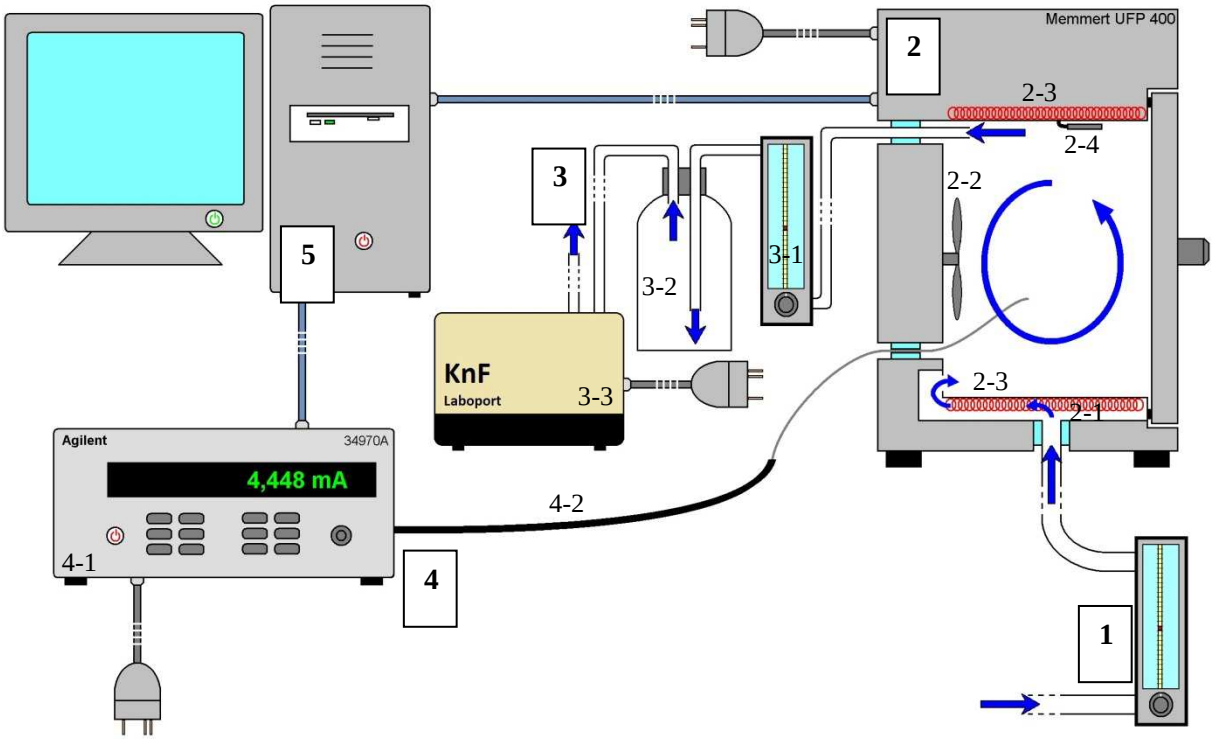


Figure 30 : Dispositif d'étude expérimentale du séchage de articules isolées

Afin de recueillir les données expérimentales nécessaires à l'identification des paramètres du modèle de Van Meel étendu, nous avons, dans le cadre de ce doctorat, mis au point un dispositif expérimental original permettant d'étudier le séchage de particules isolées (Figure 30). Il se compose d'un réacteur, d'instruments de mesure et d'une chaîne d'acquisition.

II-1-2-1 : Réacteur expérimental



1 : Vanne pointeau et débitmètre d'admission d'air (5 L.min^{-1})	
2 : Etuve	2-1 : Chambre de préconditionnement 2-2 : Ventilateur 2-3 : Résistances chauffantes 2-4 : Sondes Pt1000
3 : Extraction des gaz	3-1 : Vanne pointeau et débitmètre (0,5 L.min^{-1}) 3-2 : Condensateur d'eau et de goudrons 3-3 : Pompe à air
4 : Ajustement de la consigne	4-1 : Centrale d'acquisition 4-2 : Thermocouple
5 : Ordinateur	

Figure 31 : Schéma du réacteur

II-1-2-1-a : Enceinte climatique

Le four de traitement est une étuve *Memmert UFP 400* ayant un volume utile de 53 L (Figure 31-2).

Des résistances chauffantes d'une puissance totale de 1400 W sont régulièrement réparties au niveau de la base, du plafond et des parois latérales du caisson. La température sèche de ce four peut varier entre 20 °C et 300 °C ou être maintenue dans cette gamme à une consigne imposée par l'opérateur. Pour mesurer cette température sèche, l'étuve est pourvue de deux thermomètres à résistance de platine Pt1000. La régulation de température s'effectue par l'intermédiaire d'un système interne de type PID auquel sont reliées les sondes Pt1000. Ces capteurs de température étant placés à proximité immédiate de la paroi supérieure de l'enceinte (munie de résistances chauffantes), elles sont exposées à un transfert de chaleur par rayonnement non négligeable. Ainsi, la valeur indiquée par ces sondes Pt1000

est supérieure à la température moyenne de l'air et donc de celle à laquelle l'échantillon, placé au centre de l'enceinte, est soumis. De ce fait, nous avons placé un thermocouple de 1 mm de diamètre à proximité de l'échantillon (Figure 31-4-2). Compte tenu de la plage de température dans l'enceinte lors de l'utilisation du dispositif, nous avons choisi un thermocouple de type J (de même, tous les autres thermocouples mis en œuvre pour cet équipement sont de ce type et fournis par ThermoEst). Il permet d'obtenir une valeur plus fiable de la température de l'air, et d'en déduire, par différence, la part du rayonnement dans la valeur indiquée par les sondes Pt1000. Cette différence est intégrée dans notre programme de commande de l'étuve afin d'appliquer une correction sur la température de consigne.

La convection de l'atmosphère de l'étuve est forcée par un ventilateur centrifuge vertical situé sur la paroi du fond de l'étuve. Ceci permet une homogénéisation des paramètres de l'air tout autour de l'échantillon.

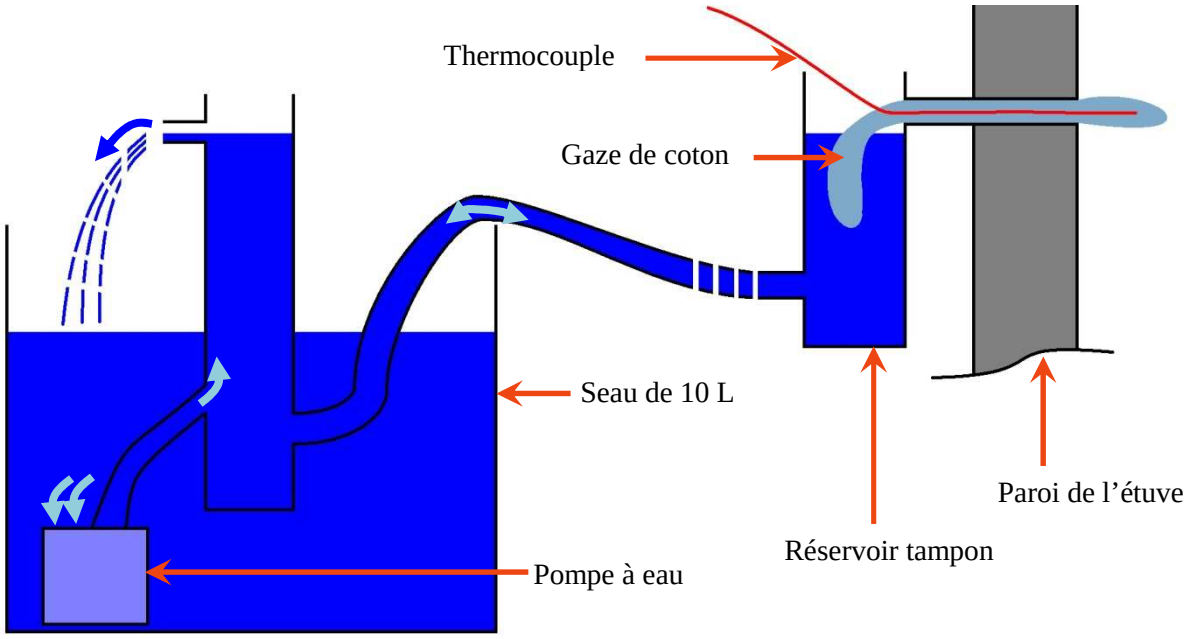


Figure 32 : Schéma de principe de la mesure de la température du bulbe humide

L'humidité relative dans l'enceinte n'est pas régulée mais résulte du bilan de masse entre le flux d'air injecté dans l'enceinte et la vitesse de séchage de l'échantillon. En revanche, cette humidité de l'air dans la chambre est mesurée par la méthode du bulbe humide (Figure 32). Une gaze de coton humide au centre de laquelle est disposé un thermocouple de type J de 1 mm de diamètre traverse la paroi de l'enceinte. Elle est alimentée en eau déminéralisée par capillarité au moyen d'un réservoir tampon. La présence de minéraux déplacerait l'équilibre eau liquide/vapeur, modifierait la température du bulbe humide et altérerait la précision de la mesure de l'humidité relative. Le niveau du réservoir tampon est maintenu constant grâce à un seau de 10 L selon le principe des vases communicants. Cette importante réserve d'eau est nécessaire dans le cas des essais à haute température car le pouvoir évaporatoire de l'air est alors très élevé. La contribution de la gaze de coton au bilan de masse dont résulte l'humidité relative n'est donc pas négligeable. De même, les essais à haute température imposent une autre précaution vis-à-vis de ce réservoir tampon : il doit être placé à l'extérieur de l'étuve pour prévenir toute ébullition.

Etant donné que la température dans l'enceinte peut être élevée, seuls les capteurs (soigneusement sélectionnés) sont placés à l'intérieur : les systèmes traitant leurs signaux sont placés à proximité de l'étuve. Ainsi les cloisons latérales de l'étuve, celles de la base et du fond sont munies de passages de

paroi permettant l'instrumentation de la pièce de bois étudiée et l'analyse de l'atmosphère de l'enceinte.

II-1-2-1-b : Injection de gaz et composition de l'atmosphère

L'étanchéité de l'enceinte est assurée par l'emploi (*i*) d'un mastic résistant à une température de régime de 275 °C (*Loctite Silicomet JS 563*) pour obturer les interstices entre les différentes tôles du caisson et (*ii*) de pièces en Téflon pour assurer un passage étanche des instruments de mesure. De ce fait, nous avons la possibilité de contrôler la composition du gaz dans l'enceinte. Ceci présente surtout un intérêt pour le traitement thermique du bois (cf. Chapitre 2 : Chapitre 2II-1-2-4-b). Dans le cadre de notre étude, nous nous limiterons à l'utilisation d'air.

L'admission d'air sec (température de rosée de -5 °C, délivré par un générateur *Domnick Hunter CRDC12*) s'effectue en dessous de l'étuve. Il est chauffé dans la chambre de préconditionnement située dans la partie inférieure de l'étuve avant de pénétrer dans l'enceinte par les fentes des parois latérales. Ceci évite la présence de points froids dans l'enceinte dus à l'injection de l'air. En amont de l'étuve est positionnée une vanne à vis pointeau montée sur un débitmètre permettant le contrôle du débit d'air (jusque 5 $L.min^{-1}$ à pression atmosphérique) (Figure 31-1).

Cet air est évacué de l'enceinte selon deux modes : d'une part, par fuite au niveau de l'enveloppe de l'enceinte et, d'autre part, au moyen d'une pompe électrique *KNF Laboport N86KN.18* (Figure 31-3-3). Cette dernière permet de prélever des gaz dans l'étuve pour les analyser, notamment pour mesurer le taux de dioxygène, ce qui est primordial lors du traitement thermique. Afin de prévenir toute dégradation de ces instruments d'analyse de gaz, l'eau et les goudrons sont condensés en amont au niveau d'un réservoir l'aluminium (Figure 31-3-2). Enfin, le débit de la pompe est constamment bridé à 0,5 $L.min^{-1}$ (par un débitmètre équipé d'une vanne à vis pointeau) pour éviter toute sous pression dans l'enceinte qui conduirait à l'aspiration non désirée d'air extérieur (Figure 31-3-1).

Le flux d'air a pour fonction première d'évacuer la vapeur d'eau produite lors du séchage de la pièce de bois. Par ailleurs, si son débit est sensiblement augmenté en shuntant le débitmètre en amont de l'enceinte, il permet une diminution rapide de la température (2 $°C.min^{-1}$) lors des phases de refroidissement du dispositif. Sans cet apport supplémentaire d'air, la lenteur de la descente en température peut être expliquée par la bonne isolation thermique du caisson vis-à-vis de l'extérieur en raison de la présence de laine de verre dans sa double paroi.

II-1-2-2 : Instrumentation de l'échantillon

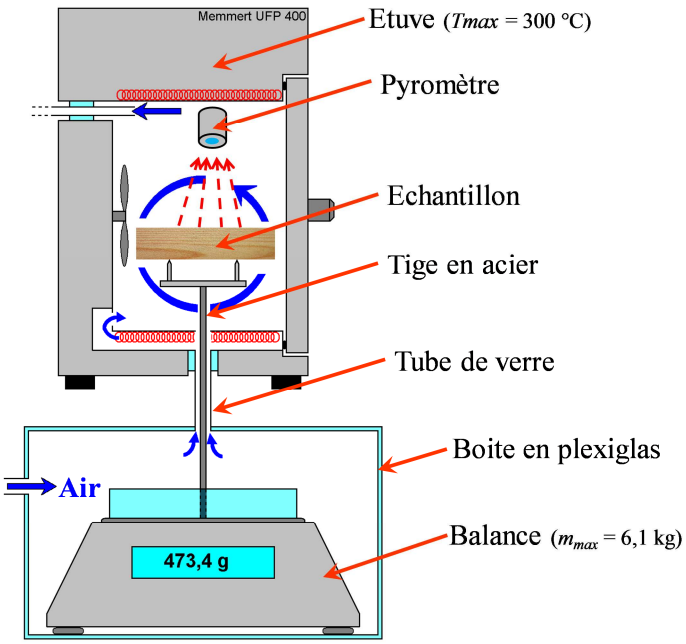


Figure 33 : Schéma d'instrumentation de l'échantillon

Dans le système d'équations de conservation de chaleur et de masse (Equations 2.15 et 2.16), l'état de la particule de bois est décrit selon deux paramètres : sa température de surface et sa teneur en eau moyenne. L'échantillon est donc instrumenté pour suivre expérimentalement cet état au cours du séchage (Figure 33).

II-1-2-2-a : Suivi de la perte de masse

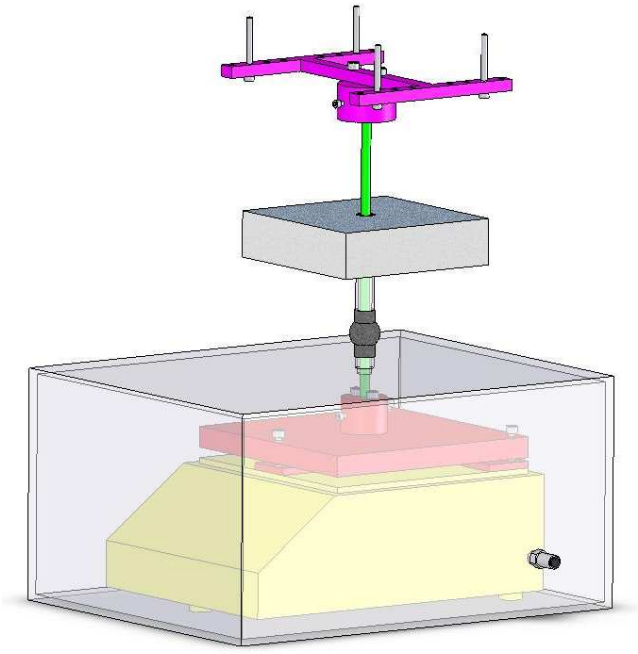


Figure 34 : Détail du système de pesée

Le suivi de la perte de masse est assuré par une balance déportée *Ohaus Explorer Pro* ayant une capacité maximale de 6,100 kg pour une précision de 0,01 g (Figure 34, jaune). Pour garantir une précision suffisante lors de l'analyse des résultats, l'échantillon devra peser au moins 50 g. En tant que telle, la balance est par conséquent inadaptée à l'étude de plaquettes forestières isolées : ceci explique pourquoi le hêtre a été usiné sous forme de planchettes.

Cette balance est disposée en dessous de l'étuve. Dans l'enceinte, l'échantillon est placé sur un support : trois points de contact pour les échantillons ayant une surface plane, type planche, et quatre points de contact pour les échantillons ayant une surface courbe, type billon (Figure 34, violet). Ce support est relié par l'intermédiaire d'une tige rigide (Figure 34, vert) au plateau de la balance (Figure 34, rouge).

Pour garantir l'étanchéité du système et pouvoir contrôler la composition de l'atmosphère dans l'enceinte, la balance est enfermée dans une boîte hermétique en plexiglas (Figure 33). Cette boîte et l'étuve sont assemblées par un tube rectiligne dans lequel passe la tige du dispositif de pesée.

De plus, la balance doit être maintenue à une température inférieure à 40 °C. Afin de prévenir la convection de gaz chauds de l'étuve vers la balance, l'alimentation en air du système s'effectue au niveau du caisson de plexiglas (Figure 33). Ce flux de gaz passe ensuite dans le tube et pénètre dans la chambre de préconditionnement de l'étuve. Ainsi, au niveau du tube, le flux de gaz est toujours ascendant.

Enfin, l'emploi d'éléments en verre (tube et tige) avait été initialement choisi afin de limiter l'effet de la conduction de chaleur de l'étuve vers la boîte le long de ces deux éléments. Sous le poids des échantillons, la tige de verre s'est cependant rompue à plusieurs reprises. Elle a donc été remplacée par une tige d'acier. Nous avons alors vérifié que le refroidissement convectif de la tige par le flux d'air ascendant compensait suffisamment le chauffage diffusif descendant le long de cette même tige. L'intégrité de la balance par le maintien d'une température basse est donc assurée. Le tube de verre est quant à lui conservé : il ne subit aucune contrainte mécanique pouvant le mettre en péril et sa transparence facilite amplement le réglage de la verticalité du système de pesée.

Pour ne pas perturber la pesée, le flux d'air (ascendant au niveau de la tige) est automatiquement stoppé au moyen d'une électrovanne avant chaque mesure. De même, le ventilateur est arrêté car, en fonctionnement, il provoque des oscillations de l'échantillon qui altère la précision de la mesure.

II-1-2-2-b : Mesure de la température

- *Au moyen de thermocouples*

La première piste explorée pour la mesure de température est l'utilisation de thermocouples. Ce choix technique a été testé sur des billons d'eucalyptus.

Afin de limiter l'impact de la température extérieure sur la mesure de la température du bois qui s'effectue au bout du thermocouple (conduction de chaleur le long de la gaine métallique) nous avons choisi des thermocouples ayant un diamètre de faible : 0,5 mm. Compte tenu de leur relative souplesse, ceci permet également de limiter la perturbation de la mesure de température sur la mesure de la masse de l'échantillon.

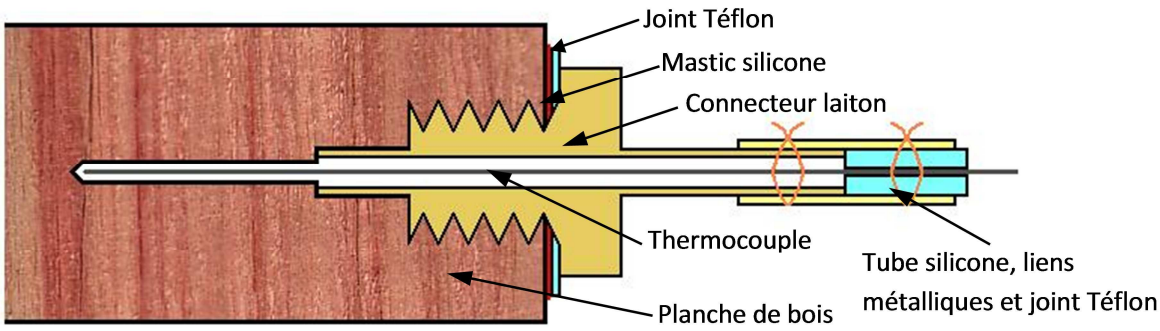


Figure 35 : Implantation étanche d'un thermocouple dans un billon d'eucalyptus

Initialement, lors de l'insertion des thermocouples dans le billon, nous veillions à assurer l'étanchéité du montage pour empêcher la fuite de la vapeur par les trous usinés. En effet, de telles fuites pourraient diminuer la pression et donc la température d'ébullition de l'eau. Lors de la phase de séchage, on ne pourrait pas obtenir une température supérieure à 100 °C, température d'ébullition de l'eau à pression atmosphérique. Après de nombreuses tentatives, il est apparu que la solution limitant au mieux les fuites est l'emploi d'un connecteur en laiton à pas de vis muni d'un épaulement sur lequel vient reposer un joint en Téflon. Une fine couche de mastic silicone (*Loctite Silicomet JS 563*) déposée sous le joint permet de diminuer la rugosité de la surface du bois (Figure 35).



Figure 36 : Fentes d'un billon d'eucalyptus séché à 160 °C

Lors du séchage de billon d'eucalyptus, un nombre important de fentes apparaissent (Figure 36). Les fuites de vapeur sont donc nombreuses au niveau de ces fentes, ce qui limite la pression de vapeur à 1 atm. Lors du séchage à haute température, ceci se traduit concrètement par le plafonnement à 100 °C de la température mesurée par un thermocouple implanté à cœur tant que cette partie du billon n'est pas sèche. Ensuite, cette température décolle rapidement pour atteindre la température de l'air. Nous nous sommes rendu compte dès les premiers essais que le caractère étanche de l'implantation des thermocouples n'était pas nécessaire. L'abandon de la mesure étanche de la température du bois permet en outre de limiter la modification des flux thermiques locaux provoquée par la conduction de chaleur facilitée le long du connecteur en laiton.

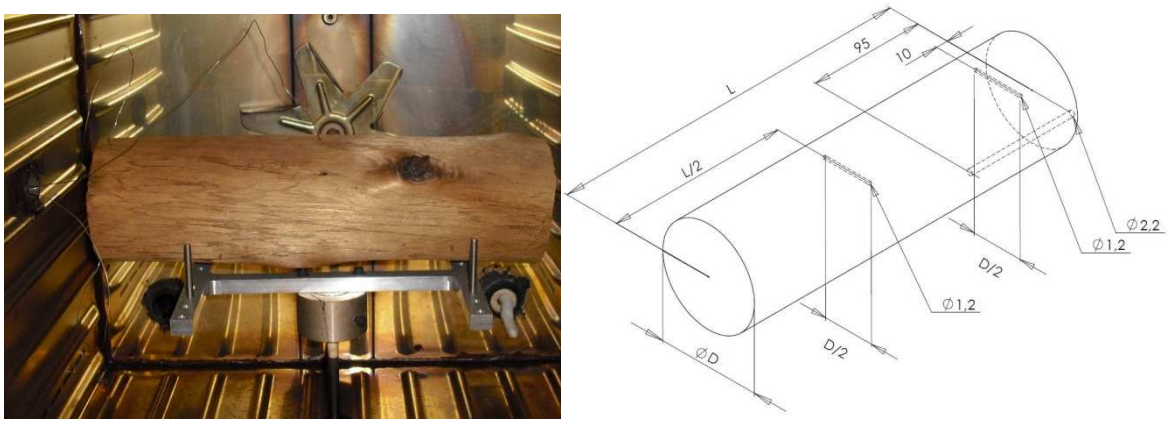


Figure 37 : Schéma d'implantation des thermocouples

Trois thermocouples ont été implantés dans le billon (Figure 37). Les deux premiers sont insérés dans la direction radiale jusqu'à la moelle, le premier à mi longueur (T_1) et le second à 10 mm du bout (T_2). Le troisième est inséré dans la direction longitudinale 3 mm sous la surface latérale (T_3). Pour permettre leur insertion, des orifices furent percés en limitant tant que possible leur diamètre afin de réduire la perturbation locale de perméabilité qu'ils engendrent. Nous avons utilisé un foret de 1,2 mm de diamètre pour les deux premiers trous et, compte tenu de sa grande profondeur (95 mm), un foret de 2,2 mm pour le troisième.

Cette série de thermocouples permet de mesurer la température interne du bois et d'accéder au profil de température de l'échantillon. En revanche, la mise en œuvre de thermocouples perturbe significativement la mesure de la masse, quand bien même il s'agit de thermocouple de 0,5 mm de diamètre.

– *Au moyen d'un pyromètre*

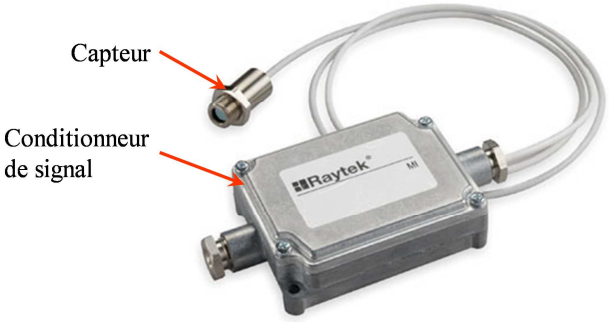


Figure 38 : Capteur et conditionneur de signal du pyromètre

Pour ne plus perturber le suivi de la masse de l'échantillon lors du séchage, nous avons choisi d'utiliser un moyen de mesure optique de la température de l'échantillon. Pour ce faire nous utilisons un pyromètre *Raytek MIH 10* (Figure 38). Nous accédons désormais à la mesure sans contact de la température de surface de la pièce de bois. Ce capteur peut supporter une température maximale de 180 °C : il s'agit de la limite de température la plus basse de tous les instruments de mesure mis en œuvre dans le réacteur. Les essais de séchage de particules isolées sont donc réalisés à une température inférieure ou égale à 180 °C.

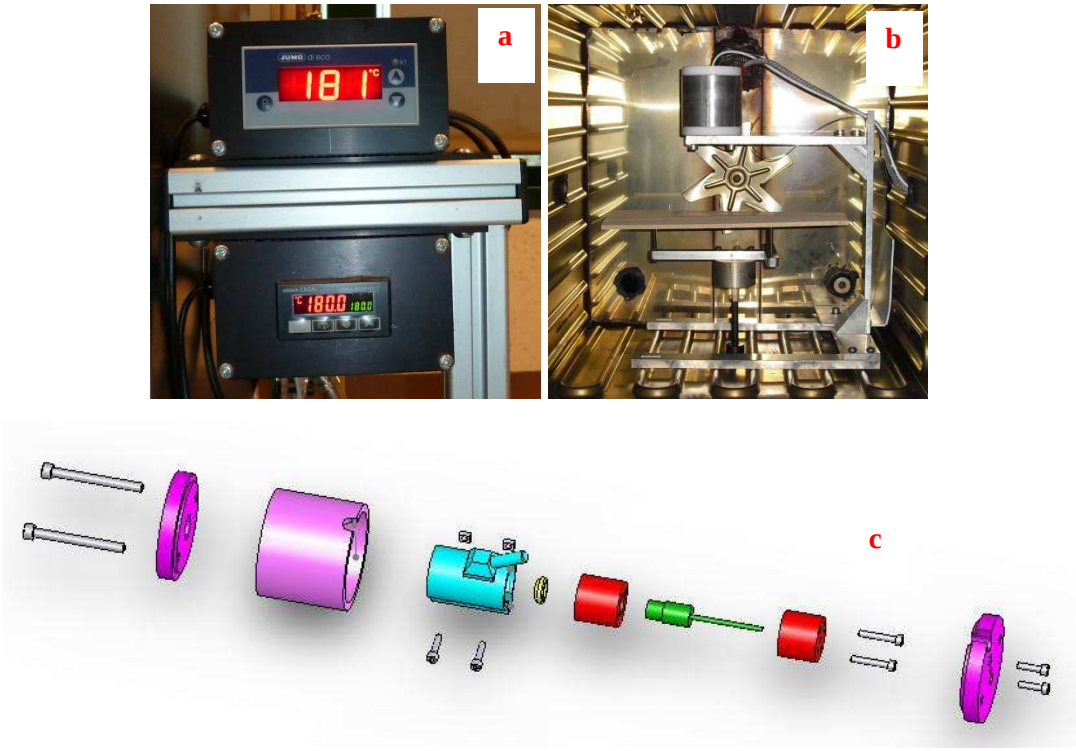


Figure 39 : Système de maintien de la température du pyromètre : (a) boitier fermé contenant le capteur, (b) régulateur et sécurité thermique, (c) éclaté du boitier.

La précision de la mesure de température n'est garantie que si la température du pyromètre est stable. Or les conditions d'air dans l'enceinte peuvent varier en fonction de la consigne imposée par l'opérateur ou être perturbées lors de l'ouverture de la porte par exemple. De ce fait, nous avons mis au point un dispositif permettant le maintien du pyromètre à 180 °C et ce quelle que soit la température de l'enceinte (Figure 39). Ce dispositif se compose d'un collier chauffant de 235 W (Figure 39-c, bleu) mis en contact avec le capteur (Figure 39-c, vert) par l'intermédiaire d'une « bague » d'aluminium (Figure 39-c, rouge). Le tout est isolé thermiquement dans un boitier circulaire (Figure 39-c, violet) par de la laine de céramique. Le collier est alimenté en électricité par l'intermédiaire d'un régulateur PID *Omron E5GN*. La température du pyromètre est mesurée au moyen d'un thermocouple de 1 mm de diamètre directement branché au régulateur PID. En raison d'un défaut de thermocouple, un premier pyromètre a été détruit par surchauffe. Nous avons donc rajouté à ce dispositif une sécurité thermique qui met hors service le chauffage du pyromètre lorsque la température atteint 183 °C. Il se compose d'un indicateur numérique de température *Jumo di eco* commandant un relais statique qui coupe le circuit électrique du régulateur en cas de surchauffe. Pour éviter que les incidents ne se répètent, une boucle d'auto-maintien du relais permet de conserver le régulateur éteint après une surchauffe, même si la température diminue en deçà de 183 °C. En outre, la sécurité thermique possède son propre thermocouple de 1 mm de diamètre, ce qui réduit les risques d'avarie (deux thermocouples tombent rarement en panne simultanément).

Le dispositif décrit ici permet une mesure sans contact et fiable de la température à la surface de la particule. Ceci se fait au détriment de la quantité d'information obtenue : nous ne pouvons pas accéder à l'hétérogénéité de la température à la surface du bois (le point de mesure étant unique) ni à la température interne. Cependant l'utilisation du pyromètre reste la meilleure solution technique compte tenu des contraintes liées à notre étude (notamment mesures simultanées de la masse et de la

température de surface de l'échantillon). Cet équipement est donc utilisé lors des essais menés sur l'eucalyptus (2ème campagne) et le hêtre.

II-1-2-3 : Contrôle du réacteur et enregistrement des données expérimentales

La température de consigne du réacteur et la vitesse du ventilateur sont contrôlées en continu par un ordinateur via un port RS232. Ceci permet de programmer des conduites automatiques de traitement, d'appliquer une correction instantanée sur la température de consigne et d'alléger la charge de surveillance de l'opérateur lors de l'expérimentation qui peut durer plusieurs jours. Nous avons donc développé un programme de commande (Figure 40) écrit dans le langage *Microsoft Visual Basic 6.0*. Une fois ce programme exécuté, le système devient autonome.

Afin d'appliquer la correction sur la température de consigne, l'information du thermocouple de référence de l'étuve est transmise à l'ordinateur par l'intermédiaire d'une centrale d'acquisition de données *Agilent 34970A* munie d'une carte multiplexer *34901A*. Cette centrale est également connectée à l'ordinateur via un port RS232. Toutes les dix secondes, la consigne de température est donc réévaluée par le programme comme suit :

$$T_{consigne\ corrigée} = T_{consigne\ théorique} + \left(T_{sonde\ étuve} - T_{thermocouple}\right) \tag{2.19}$$

Lors de la conception du dispositif et du programme, une attention particulière a été portée à la sécurité. La température est mesurée en différents points du dispositif. Le programme arrête automatiquement le dispositif en cas de dépassement de températures critiques prédéfinies.

L'utilisation de l'outil informatique ne se limite pas au contrôle du réacteur. La connexion des différents capteurs et instruments de mesure à l'ordinateur et l'exécution du programme *Séchage.exe* (Figure 40) permettent en effet l'enregistrement des données expérimentales :

- les thermocouples convertissent les températures en forces électromotrices qui sont conditionnées par la centrale d'acquisition *Agilent 34970A* ; la centrale est régulièrement interrogée par l'ordinateur qui enregistre ces températures,
- la température de surface de la particule est codée en tension (entre 0 et 10 V) par le pyromètre avant d'être transmis à l'ordinateur via la centrale d'acquisition selon le même principe que précédemment,
- la balance transmet à l'ordinateur via un port RS232 le poids mesuré à intervalles réguliers.

Les données sont sauvegardées en ASCII dans un fichier généré automatiquement par le programme.

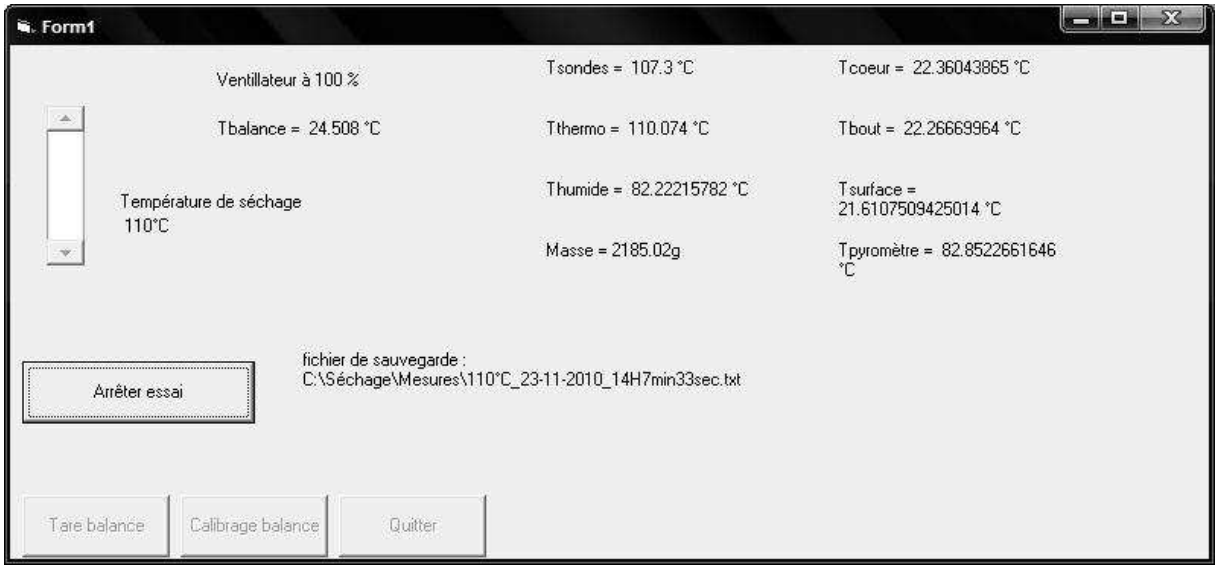


Figure 40 : Fenêtre d'exécution du programme *Séchage.exe* de commande et d'acquisition

II-1-2-4 : Modes d'utilisation du dispositif expérimental

II-1-2-4-a : Séchage à température constante

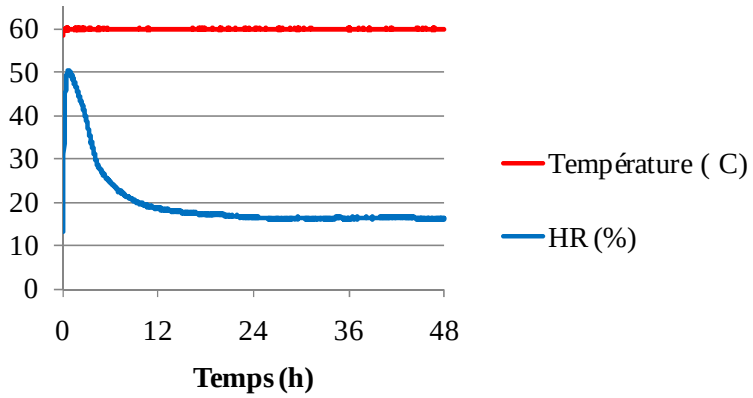


Figure 41 : Evolution temporelle des paramètres de l'air lors du séchage d'une planchette de hêtre saturée en eau (100(R) × 10(T) × 160(L) mm)

Dans le cadre de cette étude, le dispositif précédemment décrit sera utilisé pour recueillir les données expérimentales nécessaires à l'acquisition d'un pool de courbes d'activité de surface *a*. Nous pouvons étudier la sensibilité de la cinétique de séchage à différents paramètres de la particule (géométrie, taille, teneur en eau initiale, etc.) ou à la température de l'air. Les paramètres seront étudiés un à un en faisant varier leur valeur d'un essai à l'autre, toutes choses étant égales par ailleurs. Ainsi la température de l'air pourra varier d'un essai à l'autre mais sera constante lors d'un essai donné (Figure 41).

Remarque : dans l'idéal, un travail similaire aurait dû être mené sur l'humidité relative mais notre dispositif ne permet malheureusement pas de le faire.

La vitesse de chauffe du dispositif n'est pas suffisamment élevée pour que l'échantillon puisse être introduit lorsque l'étuve est froide : le temps nécessaire pour que la température de l'air atteigne la consigne imposée par l'opérateur ne serait pas négligeable. Ainsi, nous préchauffons le dispositif à la

température désirée puis nous introduisons l'échantillon en limitant autant que possible le temps d'ouverture de la porte. Ceci est facilité par l'emploi du pyromètre qui limite de nombre d'instruments de mesure à mettre en contact avec l'échantillon. Grâce à cette méthode, la perturbation de la température est faible et le retour à la consigne rapide.

II-1-2-4-b : Utilisations alternatives

Le dispositif précédemment décrit est très versatile puisqu'il permet, au-delà de l'étude présentée ici, d'étudier le traitement thermique du bois jusqu'à 300 °C (le pyromètre aura alors été préalablement été démonté). Pour ce faire, l'air injecté est remplacé par du diazote délivré par un générateur *Domnick Hunter LCMS 15*.

D'une part, le dispositif expérimental permet l'étude du procédé de traitement thermique et la mise en évidence des réactions de dégradation du bois lors de sa pyrolyse ménagée (Colin *et al.*, 2008). D'autre part, il permet la production de bois traité thermiquement en vue de sa caractérisation (Pierre *et al.*, 2011).

II-1-3 : Exemples de cinétiques de séchage et études de paramètres influents

Dans cette partie, nous nous limitons à la présentation et à l'étude de quelques cinétiques de séchage obtenues à partir des expérimentations menées sur les planchettes de hêtre. Une sélection rigoureuse de ces cinétiques permet de mettre en évidence les paramètres influents.

L'intégralité des résultats obtenus à partir des planchettes de hêtre et des billons d'eucalyptus sont respectivement présentés en Annexe IV et Annexe V.

II-1-3-1 : Effet de la teneur en eau initiale

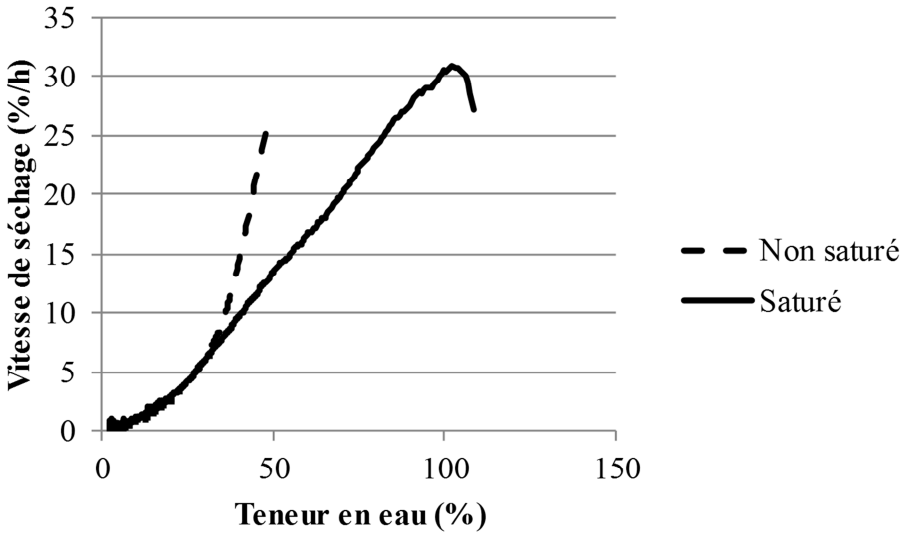


Figure 42 : Influence de la teneur en eau initiale sur la cinétique de séchage à 60°C (longueur des échantillons = 80 mm ; épaisseur des échantillons = 10 mm)

L'influence de la teneur en eau initiale sur la cinétique de séchage est mise en évidence par l'analyse des résultats obtenus pour les échantillons de 80 mm de longueur : il s'agit du seul type d'échantillons pour lequel nous avons systématiquement un couple *saturé/non saturé*.

Nous pouvons tout d'abord remarquer que la cinétique de l'échantillon non saturé est « tronquée » (Figure 42). Sa teneur en eau est plus faible que la teneur en eau critique, la cinétique débute donc par la seconde phase de séchage. Dans ce cas, nous ne pouvons ni mettre en évidence la phase de mise en régime ni accéder à la vitesse maximale de séchage (lors de la première phase de séchage). Au sein du pool de résultats que nous avons obtenus, il existe cependant une exception : les planchettes de 320 mm de longueur et 10 mm d'épaisseur présentent cette première phase de séchage, quelle que soit la température (Annexe IV). Ceci pourrait être expliqué par la grande dimension de l'échantillon et l'encollage de ses surfaces transverses qui empêche la migration d'humidité dans le sens longitudinale. Ceci est défavorable à la formation rapide d'une couche sèche à la surface de l'échantillon.

Avant d'être séché, l'échantillon initialement non saturé est conservé plusieurs semaines au froid et dans un sac hermétique, ce qui a permis d'homogénéiser son champ de teneur en eau. Lorsque le séchage de cet échantillon initialement non saturé débute, à une teneur en eau $\overline{X}_{init,non\,saturé}$, sa vitesse de séchage est plus élevée que celle de l'échantillon initialement saturé ayant séché jusqu'à cette même teneur en eau moyenne $\overline{X}_{init,non\,saturé}$ (Figure 42). En effet, le profil de teneur en eau de la première planchette est plus homogène que celle de la seconde : cette dernière a déjà commencé à sécher et sa teneur en eau en périphérie est très inférieure à celle à cœur. Ainsi pour une même teneur en eau moyenne, la teneur en eau en périphérie de l'échantillon initialement non saturé est plus importante que celle de l'échantillon initialement saturé. Et la vitesse de séchage est corrélée positivement avec cette teneur eau périphérique. Ceci semble se traduire par une diminution de la teneur en eau critique lorsque la teneur en eau initiale décroit. En outre, cette différence est beaucoup plus élevée pour l'essai à 60 °C (+ 100 %) que celui à 120 °C (+ 25 %) et ce quelle que soit l'épaisseur étudiée (Annexe IV). Le séchage à haute température permet de réduire la résistance interne à la migration d'humidité (activation thermique de la diffusion d'eau liée, effet de la surpression interne). Ceci explique cette différence moindre à 120 qu'à 60 °C

Enfin, lorsque la teneur en eau moyenne diminue, la différence entre la cinétique de l'échantillon initialement saturé et celle de l'échantillon initialement non saturé s'amoindrit puis s'annule (Figure 42). Cette annulation intervient plus précocement à 120 °C, aux alentours de 40 % de teneur en eau, qu'à 60 °C, vers 30 % de teneur en eau (Annexe IV).

En résumé, la saturation est souvent nécessaire pour obtenir l'intégralité de la cinétique de séchage et donc accéder à la vitesse maximale de séchage. Cependant, l'étude expérimentale des échantillons saturés ne se suffit pas à elle-même car les résultats obtenus ne sont pas extrapolables quand la teneur en eau initiale diminue. En effet, sa valeur a une influence significative sur la cinétique de séchage et notamment sur la teneur en eau critique. Il est donc pertinent de faire varier ce paramètre en vue de l'identification de l'activité.

II-1-3-2 : Effet des dimensions de l'échantillon

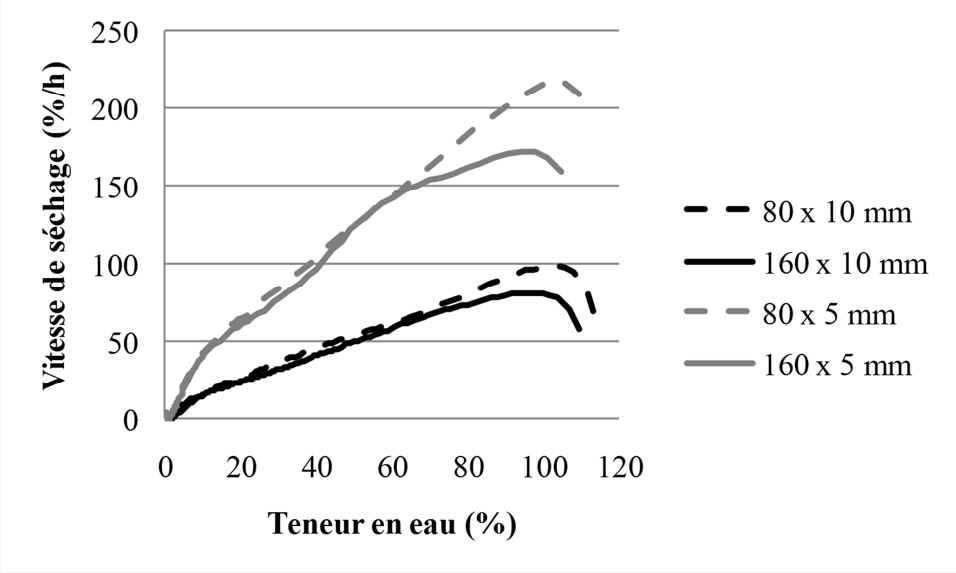


Figure 43 : Influence des dimensions d'échantillons initialement saturés sur la cinétique de séchage à 120°C

II-1-3-2-a : Influence de la longueur

Au début du séchage, lorsque la longueur augmente, la vitesse de séchage diminue. Ceci se vérifie lors de la première phase dans le cas des échantillons initialement saturés (Figure 43). Le même comportement s'observe lors de la seconde phase dans le cas les échantillons initialement non saturés (Annexe IV). Lorsque le séchage se poursuit, les cinétiques tendent à se superposer.

La longueur a donc une influence significative sur la cinétique de séchage et notamment sur la vitesse maximale. Il est donc pertinent de faire varier ce paramètre en vue de l'identification de l'activité.

Nous émettons l'hypothèse que la migration capillaire, phénomène qui intervient préférentiellement au début du séchage, est beaucoup plus affectée par l'augmentation de longueur que la diffusion de vapeur, phénomène prépondérant à la fin du séchage. En effet, le rapport d'anisotropie entre direction longitudinale et plan transverse est beaucoup plus élevé pour la perméabilité que pour la diffusivité gazeuse (respectivement 10^4 à 10^5 contre 5 à 10 : Agoua, 2001 ; Perré et Karimi, 2002). Cette hypothèse pourrait être vérifiée au moyen un modèle numérique à volumes finis, tel que *TransPore*. Grâce à celui-ci on pourrait annuler artificiellement l'un puis l'autre mode de transfert avant de faire varier la longueur de l'échantillon. En outre, pour confirmer ou infirmer cette hypothèse, il est primordial de tester l'influence de la longueur de l'échantillon sur les échanges d'eau à travers l'écart psychométrique (l'humidité relative n'étant pas régulée) et les coefficients de transferts externes h_m et h_c.

II-1-3-2-b : Influence de l'épaisseur

Dans le cas de ces fines planchettes de hêtre, leur épaisseur influence de façon très significative la cinétique de séchage et ceci tout au long du séchage. Il semble exister une relation d'homothétie entre les courbes obtenues pour les échantillons de 5 et 10 mm d'épaisseur (Figure 43 ; Annexe IV) : globalement, la vitesse de séchage double quand l'épaisseur diminue de moitié. En effet, compte tenu de la géométrie des échantillons, la surface d'échange est très peu affectée par l'épaisseur,

contrairement à sa masse sèche qui est proportionnelle à l'épaisseur. En raisonnant sur la première phase de séchage, lorsque l'épaisseur est doublée, le flux de vapeur moyen à la surface de la particule reste sensiblement le même alors que son effet sur la teneur en eau moyenne est divisé par deux.

Nous pouvons également constater que l'épaisseur a une influence sur la cinétique de séchage beaucoup plus prononcée que la longueur. Il est donc pertinent de faire varier ce paramètre en vue de l'identification de l'activité.

II-1-3-3 : Effet de la température

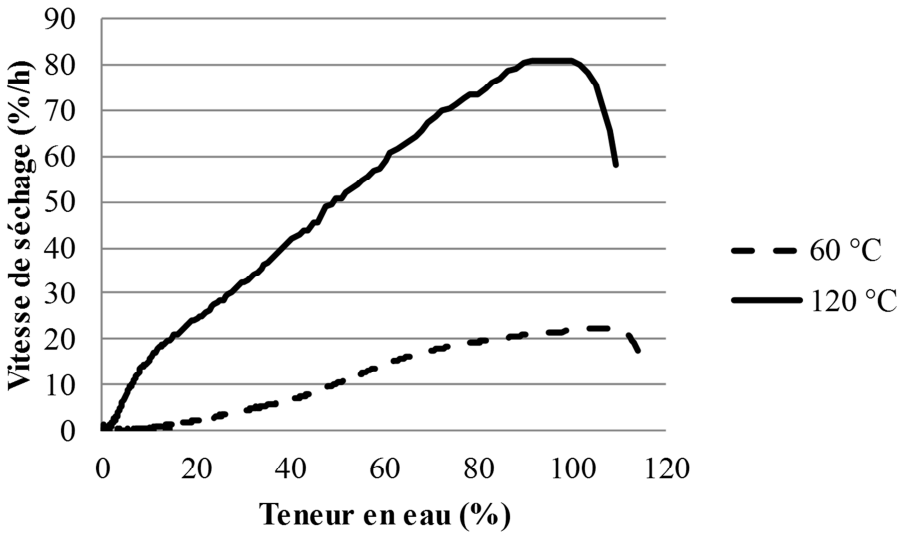


Figure 44 : Influence de la température sur la cinétique de séchage d'échantillons initialement saturés (longueur des échantillons = 80 mm ; épaisseur des échantillons = 10 mm)

La température semble être le plus influent des quatre facteurs étudiés.

D'une part, la vitesse de séchage est très affectée par l'élévation de température : elle est multipliée par un facteur 3 à 4. À pression atmosphérique, l'écart psychométrique maximal, est plus grand à 120 °C car l'humidité relative de l'air ne peut pas excéder 51 % (101,3 kPa de pression partielle de vapeur) alors qu'à 60 °C l'air est saturé en vapeur d'eau quand la pression partielle de ce gaz atteint 19,9 kPa (Lide, 1993). Pour les essais présentés en Figure 44, le pic de pression partielle de vapeur atteint 24,5 kPa à 120 °C (*HR* = 12,3 %) et 7,6 kPa à 60 °C (*HR* = 38,1 %). Le pouvoir évaporatoire augmente donc significativement avec la température.

D'autre part, l'allure de la cinétique est modifiée : en fin de séchage la courbe de la cinétique à 60 °C est concave alors que celle à 120 °C est convexe. Il faut garder à l'esprit que, lors de la seconde phase de séchage, le front d'évaporation migre de la surface vers le cœur de l'échantillon. Dans le cadre de son doctorat, Basilico a étudié l'impact de ces différentes conditions de séchage sur les mécanismes de migration de l'eau dans le bois pour expliquer le changement d'allure des courbes lorsque la température augmente (Basilico, 1985). À basse température, il a montré que le gradient d'humidité dans la couche sèche provoque une migration diffusive de l'eau dans le bois sous forme vapeur et sous forme d'eau liée. À haute température, lorsqu'il reste de l'eau dans la particule, la vaporisation interne génère une surpression dans le matériau. Le gradient de pression va alors induire une migration convective de vapeur et de liquide de l'intérieur vers l'extérieur du produit. En effet, la pression de vapeur saturante dépasse 1 atm au-delà de 100 °C, soit 1,96 atm à 120 °C (Lide, 1993). Or ce dernier

mode de transfert est beaucoup plus efficace que le premier, ce qui explique qu'à 120 °C, la vitesse de séchage reste élevée jusqu'à atteindre l'équilibre hygroscopique. Basilico a par ailleurs montré qu'il est possible d'obtenir une allure de courbe mixte, c'est-à-dire avec un point d'inflexion, quand le bois est séché à haute température sous atmosphère humide. Au début du séchage, l'échantillon a un comportement proche de celui observé à basse température : la courbe est concave. Puis, quand la température du produit dépasse celle du point d'ébullition, son comportement devient similaire à celui observé à haute température : la courbe devient convexe.

En résumé, la température a donc une influence prépondérante sur la cinétique de séchage tant par l'intermédiaire du pouvoir évaporatoire de l'air que du mode de transfert de la vapeur au sein de la particule. Il est donc pertinent de faire varier ce paramètre en vue de l'identification de l'activité.

II-1-3-1 : Autres facteurs influant

La liste des paramètres influant la cinétique de séchage présentée précédemment n'est pas exhaustive. Il est pertinent par ailleurs d'étudier l'effet de la vitesse d'air (modifiant les coefficients de transferts externes) et de l'humidité relative. Pour analyser ce dernier paramètre, il est primordial de le réguler. Or notre dispositif expérimental ne nous permet pas de découpler température et humidité relative au cours du séchage.

II-2 : Détermination des coefficients de transferts externes

Compte tenu de la complexité de l'écoulement autour de la particule dans le dispositif expérimental, il est très difficile de déterminer par calcul les valeurs des coefficients de transferts externes selon la théorie de la mécanique des fluides. Dans le cadre de cette étude, ces valeurs sont déterminées expérimentalement.

II-2-1 : Utilisation de la première phase de séchage

Lors de la première phase de séchage, l'intégralité de la surface de la particule est alimentée en eau libre par migration capillaire : le front d'évaporation est situé à la surface de l'échantillon. Compte tenu de l'efficacité de la migration capillaire, les transferts internes ne limitent pas la vitesse de séchage Elle est donc complètement contrôlée par les transferts externes.

Dans le cas où la teneur en eau initiale de la particule est supérieure à la teneur en eau critique, une première phase de séchage débute après une période de mise en régime. La température de la particule est alors homogène et égale à la température du bulbe humide. La vitesse de séchage est constante et maximale au cours de cette période. L'intégralité de l'énergie apportée au produit est donc utilisée pour évaporer l'eau. La conservation de la chaleur (Equation 2.16) peut être réduite à la forme suivante :

$$-m_0 \times L_v\left(T_h\right) \times \overline{\dot{X}}_{\max} = h_c \times \left(T_{db}^{\infty} - T_h\right) \times Surf_{part} \tag{2.20}$$

Ainsi, nous pouvons accéder au coefficient de transfert externe de chaleur en mesurant la vitesse maximale de perte de masse, la température sèche de l'air et sa température humide :

$$h_c = \frac{-\dot{m}_{\max} \times L_v\left(T_h\right)}{\left(T_{db}^{\infty} - T_h\right) \times Surf_{part}} \tag{2.21}$$

avec $\dot{m} = m_0 \times \dot{\overline{X}}$ (2.22)

Nous en déduisons ensuite le coefficient de transfert externe de masse par analogie avec les transferts de chaleur dans la couche limite de l'écoulement grâce à la relation de Lewis appliquée à l'air humide (Incropera *et al.*, 2007 ; Perré, 2007a) :

$$h_m = \frac{h_c}{\left(\rho \times c_P\right)_{air\ humide}} \tag{2.23}$$

avec $\left(\rho \times c_P\right)_{air\ humide} = \rho_a \times c_{P,a} + \rho_v \times c_{P,v}$ (2.24)

D'après la loi des gaz parfaits, nous obtenons :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{n \times M}{V} = \frac{M \times P}{R \times T} \tag{2.25}$$

donc $\rho_v = \frac{M_v \times P_v}{R \times T_{db}^{\infty}} = \frac{M_v \times HR \times P_{vs}(T_{db}^{\infty})}{R \times T_{db}^{\infty}}$ (2.26)

et $\rho_a = \frac{M_a \times P_a}{R \times T_{db}^{\infty}} = \frac{M_a \times \left(P_{atm} - HR \times P_{vs}(T_{db}^{\infty})\right)}{R \times T_{db}^{\infty}}$ (2.27)

D'après les cinq équations précédentes (Equations 2.23 à 2.27), la relation entre h_c et h_m devient :

$$h_m = \frac{h_c \times R \times T_{db}^{\infty}}{M_a \times c_{P,a} \times \left(P_{atm} - HR \times P_{vs}(T_{db}^{\infty})\right) + M_v \times c_{P,v} \times HR \times P_{vs}(T_{db}^{\infty})} \tag{2.28}$$

Cependant, les échantillons utilisés ne sont pas propices à l'enregistrement d'une première phase de séchage suffisamment longue pour en déduire ensuite les valeurs de ces coefficients de transferts externes. Ceci peut être en partie expliqué par un flux d'eau libre important selon la direction longitudinale au détriment des flux selon les directions transverses, beaucoup moins perméables. Il se formerait rapidement une couche sèche au niveau des faces supérieure, inférieure (longitudinale-radiale) et latérales (longitudinale-tangentielle) de la particule.

Pour faire sauter ce verrou, nous avons utilisé des dispositifs *témoin* mimant le comportement des particules en première phase de séchage. D'un point de vue des propriétés intrinsèques, ils doivent avoir une forte porosité pour pouvoir emmagasiner une grande quantité d'eau et favoriser les transferts internes par capillarité. Par ailleurs, il est indispensable qu'ils aient une géométrie similaire à celle de la particule étudiée. En effet, les valeurs des coefficients de transferts externes dépendent fortement de l'écoulement d'air à la surface de la particule et donc de la géométrie de cette dernière.

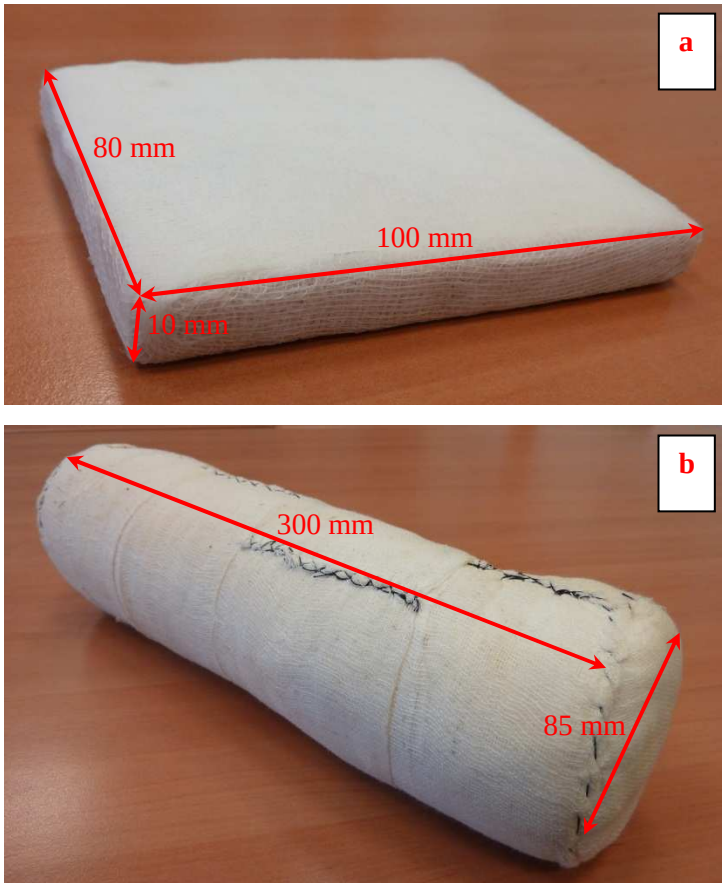


Figure 45 : Dispositifs *témoin* utilisés pour déterminer h_c et h_m dans le cas d'une planchette (a) et celui d'un billon (b)

Pour reproduire la géométrie de la planchette nous superposons plusieurs couches de lavettes en éponge *Spontex Tiponge* jusqu'à obtenir une épaisseur de 10 mm (Figure 45-a). Cet empilement est ensuite découpé selon un rectangle de 80 par 100 mm. Pour rigidifier ce dispositif, on insère une fine (0,6 mm) tôle de laiton au centre. L'ensemble en rendu solidaire en l'entourant de gazes de coton.

Dans le cas du billon, il s'agit d'un tube de PVC obturé aux deux extrémités par des bouchons en nylon et entouré de coton hydrophile médical jusqu'à obtenir un cylindre de 85 mm de diamètre et 300 mm de longueur (Figure 45-b). Pour maintenir cet assemblage, nous l'entourons de gazes de coton cousues.

Quel qu'en soit le type, le dispositif *témoin* est saturé en eau. Puis il est chauffé dans un bain thermostaté à la température du bulbe humide mesurée dans l'enceinte avant d'être introduit dans l'étuve. Ceci permet de limiter la durée de la phase de mise en régime et donc d'allonger celle de première phase de séchage. En outre, l'emploi d'un tube creux pour le dispositif cylindrique et les petites dimensions du dispositif parallélépipédique leurs confèrent une faible capacité calorique, ce qui participe également à la mise en place rapide du régime permanent.

Nous isolons alors les données relatives à la première phase de séchage pour calculer les valeurs des coefficients de transferts externes. Pour identifier cette première phase de séchage, nous vérifions que la température indiquée par le pyromètre est constante et égale à la celle du bulbe humide. De même, lors de cette période, la vitesse de perte de masse, calculée à partir des valeurs enregistrées par l'intermédiaire de la balance, est constante.

II-2-2 : Valeurs identifiées des coefficients

Nous présentons ici les valeurs des coefficients externes obtenus à partir des dispositifs *témoin* décrits précédemment. Celui mimant le comportement en première phase de la planchette est soumis aux températures de 60 et 120 °C. Les résultats sont consultables dans le Tableau 10. La seconde forme géométrique, mimant le billon, a été soumise aux températures de 90°C et 120 °C. Les résultats sont consultables dans le Tableau 11.

T (°C)	h_c (W.m^{-2}.K^{-1})	h_m (10^{-3} m.s^{-1})
60	27,5	25,1
120	31,4	34,2

Tableau 10 : Valeurs identifiées des coefficients de transferts externes pour une planchette (80×100×10 mm)

T (°C)	h_c (W.m^{-2}.K^{-1})	h_m (10^{-3} m.s^{-1})
90	36,8	35,5
120	38,0	38,4

Tableau 11 : Valeurs identifiées des coefficients de transferts externes pour un billon (85 mm de diamètre et 300 mm de longueur)

L'ordre de grandeur de ces valeurs identifiées est conformes à celles disponibles dans la littérature scientifique concernant le séchage convectif du bois : dans la revue bibliographique publiée par Tremblay *et al.* (2000), les gammes des valeurs s'étendent de 14 à 61,4 W.m^{-2}.K^{-1} pour le coefficient de transfert externe de chaleur et de 14 à 40.10^{-3} m.s^{-1} pour le coefficient de transfert externe de masse.

II-3 : Détermination des paramètres du modèle : a et X_{cr}

Après avoir recueilli les cinétiques expérimentales de séchage et déterminé les valeurs des coefficients de transferts externes, nous disposons de toutes les données pour déterminer les paramètres de l'activité de surface. La détermination des paramètres du modèle de Van Meel étendu consiste en la résolution numérique des équations couplées de conservation de chaleur et de masse en conditions climatiques variables (réellement vues par la particule au cours de l'essai) en appliquant une méthode inverse.

Après avoir défini l'expression de la fonction *activité* et identifié ses paramètres à optimiser, il s'agit de minimiser une fonction objectif pour que les courbes expérimentale et théorique se superposent. Pour une teneur en eau diminuant entre X_{init} et $X_{éq}$, l'activité de surface prend des valeurs comprises entre 1 et HR. Cet intervalle dépend étroitement des conditions climatiques. Ceci n'est pas commode pour comparer les résultats d'un essai à l'autre. Nous opérons donc de la même manière pour a que Van Meel a pu le faire pour ϕ et g : nous définissons l'activité de surface adimensionnelle que nous nommerons par commodité *activité adimensionnelle* et que nous noterons α :

$$\alpha(\phi) = \frac{a(\phi, HR) - HR}{1 - HR} \tag{2.29}$$

II-3-1 : Identification de l'activité expérimentale

D'après l'équation de conservation de masse (Equation 2.15), nous pouvons déduire l'expression de l'activité de surface expérimentale :

$$a(\phi, HR) = \frac{P_{atm}}{P_{vs}(T_{pyro})} - \frac{P_{atm} - P_v^{\infty}}{P_{vs}(T_{pyro})} \times \exp\left(\frac{\dot{\overline{X}} \times m_0}{h_m \times C \times M_v \times Surf_{part}} \right) \quad (2.30)$$

Nous pouvons alors tracer l'activité adimensionnelle expérimentale en fonction de la teneur en eau (Figure 46).

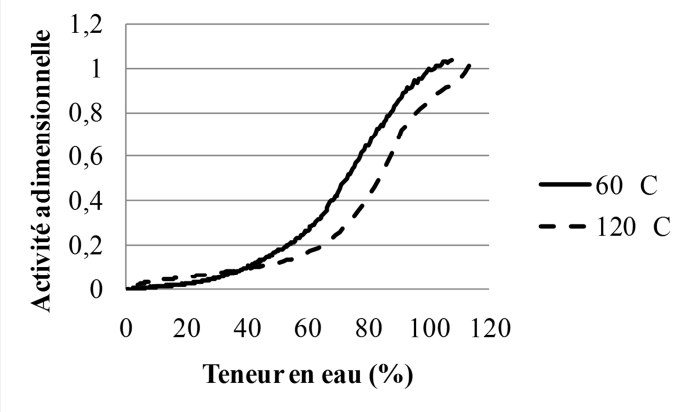


Figure 46 : Activité adimensionnelle expérimentale pour des planchettes saturées (80×10×100 mm)

II-3-2 : Choix de l'expression de l'activité de surface

La forme des courbes représentées dans la Figure 46 étant sigmoïdale, nous privilégions une combinaison de fonctions de type tangente hyperbolique. L'intérêt de la tangente hyperbolique est multiple : elle est $\mathcal{C}^{\infty}$, croissante et permet (si on le souhaite) d'approcher la fonction de Heaviside, etc. Pour l'activité adimensionnelle, deux précautions doivent être prises. La première concerne les valeurs de la fonction en X_{cr} (ϕ=1) et $X_{éq}$ (ϕ=0) : elles doivent respectivement être égales à 1 et 0. Deuxièmement, nous devons nous assurer que la fonction est croissante entre les bornes précédemment énoncées. Nous retenons donc la forme suivante :

$$\alpha(\phi) = \frac{\tanh(A \times \phi + B) - \tanh(B) + \tanh(C \times \phi + D) - \tanh(D)}{\tanh(A + B) - \tanh(B) + \tanh(C + D) - \tanh(D)} \quad (2.31)$$

A, *B*, *C* et *D* sont quatre paramètres de la fonction α qui doivent être ajustés pour que les courbes expérimentales et théoriques se superposent. *A* et *C* doivent tous deux être positifs pour que α soit croissante sur son domaine de définition.

X_{cr} est un paramètre ajustable de l'activité adimensionnelle, masqué dans l'Equation 2.31 par l'emploi de la teneur en eau adimensionnelle.

II-3-3 : Optimisation des paramètres de la courbe

II-3-3-1 : Minimisation de la fonction objectif

Pour minimiser la différence entre courbe théorique à courbe expérimentale, l'écart entre ces courbes est mesuré par la méthode des moindres carrés.

Avant de minimiser la somme quadratique, il est important de réfléchir à la pondération de chaque point expérimental. Les données sont enregistrées expérimentalement avec un pas de temps régulier. La vitesse de séchage étant décroissante au cours du temps, l'échantillonnage des données devient irrégulier lorsque nous mettons en abscisse la teneur en eau (adimensionnelle ou non), avec une densité de données croissante de ϕ=1 à ϕ=0. Sans pondération, la minimisation de la somme des carrés des écarts conduirait à un parfait ajustement de l'activité adimensionnelle en fin de séchage (valeurs faibles de ϕ) mais cette optimisation se dégraderait au début du séchage (valeurs fortes ϕ). Pour répartir les résidus tout au long de la courbe, nous pondérons les données par l'inverse de la densité de points.

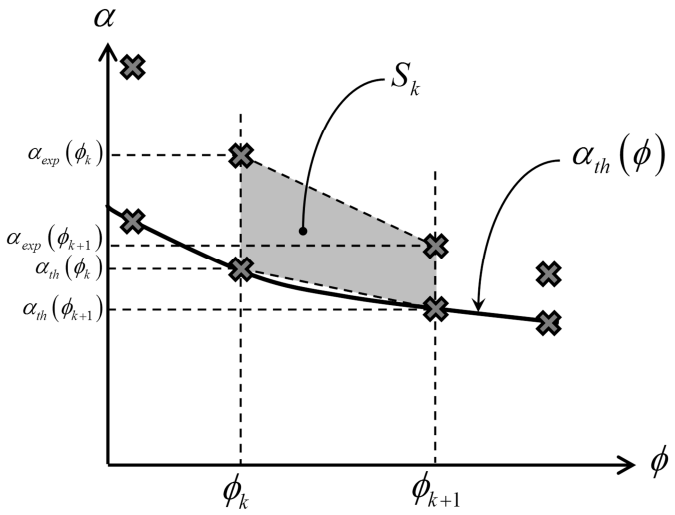


Figure 47 : Surface du trapèze formé par deux couples de points successifs

Pour ce faire nous optimisons la somme des carrés des aires formés par deux couples de points expérimentaux et théoriques successifs (Figure 47) : pour un même écart moyen en ordonnée, le trapèze a une aire d'autant plus grande (et donc un poids important dans la somme quadratique) que les points sont écartés en abscisse. Nous minimisons donc la fonction suivante :

$$\begin{aligned}\chi(A;B;C;D;X_{cr}) &= \sum_{k=1}^{N-1}(S_k)^2 \\ &= \sum_{k=1}^{N-1}\left[\left(\alpha_{exp}(\phi_{k+1})-\alpha_{th}(\phi_{k+1})+\alpha_{exp}(\phi_k)-\alpha_{th}(\phi_k)\right)\times(\phi_{k+1}-\phi_k)\right]^2\end{aligned} \quad (2.32)$$

Cette fonction χ est minimisée en utilisant le Solver de *Microsoft Excel 2007*. L'ensemble de cette procédure d'identification conduit à une excellente superposition des courbes théoriques et expérimentales (Figure 48).

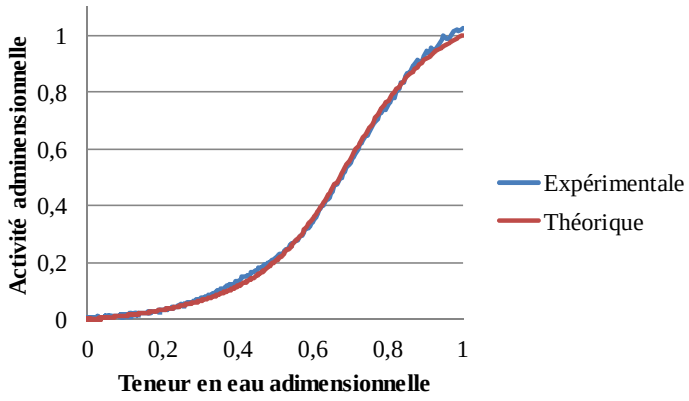


Figure 48 : Superposition des activités adimensionnelles théoriques et expérimentales pour une planchette de hêtre (80×10×100 mm) à 60 °C

II-3-3-2 : Valeurs des paramètres optimisés

Dans cette partie, nous présentons les valeurs des paramètres de l'activité adimensionnelle (Tableaux 12 et 13). Ces valeurs sont identifiées à partir des cinétiques obtenues avec des planchettes et des billons de géométries similaires à celles des dispositifs *témoin* présentés dans la partie II-2-1 de ce même chapitre.

Paramètre	Saturé		Non saturé	
	60 °C	120 °C	60 °C	120 °C
X_{cr} (%)	104	111	50,3	52,8
A	2,13	$5{,}73\times10^{-1}$	4,20	$2{,}57\times10^{-3}$
B	-1,55	2,87	-4,32	-4,46
C	5,40	3,61	1,00	8,19
D	-3,74	-2,83	4,97	$-1{,}43\times10^{1}$

Tableau 12 : Valeurs des paramètres du modèle identifiés pour une planchette de hêtre (80×10×100 mm)

Paramètre	90 °C	120 °C
X_{cr} (%)	80,6	78,0
A	1,94	$4{,}89\times10^{-1}$
B	-2,15	$-6{,}44\times10^{-1}$
C	9,21	$1{,}08\times10^{1}$
D	-8,85	$-1{,}11\times10^{1}$

Tableau 13 : Valeurs des paramètres du modèle identifiés pour un billon d'eucalyptus (Ø 85×300 mm)

D'après le Tableau 12, nous pouvons remarquer que les valeurs de teneur en eau critique sont, pour les échantillons non saturés initialement, très inférieures à celles des échantillons saturés. Ceci vient confirmer l'analyse de l'influence de la teneur en eau initiale sur la cinétique de séchage, formulée dans le paragraphe II-1-3-1 de ce premier chapitre.

Par ailleurs, conformément à nos attentes, une élévation de température semble se traduire par l'augmentation de cette teneur en eau critique. À haute température, une couche sèche périphérique se forme rapidement car la vitesse de séchage élevée n'est plus compensée par l'alimentation capillaire en eau libre. Cependant, pour conclure définitivement à propos de l'effet de la température, et plus

généralement de la sévérité du séchage, sur la teneur en eau critique il serait important de découpler ce paramètre de l'humidité relative. Or, notre dispositif expérimental ne nous le permet pas.

III : Validation du modèle de Van Meel étendu

Il s'agit ici de valider la formulation du modèle de Van Meel étendu. Pour ce faire, nous démontrerons dans cette partie son potentiel prédictif et son intérêt par rapport au modèle original lorsque le produit est soumis à des conditions de température constante puis variable.

III-1 : A température constante

Dans cette partie, nous nous attachons à comparer des résultats issus de l'expérimentation (témoin) et ceux de la simulation (modèle original et étendu). Nous prenons pour exemple l'essai de séchage de la planchette de hêtre courte (80 mm) et épaisse (10 mm) à 60 °C pour lequel la température est maintenue constante tout au long de l'essai, seul l'humidité relative varie puisqu'elle n'est pas contrôlée.

Pour pouvoir utiliser le modèle original de Van Meel, il est préalablement nécessaire d'identifier la courbe caractéristique de séchage et de discrétiser l'équation de la vitesse de séchage dans le temps (Equation 2.1). La mise en œuvre du modèle original de Van Meel est présentée en Annexe VI.

III-1-1 : Cinétiques de séchage expérimentale et numériques

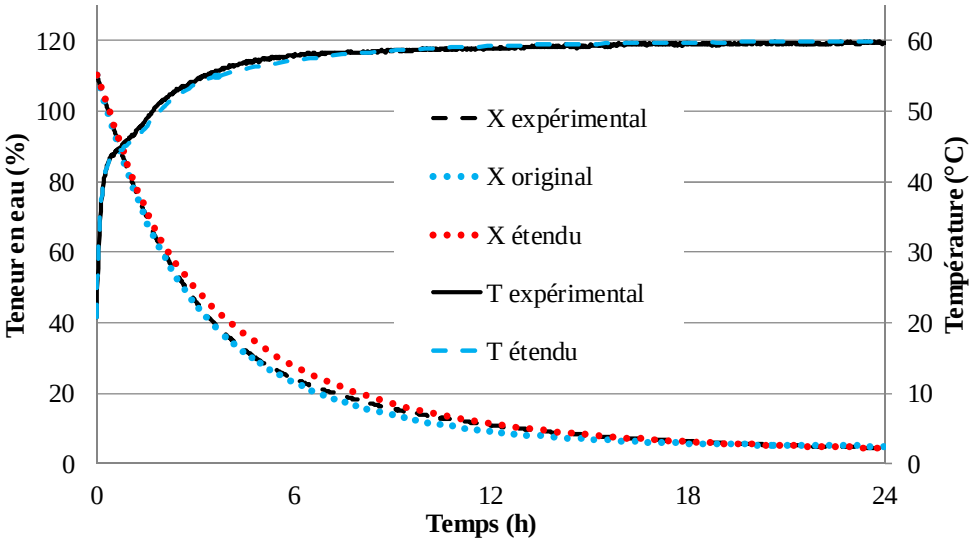


Figure 49 : Comparaison des cinétiques de séchage à 60 °C pour une planchette de hêtre (80×10×100 mm)

À partir de la courbe caractéristique (modèle *original*) ou de l'activité (modèle *étendu*) identifiées, des conditions climatiques dans l'enceinte et des coefficients de transferts externes, il est possible de tracer l'évolution de la teneur en eau moyenne (les 2 modèles) et de la température de la particule de bois (modèle étendu uniquement). Le graphique ci-dessus confronte les cinétiques expérimentale et numériques pour la planchette de hêtre précédente séchée à température constante dans notre dispositif expérimental.

Dans le cas choisi nous n'observons pas de condensation à la surface du bois car la température initiale du bois est supérieure à la température de rosée de l'air, respectivement égale à 21 °C et 19 °C.

III-1-2 : Validité des modèles

Compte tenu de la parfaite superposition des courbes de perte de teneur en eau et de température, notre modèle étendu prend correctement en compte le couplage chaleur/masse. Nous pouvons conclure que le modèle de Van Meel, original et étendu, sont validés pour les conditions énumérées dans le paragraphe précédent : température constantes et pas de condensation à la surface de la particule froide en début du séchage.

Aucune condensation n'ayant été observée lors des essais expérimentaux, nous ne pouvons pour l'heure, rien conclure quant à la validité des deux modèles en cas d'occurrence de ce phénomène. Nous reviendrons sur ce point dans le paragraphe III-2-2-2 de ce même chapitre.

Avec les éléments présentés jusqu'alors, nous pouvons démontrer l'intérêt du modèle étendu par rapport à l'original en sa capacité à prédire l'évolution la température de la particule.

III-2 : En conditions climatiques variables : comparaison avec cinétiques issues simulation par *TransPore* 3-D

Les modèles de Van Meel ayant été validés en conditions climatiques constantes (et en l'absence de condensation), il s'agit de tester leur robustesse en conditions climatiques variables. Pour ce faire, nous soumettons « numériquement » des planchettes à des conditions climatiques que pourraient subir les particules lors de leur traversée d'un séchoir tunnel.

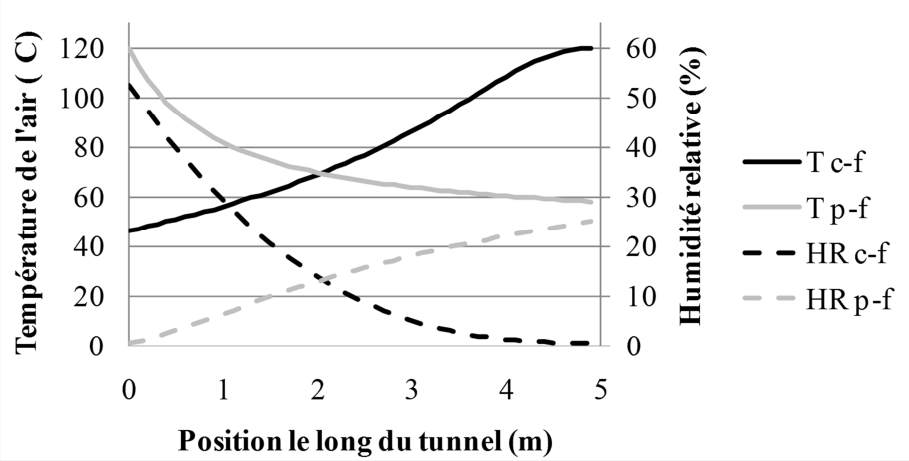


Figure 50 : Evolution spatiales des conditions climatiques dans un séchoir tunnel à co-courant (*p-f*) et contre-courant (*c-f*)

Nous retenons deux configurations simples (Figure 50) : circulation du bois et de l'air à contre-courant ou à co-courant. Dans le premier cas, la particule froide entre dans le tunnel en contact avec de l'air « froid » et chargé en vapeur d'eau. Dans le second cas, la particule froide rentre dans le tunnel en contact avec de l'air chaud et sec.

Pour cet exemple, nous choisissons un tunnel de 5 m de long dans lequel le bois circule avec une vitesse de 1 $m.s^{-1}$. L'air injecté est à une température de 120 °C, à une humidité relative de 0,6 % et les coefficients de transferts massique et thermique sont respectivement égaux à 0,032 $m.s^{-1}$ et 32 $W.m^{-2}.K^{-1}$.

Afin de tester la validité des modèles de Van Meel nous ne modéliserons pas le système dans son ensemble (lit de particule et tunnel) : nous nous limiterons au séchage d'une particule isolée soumise à une évolution temporelle des conditions climatiques telle qu'elle aurait pu en rencontrer dans un séchoir tunnel.

La particule étudiée dans ce paragraphe est une planchette de hêtre (80×10×100 mm) ayant une température initiale de 20 °C et une teneur en eau de 115 %.

III-2-1 : Utilisation de TransPore pour obtenir de cinétiques témoin en conditions climatiques variables

Pour obtenir les cinétiques de séchage de particules isolées soumises aux conditions climatiques variables présentées ci-dessus, le dispositif expérimental décrit précédemment n'est pas adapté. D'une part, la température de l'air ne peut pas être régulée suffisamment finement compte tenu de l'inertie thermique du réacteur et, d'autre part, ce dispositif ne comporte pas de mécanisme de régulation de l'humidité relative.

De ce fait, nous utilisons le modèle *TransPore* (cf. Annexe I) validé pour ses prédictions des transferts de masse et chaleur au sein d'avivés de hêtre. Dans le cas du bois énergie, en raison de la diversité des géométries de particules, il est difficile de négliger les transferts massique et thermique dans l'une des directions d'anisotropie du bois. Ceci explique que nous choisissions la version tridimensionnelle de *TransPore* (Perré et Turner, 1999). Ainsi nous pouvons acquérir les cinétiques *témoin* en simulant le séchage de planchettes isolées.

III-2-1-1 : Confrontation des simulations de *TransPore* avec l'expérience

Préalablement à l'utilisation de *TransPore* pour simuler le séchage de particules en conditions variables, il est nécessaire de confronter les simulations du code avec les résultats expérimentaux afin d'éventuellement ajuster certains paramètres du modèle connus pour leur très grande variabilité intra- et inter-arbre.

Les caractéristiques initiales de nos échantillons (dimensions géométriques, teneur en eau initiale, densité, etc.) sont entrées dans le code *TransPore*, ainsi que les grandeurs physiques moyennes pour cette essence. Cependant, la perméabilité intrinsèque, grandeur connue pour son importante variabilité, a été ajustée autour des valeurs de la littérature (Agoua, 2001 ; Perré et Karimi, 2002) afin que les résultats numériques et expérimentaux s'accordent. Cet ajustement consiste en la multiplication par quatre des valeurs issues de la littérature pour les perméabilités dans les trois directions d'anisotropie du bois (Tableau 14).

Direction	Perméabilité gazeuse	Perméabilité liquide
Radiale	$1{,}6\times10^{-15}$	$1{,}6\times10^{-15}$
Tangentielle	$1{,}2\times10^{-16}$	$1{,}2\times10^{-15}$
Longitudinale	$5{,}6\times10^{-12}$	$5{,}6\times10^{-12}$

Tableau 14 : Valeurs retenues de perméabilités pour alimenter *TransPore* (m^2)

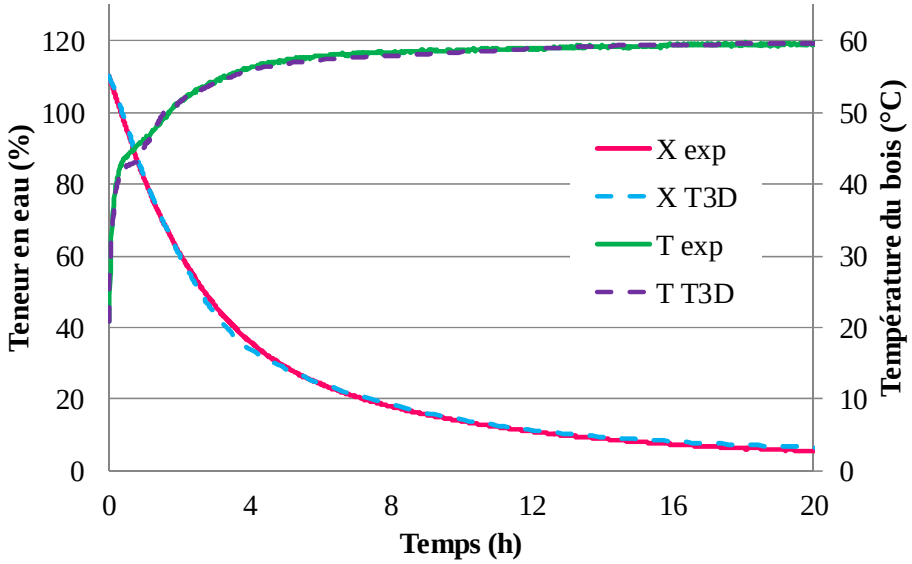


Figure 51 : Cinétiques expérimentale (*exp*) et numérique (*T3D*) de séchage à 60 °C pour une planchette de hêtre (80×10×100 mm)

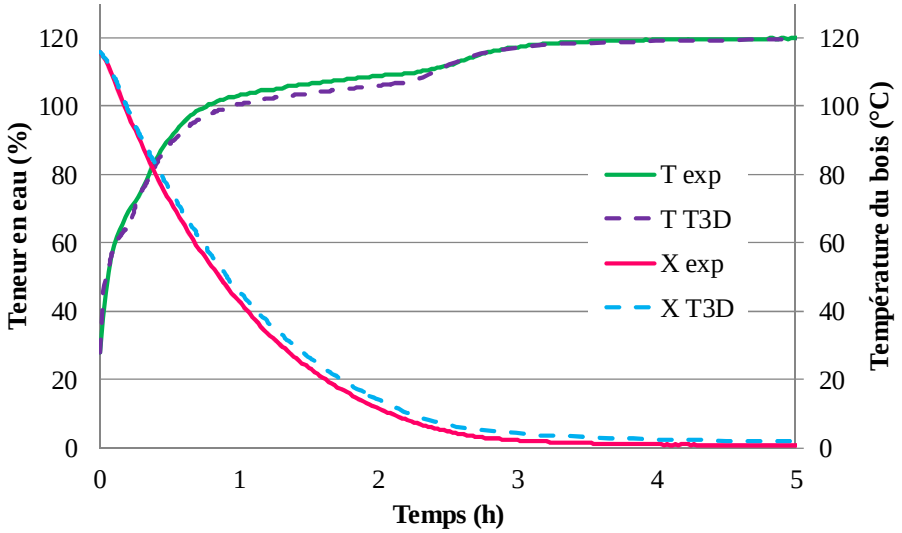


Figure 52 : Cinétiques expérimentale (*exp*) et numérique (*T3D*) de séchage à 120 °C pour une planchette de hêtre (80×10×100 mm)

Les Figures 51 et 52 confirment la pertinence des valeurs de perméabilité choisies : les évolutions temporelles de teneur en eau et de température du bois se superposent de façon très acceptable.

III-2-1-2 : Cinétiques obtenues

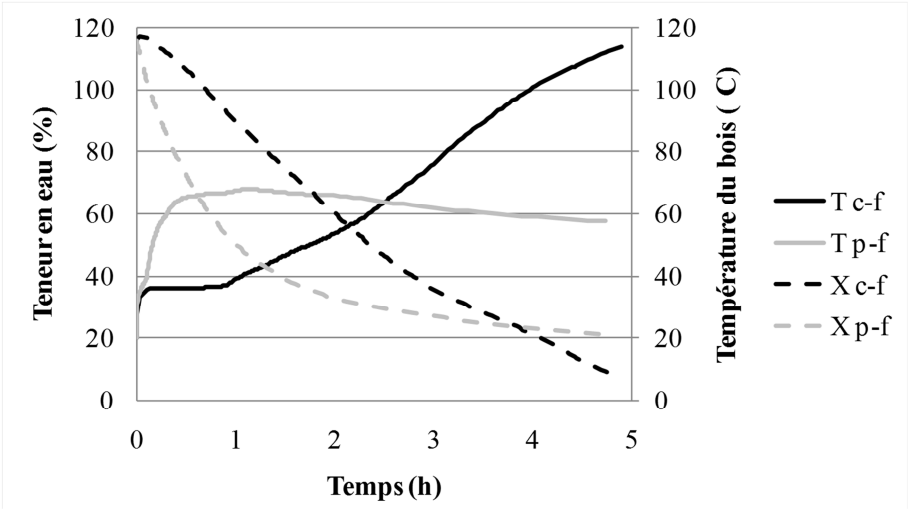


Figure 53 : Prédictions par *TransPore* 3-D de cinétiques de séchage d'une planchette de hêtre (80×10×100 mm) soumise aux conditions climatiques observées dans un séchoir tunnel, en co-courant (*p-f*) et contre-courant (*c-f*)

Dans la configuration à co-courant, notée *p-f* pour *parallel-flow* en anglais, le bois est initialement soumis à un air sec et chaud. La vitesse de séchage est donc importante et nous n'observons pas de phénomène de condensation. À la fin du séchage, l'air est *a contrario* froid et chargé en vapeur d'eau : la vitesse de séchage chute. En outre, la teneur en eau d'équilibre du bois est relativement élevée (4,2 %).

En revanche, dans le cas de la configuration à contre-courant, notée *c-f* pour *counter-flow* en anglais, le bois est initialement soumis à un air plus froid et chargé en humidité. La vitesse de séchage est donc faible et nous observons un phénomène de condensation d'eau à la surface de la particule. En fin de séchage, l'air est *a contrario* chaud et sec : la vitesse de séchage se maintient à une valeur élevée (comparativement au premier cas) et ce malgré la faible teneur en eau. En outre, la teneur en eau d'équilibre du bois est proche de zéro.

III-2-2 : Confrontation des résultats de simulation

III-2-2-1 : Validité du modèle de Van Meel étendu

Pour la géométrie de particule considérée (80×10×100 mm), nous disposons de deux jeux de données, le premier obtenu à 60 °C et le second à 120 °C (paragraphe II-3-3-2 de ce même chapitre). Le choix des paramètres du modèle s'opère en fonction de la gamme de température dans laquelle s'effectue l'essentiel du séchage (dans le cas présent, cette phase correspond au début du séchage). En effet, comme mentionné dans le paragraphe II-3-1 du Chapitre 1, les modes et intensités de migration de l'eau (liquide et gazeuse) dans le bois diffèrent si le séchage a lieu à haute température, au-delà de 100 °C, ou non. Selon ce critère, nous choisissons le jeu de paramètres identifié à 120 °C dans le cas du co-courant (les particules sont en contact avec un air chaud et sec en entrée du séchoir) et à 60 °C dans le cas du contre-courant (les particules sont en contact avec un air froid et humide en entrée du séchoir).

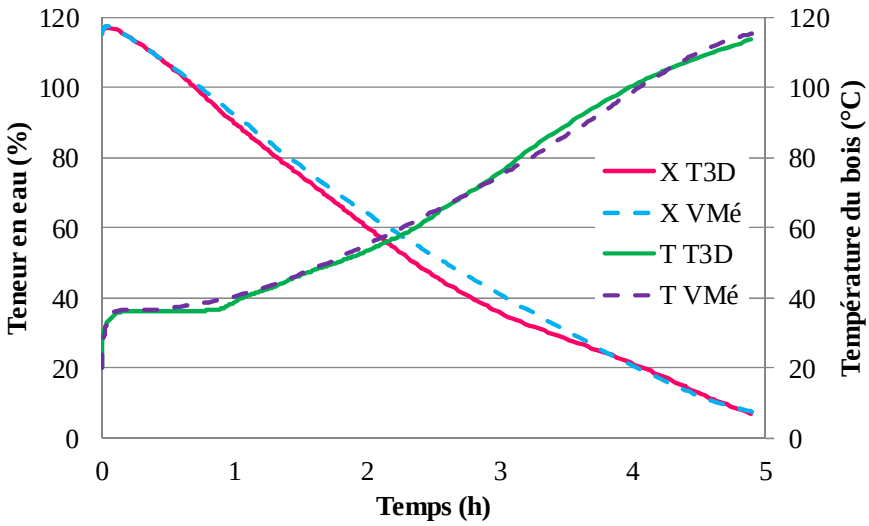


Figure 54 : Comparaison des prédictions de cinétiques de séchage en <u>contre-courant</u> d'une planchette de hêtre (80×10×100 mm) par *TransPore* 3-D (*T3D*) et le modèle de Van Meel étendu (*VMé*)

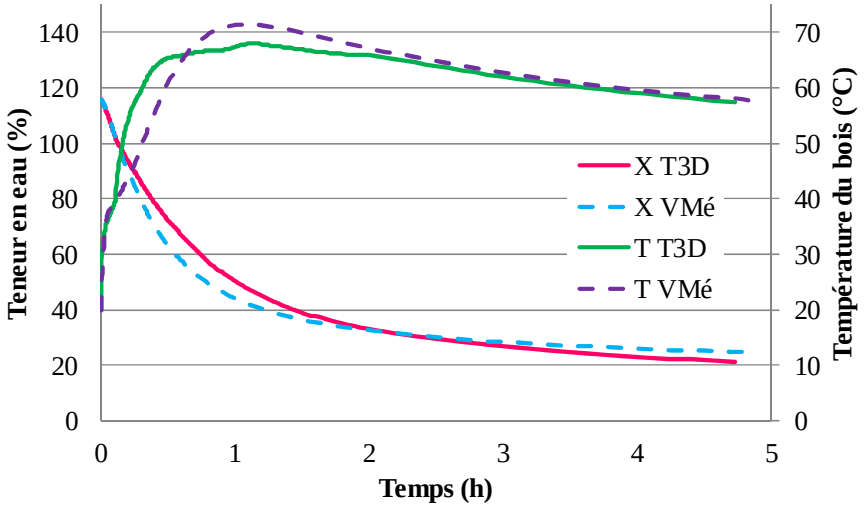


Figure 55 : Comparaion des prédictions de cinétiques de séchage en <u>co-courant</u> d'une planchette de hêtre (80×10×100 mm) par *TransPore* 3-D (*T3D*) et le modèle de Van Meel étendu (*VMé*)

Bien que la superposition des courbes ne soit pas parfaite (Figures 54 et 55), notamment dans le cas du co-courant, nous pouvons observer que les deux modèles prédisent les mêmes tendances, que ce soit pour la température du bois ou sa teneur en eau. En outre, les écarts entre les courbes peuvent être jugés comme acceptables en regard de l'incertitude liée à la variabilité naturelle du bois. Par ailleurs, pour la configuration à contre-courant, le modèle de Van Meel étendu simule une phase de condensation d'eau à la surface de la particule, conformément aux résultats de simulation de *TransPore* 3-D.

Nous pouvons dès lors considérer que le modèle de Van Meel étendu est validé et ce pour des conditions climatiques plus étendues que celles qui ont servi à l'identification de l'activité de surface.

III-2-2-2 : Pertinence de l'extension du modèle de Van Meel

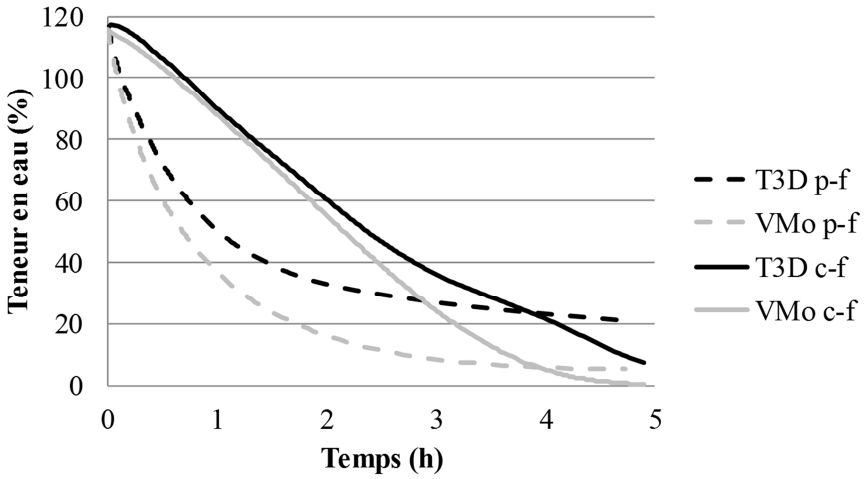


Figure 56 : Comparaion des prédictions de cinétiques de séchage en co-courant (*p-f*) ou en contre-courant (*c-f*) d'une planchette de hêtre (80×10×100 mm) par *TransPore* 3-D (*T3D*) et le modèle original de Van Meel (*VMo*)

Quelle que soit la configuration étudiée, la Figure 56 montre que le modèle original de Van Meel prédit une teneur en eau inférieure à celle du témoin (simulée par *TransPore*). Ceci est la conséquence des deux effets résultant du couplage implicite, dans le modèle de van Meel original, entre transfert de masse et de chaleur. Premièrement, le modèle original de Van Meel considère que l'ensemble de la chaleur apportée à la particule est utilisée pour évaporer l'eau quelle contient : la chaleur nécessaire au chauffage du produit est donc négligée face à la chaleur latente de vaporisation. Deuxièmement, dans le cas de la configuration en contre-courant, le modèle original est incapable de simuler le phénomène de condensation observé avec *TransPore* et le modèle original. Ainsi, l'écart entre les prédictions se creuse dès les premiers instants du séchage.

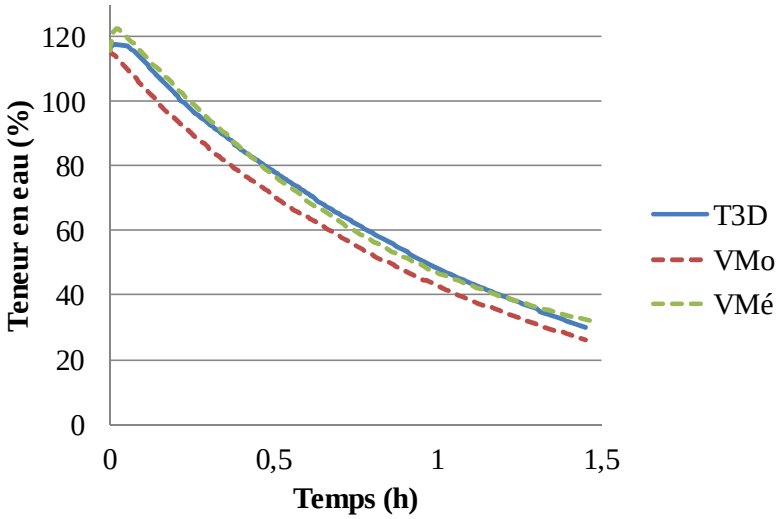


Figure 57 : Comparaion de cinétiques de séchage à 120 °C et 13 % d'humidité relative d'une planchette de hêtre (80×10×100 mm) prédites par *TransPore* 3-D (*T3D*) et les modèles de Van Meel, original (*VMo*) et étendu (*VMé*)

La Figure 57 confirme que le modèle original sous-estime la teneur en eau de la particule, dès l'instant qu'une condensation se produit, quand bien même les conditions climatiques sont constantes. Nous pouvons remarquer que l'extension proposée dans cette étude contribue significativement à rendre le modèle de Van Meel étendu robuste vis-à-vis de la diversité de conditions climatiques observable dans le cadre du séchage continu.

Du point de vue de la précision des résultats, la prise en compte du couplage entre transferts de chaleur et de masse de façon explicite constitue donc un avantage considérable.

Conclusion du chapitre 2

Grâce aux travaux expérimentaux et numériques menés à l'échelle de la particule et présentés dans ce chapitre, nous disposons d'un modèle semi-analytique simulant fidèlement le séchage de particules de bois isolées (planchette de hêtre et rondins d'eucalyptus). En effet, il est démontré que la prise en compte du couplage chaleur/masse de façon explicite dans le modèle de Van Meel étendu conduit à un gain considérable de la capacité de prédiction.

Cette extension du modèle original permet par ailleurs d'accéder à deux paramètres d'état clefs de la particule : sa température (moyenne) et sa teneur en eau. Ceci est indéniablement un atout pour calculer les flux locaux de chaleur et de masse à sa surface. Or l'estimation de ces flux locaux est indispensable pour la modélisation double-échelle du séchage en continu : l'évolution spatiale des conditions climatiques résulte de la somme des flux locaux de chaleur et de masse (cf. Chapitre 3).

En outre, ce gain d'information concernant l'état de la particule au cours du séchage n'est pas trop préjudiciable au temps de calcul. Pour simuler cinq heures de séchage d'une planchette (80×10×100 mm) de hêtre, le modèle de Van Meel étendu nécessite un temps de calcul nettement inférieur au dixième de seconde avec un ordinateur de bureau (Microprocesseur Intel de 2,66 GHz). Parallèlement, la simulation de la même configuration avec *TransPore* 3-D dure plus d'une heure. Cette réactivité du modèle de Van Meel étendu est conforme à sa mise en œuvre envisagée en tant que module du modèle double-échelle en vue de simuler le séchage du bois énergie : il n'est pas rare que le nombre de particules dans un séchoir dépasse la dizaine de milliers.

Enfin, comme tout travail, celui-ci est perfectible. Tout d'abord, une solution est proposée en Annexe III pour différencier les températures moyenne et de surface. Faute de temps, cet aspect n'a pas été exploré au-delà de son aspect théorique. De plus, il serait intéressant de coupler ce travail à une étude de la diversité des activités adimensionnelles. En effet, les résultats concernant la configuration à co-courant (cf. Chapitre 2 : III-2-2-1), bien que satisfaisants, laissent entrevoir que des améliorations sont possibles. À partir de cinétiques simulées par *TransPore*, nous pourrions étudier la sensibilité des paramètres de l'activité adimensionnelle (X_{cr}, A, B, C et D) aux conditions climatiques. De même, il serait envisageable de créer des abaques tenant compte des paramètres initiaux de la particule, notamment sa géométrie, sa teneur en eau initiale et l'essence (bien que judicieuse, diverses essences étant souvent mélangées lors de la récolte du bois énergie, l'étude de ce dernier paramètre nécessite un travail expérimental fastidieux pour alimenter en paramètres physiques et valider *TransPore*). En vue de la création de ces abaques, *TransPore* constitue un outil fiable et fonctionnel : d'une part, le contrôle des conditions climatiques est aisé et d'autre part, l'obtention des cinétiques et leur traitement peut s'opérer en routine.

Chapitre 3 : De la particule au lit de particules : modélisation multi-échelle

Introduction du chapitre 3

Le travail mené à l'échelle de la particule, présenté dans le chapitre précédent, nous permet de prédire le comportement d'une pièce de bois isolée lors du séchage en connaissant les conditions climatiques environnantes. Nous souhaitons maintenant utiliser les résultats acquis afin de simuler le séchage d'un lit de particules dans un séchoir en continu. Cependant, pour prédire l'évolution de la teneur en eau du bois le long de ce type de séchoir, il est indispensable de connaitre le profil des paramètres de l'air.

Or le long du séchoir, les paramètres de l'air ne sont pas régulés localement : l'évolution spatiale de la température et de l'humidité relative de l'air résulte de flux locaux de chaleur et de masse. En effet, la masse d'air perd de l'énergie et se charge en humidité au contact du bois. Cette évolution spatiale ne peut donc pas être connue *a priori* car il existe un couplage bidirectionnel fort entre l'état du bois et celui de l'air.

Dans ce chapitre nous proposons d'utiliser une approche multi-échelles pour prédire l'évolution des paramètres du bois à partir de ceux de l'air, en déduire l'intensité des flux locaux de chaleur et de masse à la surface de chaque particule et estimer les nouveaux paramètres de l'air. Cette structure multi-échelles du modèle permettra, en outre, de simuler la variabilité naturelle du bois et de mettre en évidence l'impact de celle-ci sur les cinétiques de séchage. Enfin, afin de refléter au mieux la réalité, le modèle développé tiendra également compte des déperditions thermiques et des éventuels phénomènes de condensation au niveau de l'enveloppe du séchoir.

En premier lieu, nous présenterons en détail le modèle développé en nous attardant sur sa structure, sur les équations bilans et sur leur mode de résolution. Nous analyserons ensuite les données recueillies dans le cadre d'une campagne d'étude expérimentale du séchage d'un lit de particules. Ceci nous permettra enfin de valider la modélisation à l'échelle du séchoir en confrontant les résultats numériques et expérimentaux.

I : Modélisation numérique du séchage d'un lit de particules dans un séchoir

Il s'agit dans cette partie d'expliciter la modélisation du système *séchoir*, de présenter les équations de conservation de chaleur et de masse permettant de prédire l'évolution spatiale des paramètres de l'air et de décrire leur mode de résolution.

Dans la suite du manuscrit, la notion de *modèle global* est utilisée à l'échelle du séchoir et celle de *modèle local* à l'échelle de la particule.

I-1 : Description générique des phénomènes de transfert

I-1-1 : Couplage entre modèles local et global

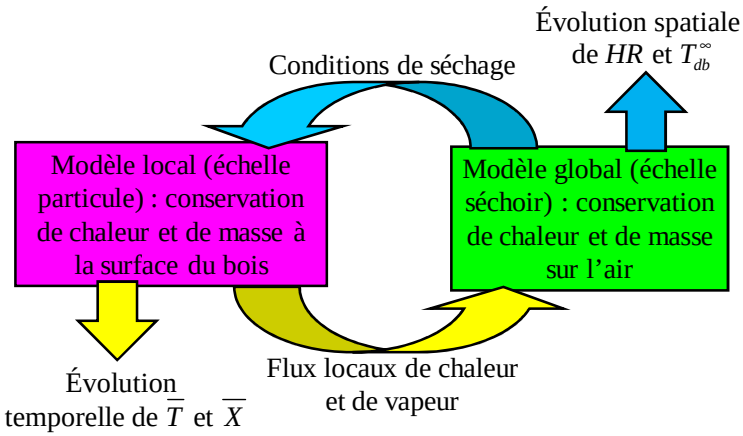


Figure 58 : Dialogue entre les échelles *particule* et *séchoir*

Le modèle global permet de calculer l'évolution des paramètres de l'air le long du séchoir à partir des transferts de chaleur et de masse simulés à la surface de chaque particule (grâce au modèle de Van Meel étendu), de l'intensité des déperditions thermiques à travers la paroi du séchoir et de la condensation à la surface de celle-ci. Pour ce faire, nous utilisons le système d'équations décrit dans le modèle *Pile* (Perré et Rémond, 2006) afin de tenir compte du couplage bidirectionnel entre les échelles *particule* et *séchoir* (Figure 58).

I-1-2 : Mise en équation à l'échelle du séchoir

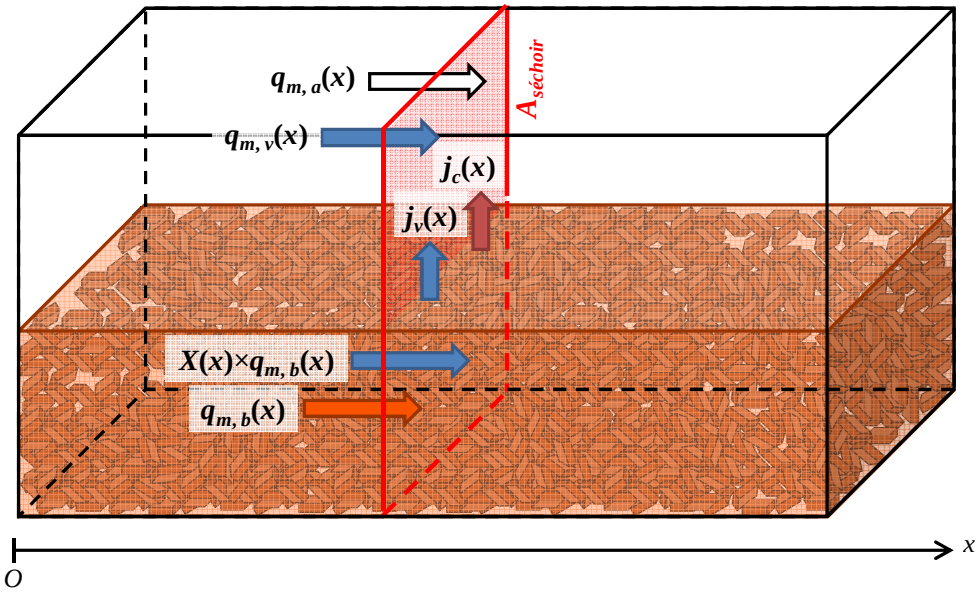


Figure 59 : Flux de chaleur et de masse entre le lit de bois et l'écoulement d'air, exemple d'un séchoir à lit entrainé

En fonctionnement, le séchoir est traversé par deux flux de matière. Il s'agit du lit de bois humide d'une part et de l'écoulement d'air humide d'autre part. Tout au long du réacteur, nous observons des transferts de chaleur et de masse (eau) entre ces deux compartiments.

Remarque : dans un souci de clarté, nous excluons dans un premier temps les transferts entre l'air et l'enveloppe du séchoir de la description des équations suivantes ; ces transferts seront intégrés à la formulation dans le paragraphe I-1-2-3 de ce même chapitre.

Le système d'étude est désormais le séchoir continu traversé par un écoulement d'air et un lit de particules de bois (Figure 59). Dans cette configuration choisie pour la présentation du modèle global, l'air et le bois circulent dans le séchoir à co-courant. Ainsi, nous pouvons différencier deux sous-systèmes : l'air humide et le bois humide.

Pour chaque composant de ces deux sous-systèmes (bois anhydre, eau liquide, air sec et vapeur d'eau), nous pouvons définir une densité moyenne sur l'ensemble de la section du séchoir ($A_{séchoir}$) :

$$\overline{\rho_i} = \frac{1}{A_{séchoir}} \iint_{A_{séchoir}} \rho_i(x,y,z) \times d\Omega \tag{3.1}$$

Le lit de bois présente une surface spécifique linéaire notée $S_{spé\ lin,\ bois}$ en mètre carré de surface d'échange bois/air par mètre de séchoir selon son axe principal.

A partir de la description du système, nous pouvons établir les équations de conservation régissant les transferts.

I-1-2-1 : Equations de conservation de masse

Au niveau du CV, nous appliquons le principe de la conservation de masse à l'eau.

- Eau liquide contenue dans les particules de bois :

$$A_{séchoir} \times \overline{\rho_b} \times \frac{\partial X}{\partial t} + div\left(X \times q_{m,b}\right) = -j_{v,bois} \times Surf_{spé\,lin,bois} \tag{3.2}$$

- Vapeur d'eau contenue dans l'air humide :

$$A_{séchoir} \times \frac{\partial \overline{\rho_v}}{\partial t} + div\left(q_{m,v}\right) = j_{v,bois} \times Surf_{spé\,lin,bois} \tag{3.3}$$

Pour ces deux équations, le premier membre correspond au terme d'accumulation, le deuxième représente le bilan des flux convectifs et le troisième désigne le terme source (ou puits).

Les déplacements de l'air et du bois étant monodirectionnels (selon *x*), ce couple d'équations devient :

$$A_{séchoir} \times \overline{\rho_b} \times \frac{\partial X}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(X \times q_{m,b}\right) = -j_{v,bois} \times Surf_{spé\,lin,bois} \tag{3.4}$$

$$A_{séchoir} \times \frac{\partial \overline{\rho_v}}{\partial t} + \frac{\partial q_{m,v}}{\partial x} = j_{v,bois} \times Surf_{spé\,lin,bois} \tag{3.5}$$

Le gaz n'étant pas une phase de stockage par rapport au solide, nous considérons son terme d'accumulation négligeable. Ainsi, l'Equation 3.5 devient :

$$\frac{\partial q_{m,v}}{\partial x} = j_{v,bois} \times Surf_{spé\,lin,bois} \tag{3.6}$$

I-1-2-2 : Equations de conservation de chaleur

Nous pouvons écrire l'équation de conservation de l'enthalpie sur le lit de particule :

$$\begin{aligned} & A_{séchoir} \times \frac{\partial}{\partial t}\left(\overline{\rho_b} \times \mathrm{h}_b\left(T_{solide}\right) + X \times \overline{\rho_b} \times \mathrm{h}_l\left(T_{solide}\right)\right) \\ & \quad + div\left(q_{m,b} \times \mathrm{h}_b\left(T_{solide}\right) + X \times q_{m,b} \times \mathrm{h}_l\left(T_{solide}\right)\right) \\ & \quad = -Surf_{spélin,bois} \times j_{c,bois} - Surf_{spélin,bois} \times j_{v,bois} \times \mathrm{h}_v\left(T_{solide}\right) \end{aligned} \tag{3.7}$$

D'après le bilan de chaleur sur l'ensemble du système, nous avons :

$$\begin{aligned} & A_{séchoir} \times \frac{\partial}{\partial t}\left(\overline{\rho_b} \times \mathrm{h}_b\left(T_{solide}\right) + X \times \overline{\rho_b} \times \mathrm{h}_l\left(T_{solide}\right)\right) \\ & \quad + div\left(q_{m,b} \times \mathrm{h}_b\left(T_{solide}\right) + X \times q_{m,b} \times \mathrm{h}_l\left(T_{solide}\right)\right) \\ & \quad + A_{séchoir} \times \frac{\partial}{\partial t}\left(\overline{\rho_a} \times \mathrm{h}_a\left(T_{gaz}\right) + \overline{\rho_v} \times \mathrm{h}_v\left(T_{gaz}\right)\right) \\ & \quad + div\left(q_{m,a} \times \mathrm{h}_a\left(T_{gaz}\right) + q_{m,v} \times \mathrm{h}_v\left(T_{gaz}\right)\right) = 0 \end{aligned} \tag{3.8}$$

L'équation de conservation de chaleur appliquée à l'écoulement d'air s'écrit donc:

$$\begin{aligned} & A_{séchoir} \times \frac{\partial}{\partial t}\left(\overline{\rho_a} \times \mathrm{h}_a\left(T_{gaz}\right) + \overline{\rho_v} \times \mathrm{h}_v\left(T_{gaz}\right)\right) + div\left(q_{m,a} \times \mathrm{h}_a\left(T_{gaz}\right) + q_{m,v} \times \mathrm{h}_v\left(T_{gaz}\right)\right) \\ & \quad = Surf_{spélin,bois} \times j_{c,bois} + Surf_{spélin,bois} \times j_{v,bois} \times \mathrm{h}_v\left(T_{solide}\right) \end{aligned} \tag{3.9}$$

Pour les Equations 3.7 et 3.9, le premier membre correspond au terme d'accumulation, le deuxième représente le bilan des flux convectifs et les deux derniers désignent les termes source (ou puits).

Par rapport au lit de particule, l'air n'est pas considéré comme une phase de stockage. Ainsi, le terme d'accumulation peut-être négligé et l'Equation 3.9 peut être approximée comme suit :

$$\begin{aligned} & div\left(q_{m,a} \times \mathrm{h}_a\left(T_{gaz}\right) + q_{m,v} \times \mathrm{h}_v\left(T_{gaz}\right)\right) \\ & \quad = Surf_{spélin,bois} \times j_{c,bois} + Surf_{spélin,bois} \times j_{v,bois} \times \mathrm{h}_v\left(T_{solide}\right) \end{aligned} \tag{3.10}$$

Les déplacements de l'air et du bois étant monodirectionnels (selon *x*), l'Equation 3.10 devient :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}\left(q_{m,a} \times \mathrm{h}_a\left(T_{gaz}\right) + q_{m,v} \times \mathrm{h}_v\left(T_{gaz}\right)\right) \\ & \quad = Surf_{spélin,bois} \times j_{c,bois} + Surf_{spélin,bois} \times j_{v,bois} \times \mathrm{h}_v\left(T_{solide}\right) \end{aligned} \tag{3.11}$$

Les enthalpies de référence (valeurs nulles) sont définies pour la matière lignocellulosique sèche et de l'eau liquide à 0 °C. De même, L_v^0 est l'enthalpie de changement de phase à 0°C. L'Equation 3.11 devient :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}\left(q_{m,a} \times c_{P,a} \times T_{gaz} + q_{m,v} \times \left(L_v^0 + c_{P,v} \times T_{gaz}\right)\right) \\ & \quad = Surf_{spélin,bois} \times j_{c,bois} + Surf_{spélin,bois} \times j_{v,bois} \times \left(L_v^0 + c_{P,v} \times T_{gaz}\right) \end{aligned} \tag{3.12}$$

Remarque : conformément à notre référence pour les enthalpies, nous exprimons les températures en degrés Celsius.

Le premier membre de l'équation précédente peut alors être écrit de la façon suivante :

$$\begin{aligned}&\frac{\partial}{\partial x}\left(q_{m,a}\times c_{P,a}\times T_{gaz}+q_{m,v}\times\left(L_v^0+c_{P,v}\times T_{gaz}\right)\right)\\&=\left(q_{m,a}\times c_{P,a}+q_{m,v}\times c_{P,v}\right)\times\frac{\partial T_{gaz}}{\partial x}+\frac{\partial q_{m,v}}{\partial x}\times\left(L_v^0+c_{P,v}\times T_{gaz}\right)\end{aligned} \tag{3.13}$$

Ainsi, nous obtenons :

$$\begin{aligned}\left(q_{m,a}\times c_{P,a}+q_{m,v}\times c_{P,v}\right)\times\frac{\partial T_{gaz}}{\partial x}&=-\frac{\partial q_{m,v}}{\partial x}\times\left(L_v^0+c_{P,v}\times T_{gaz}\right)\\&+Surf_{spélin,bois}\times j_{c,bois}+Surf_{spélin,bois}\times j_{v,bois}\times\left(L_v^0+c_{P,v}\times T_{solide}\right)\end{aligned} \tag{3.14}$$

Et d'après l'Equation 3.6, l'Equation 3.14 devient :

$$\begin{aligned}&\left(q_{m,a}\times c_{P,a}+q_{m,v}\times c_{P,v}\right)\times\frac{\partial T_{gaz}}{\partial x}\\&=Surf_{spélin,bois}\times j_{c,bois}+Surf_{spélin,bois}\times j_{v,bois}\times c_{P,v}\times\left(T_{solide}-T_{gaz}\right)\end{aligned} \tag{3.15}$$

I-1-2-3 : Prise en compte des transferts au niveau de la paroi

Par analogie avec les phénomènes décrits entre l'air et le bois, les Equations 3.6 et 3.15 peuvent intégrer les transferts observés entre l'air et la paroi du séchoir. Nous obtenons ainsi le couple d'équations suivant :

$$\frac{\partial q_{m,v}}{\partial x}=j_{v,bois}\times Surf_{spélin,bois}+j_{v,paroi}\times Surf_{spélin,paroi} \tag{3.16}$$

$$\begin{aligned}&\left(q_{m,a}\times c_{P,a}+q_{m,v}\times c_{P,v}\right)\times\frac{\partial T_{gaz}}{\partial x}\\&=Surf_{spélin,bois}\times j_{c,bois}+Surf_{spélin,bois}\times j_{v,bois}\times c_{P,v}\times\left(T_{solide}-T_{gaz}\right)\\&+Surf_{spélin,paroi}\times j_{c,paroi}+Surf_{spélin,paroi}\times j_{v,paroi}\times c_{P,v}\times\left(T_{paroi}-T_{gaz}\right)\end{aligned} \tag{3.17}$$

$j_{c,\ paroi}$ correspond au flux de chaleur à travers la paroi tandis que $j_{v,\ paroi}$ correspond au flux de condensation (éventuel) sur la face interne de la paroi.

I-1-3 : Déplacement du lit de particules : d'un mouvement continu à un mouvement saltatoire

L'étude du séchage en continu d'un matériau présentant une forte variabilité (teneur en eau initiale, etc.), tel que le bois, est complexe. D'une part, la variabilité du bois empêche de considérer le lit de particule comme un milieu continu dont les caractéristiques auraient été moyennées : il en résulterait la perte d'une information forte précieuse. D'autre part, en analysant l'équation de conservation de masse pour le sous-système *bois humide* (Equation 3.4), nous remarquons que :

- le terme d'accumulation n'est pas nul en raison de la variabilité de la teneur en eau initiale du bois,
- le bilan des flux convectifs est également non nul puisque le mouvement du bois est continu (le débit massique du bois est non nul).

Or, sans annulation de l'un des termes précédemment nommés, la résolution des équations de conservation trop complexe pour être envisagée en l'état.

En négligeant le premier terme, l'Equation 3.4 devient :

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(X \times q_{m,b}\right) = -j_{v,bois} \times Surf_{spélin,bois} \tag{3.18}$$

Cette équation permet de traiter le cas du séchage d'un milieu continu en régime permanent. En revanche, toute variabilité du bois est alors exclue du domaine de validité de l'équation. Ceci nous amène à envisager un déplacement saltatoire du lit de particule de bois. Le débit de bois instantané devient nul et l'Equation 3.4 devient :

$$A_{séchoir} \times \overline{\rho_b} \times \frac{\partial X}{\partial t} = -j_{v,bois} \times Surf_{spélin,bois} \tag{3.19}$$

A intervalles de temps réguliers *dt*, le lit avance de *dx* en un temps infiniment petit, tel que :

$$dx = v_{lit} \times dt \tag{3.20}$$

De ce fait, la variation de teneur en eau durant ce pas de temps *dt* se transforme en variation spatiale (gradient) grâce aux sauts successifs.

Ainsi, l'adoption d'un déplacement saltatoire permet à la fois de prendre en compte le caractère continu du séchage et l'identité propre de chaque particule résultant de la variabilité des propriétés du bois et de la diversité de géométries des particules.

I-2 : Discrétisation spatiale : imbrication de différents niveaux de description

Nous procédons à une discrétisation spatiale du système *séchoir* en vue de résoudre les équations continues de conservations (Equations 3.16 et 3.17).

Une structure modulaire est adoptée pour obtenir un code générique à l'échelle du séchoir, capable de s'adapter à de nombreuses configurations technologiques. Le séchoir comporte plusieurs niveaux de description : il divisé selon son axe principal en volume de contrôle, module et méta-module. Nous décrivons ici, de la plus petite à la plus grande, les subdivisions considérées le long de l'axe principal du séchoir.

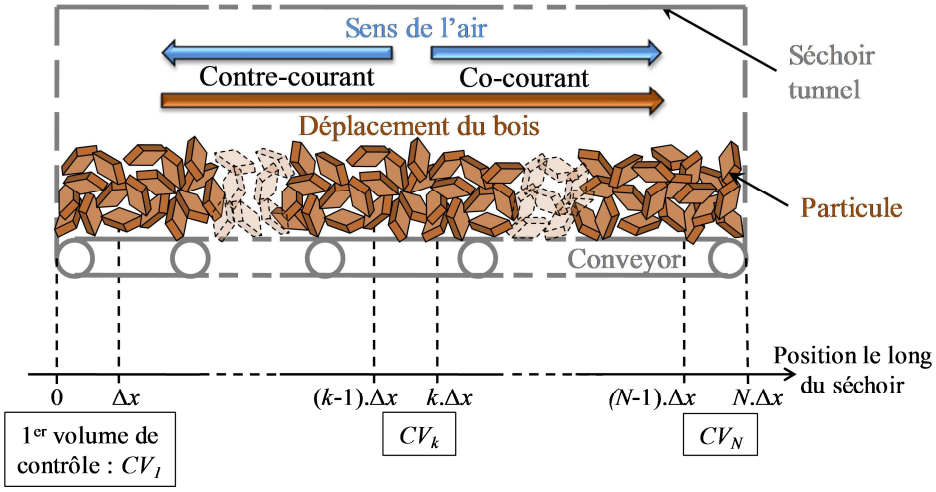


Figure 60 : Schéma de discrétisation d'un séchoir à lit entrainé en *N* volume de contrôle (CV)

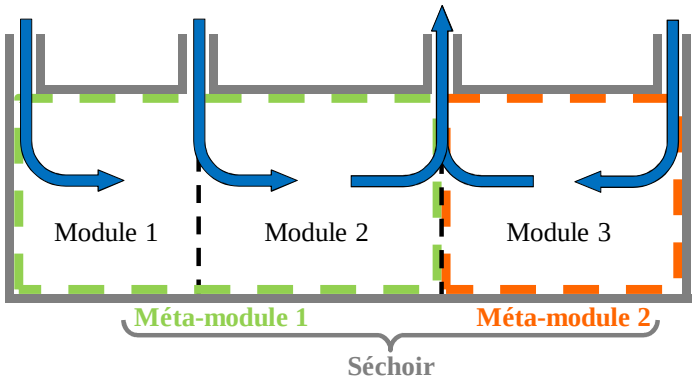


Figure 61 : Schéma de délimitation des modules et des métamodules le long du séchoir tunnel

I-2-1 : Volume de contrôle

Les flux de masse et de chaleur échangés entre, d'une part, la particule et la paroi et, d'autre part, l'écoulement de gaz vont modifier les conditions climatiques vues par les particules suivantes dans le sens de l'écoulement. Afin de décrire le l'évolution longitudinale des conditions climatiques à l'intérieur du séchoir, le volume de celui-ci est discrétisé.

Dans le séchoir, l'air et le lit de bois (éventuellement) se déplacent selon le même axe :

- horizontal (*Ox*) dans le cas d'un séchoir tunnel,
- vertical (*Oz*) dans le cas d'un séchoir à lit fixe mobile.

Selon cet axe, le séchoir est divisé en *N* volumes de contrôle (CV) de longueurs égales (Figure 60) :

$$\Delta x \left(ou\ \Delta z \right) = \frac{L_{séchoir}}{N} \tag{3.21}$$

Leur volume V_{CV} est égal au produit de leur longueur par la section transversale interne du séchoir $A_{séchoir}$. Dans le cas du séchoir tunnel, nous obtenons :

$$V_{CV} = \Delta x \times ht_{séchoir} \times l_{séchoir} \tag{3.22}$$

S'il s'agit d'un séchoir à lit fixe mobile dont le réacteur est un cylindre de révolution vertical, le volume du CV devient :

$$V_{CV} = \Delta z \times \frac{\left(D_{séchoir}\right)^2 \times \pi}{4} \tag{3.23}$$

C'est au niveau de ces CV que les équations de conservation de chaleur et de masse sur l'écoulement d'air seront discrétisées spatialement. Ainsi, le *volume de contrôle* est le niveau de description utile à la prise en compte des flux locaux (au niveau du bois et de la paroi) pour prédire les transformations que subit la masse d'air au cours de sa traversée du séchoir.

Nous considérons que chaque CV contient un même nombre de particules *M*, est entouré d'une même surface de paroi, $Surf_w$, et est traversé par un flux d'air. La longueur de CV doit être suffisamment faible pour qu'en chaque instant les paramètres de l'air puissent y être supposés homogènes selon l'axe principal du séchoir.

I-2-2 : Module

Un module est formé par l'ensemble des CV situés entre deux points successifs d'injection ou d'évacuation d'air (Figure 61). Etant considérés comme nuls au niveau de la paroi, les transferts de matières entre le système *module* et l'« extérieur » ne s'opèrent qu'à ses seules extrémités. En outre, les échanges d'air sec entre le gaz et le lit de bois sont négligeables par rapport aux débits injectés. De ce fait, le débit massique d'air sec le long du module est constant.

I-2-3 : Méta-module

Les modules contigus dans lesquels l'air circule dans le même sens sont regroupés en méta-modules (Figure 61). L'aéraulique au sein du séchoir est décrite dans le modèle de façon très simple : nous considérons que l'échappement des gaz est libre et que le flux de gaz atteignant une évacuation est intégralement extrait du système *méta-module*. Aucune équation de mécanique des fluides n'est utilisée dans ce travail pour suivre une particule de fluide dans son mouvement. Ainsi, nous excluons les cas où les gaz évacués pourraient être répartis au niveau de plusieurs échappements successifs. De ce fait, un méta-module peut comporter un ou plusieurs points d'injection de gaz mais ne dispose que d'un seul point d'extraction.

Ces deux nouveaux niveaux de description, *module* et *méta-module*, permettent de quantifier le débit de gaz traversant les CV successifs : la valeur du débit massique de gaz entrant dans un CV correspond à la somme (*i*) du débit sortant du CV précédent dans le sens de l'écoulement d'air (s'il n'est pas le premier CV du méta-module) et (*ii*), éventuellement, du débit d'air injecté à sa frontière « amont ».

I-2-4 : Séchoir

L'installation industrielle est modélisée à cette échelle (Figure 60 et Figure 61). C'est notamment à ce niveau que nous tiendrons compte des différents types de séchoirs étudiés : nous développons en parallèle une version du code numérique adaptée aux séchoirs tunnels et une autre pour les séchoirs à lit fixe mobile.

Grâce aux résultats obtenus à cette échelle, nous pouvons évaluer les performances de l'installation : efficacité (teneur en eau du bois en sortie) et rendement énergétique par exemple. De même, il nous est possible de tester numériquement des solutions techniques, telles que le recyclage de l'air ou l'isolation des parois.

I-3 : Prédiction des profils d'humidité relative et température d'air à partir des flux de chaleur et de masse au sein du séchoir

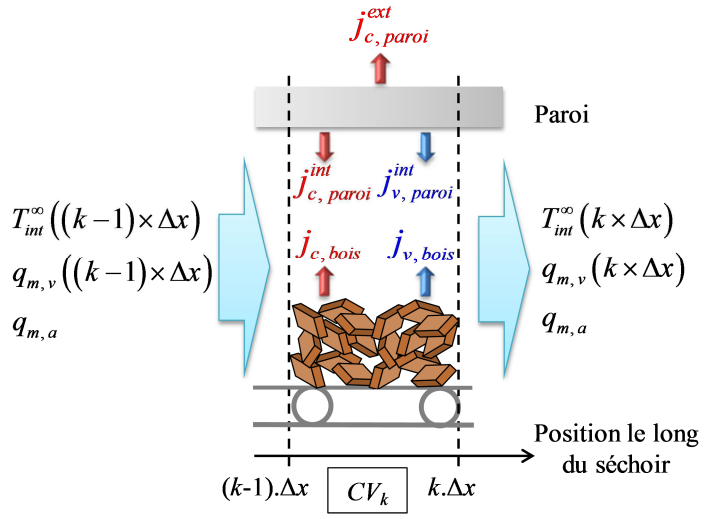


Figure 62 : Flux de chaleur et de masse au sein d'un volume de contrôle pour un séchoir tunnel

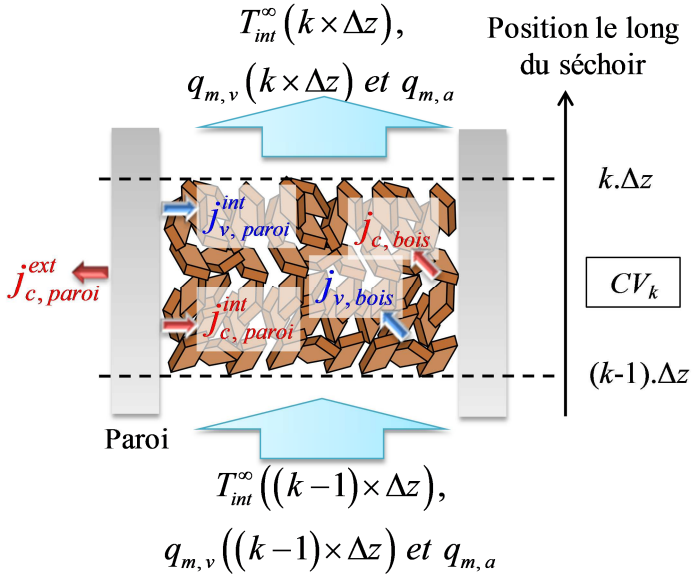


Figure 63 : Flux de chaleur et de masse au sein d'un volume de contrôle pour un séchoir à lit fixe mobile

Au sein d'un CV, deux types d'éléments échangent de la chaleur et de l'eau avec l'air et contribuent à l'évolution spatiale des conditions climatiques : les particules et la paroi du séchoir (Figures 62 et 63). Nous nous attachons dans un premier temps à estimer l'intensité de ces flux pour ensuite pouvoir prédire l'évolution spatiale des conditions climatiques.

I-3-1 : Flux de chaleur et de masse entre l'air et les particules

I-3-1-1 : Description du lit de particules

I-3-1-1-a : Disposition des particules au sein du lit

Dans le lit, les particules sont entassées de façon non organisée. Le lit est donc défini par ses dimensions et sa macroporosité Φ. Dans le lit, cette macroporosité est supposée homogène. Au sein d'un CV, sa valeur peut être calculée selon l'équation suivante :

$$\Phi = 1 - \frac{m_b / \rho_b}{V_{tas}} \tag{3.24}$$

De même, connaissant le volume de la particule moyenne $\overline{V}_{part}$, nous pouvons accéder au nombre M de particules par CV :

$$M = \left\lfloor \frac{V_{tas}}{\overline{V}_{part}} \times (1 - \Phi) \right\rfloor \tag{3.25}$$

Dans le cas d'un séchoir à lit fixe mobile, le lit occupe l'ensemble du volume du CV :

$$M_{lit\ fixe} = \left\lfloor \frac{V_{CV}}{\overline{V}_{part}} \times (1 - \Phi) \right\rfloor \tag{3.26}$$

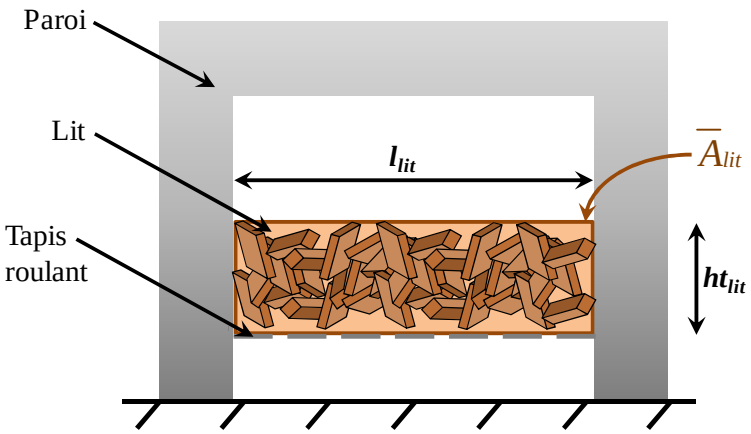


Figure 64 : Section d'un tunnel de séchage

Ce n'est pas le cas d'un séchoir tunnel (Figure 64). L'Equation 3.24 devient :

$$M_{tunnel} = \left\lfloor \frac{\overline{A}_{lit} \times \Delta x}{\overline{V}_{part}} \times (1 - \Phi) \right\rfloor \tag{3.27}$$

Remarque : le modèle de Van Meel étendu ne permettant pas de prédire l'intensité des retraits du bois, nous ne tiendrons pas compte du tassement du lit, synonyme de modification de la macroporosité et/ou de la hauteur du lit.

I-3-1-1-b : Déplacement du lit

Nous nous limitons à l'étude des lits « condensés », c'est-à-dire que nous supposons que les particules sont immobiles les unes par rapport aux autres. Dans le cadre de ce travail de doctorat, nous prenons l'exemple des tunnels de séchage (lit entrainé) et des séchoirs à lit fixe mobile. *A contrario*, les autres types séchoirs rotatifs ou à lit fluidisé sont exclus.

Quel que soit le mode de déplacement, la vitesse du bois est toujours très inférieure à celle de l'air. En outre, par hypothèse, les conditions d'air au sein d'un CV sont homogènes. De ce fait, nous pouvons considérer que le bois est immobile durant son séjour dans le CV. Le mouvement du bois simulé est alors saltatoire. La validité de cette hypothèse et son intérêt pour la prise en compte de la variabilité des particules est démontré dans le paragraphe I-1-3 de ce même chapitre. À chaque pas de temps synchronisé $\Delta t_{séjour}$, le bois progresse d'une distance égale à la longueur du CV :

$$\Delta t_{séjour} = \frac{\Delta x}{v_{lit}} \tag{3.28}$$

I-3-1-1-c : Aéraulique au sein du lit

Comme évoqué dans le paragraphe I-2-3 de ce même chapitre, les équations de transferts de quantité de mouvement au sein de la masse d'air ne sont pas considérées. Nous ne tenons pas compte des résistances au transfert au sein du lit, seules les résistances à l'interface air-bois sont considérées. De ce fait, nous n'étudions pas l'hétérogénéité des paramètres de l'air au sein du lit : pour une section perpendiculaire à la direction principale du séchoir, les conditions climatiques sont supposées homogènes.

Pour qu'en son sein cette hypothèse soit valable, les dimensions du lit doit être favorable :

- le lit doit être de grande section par rapport à la taille de particule si le flux d'air est traversant (cas des séchoirs à lit fixe mobile),
- le lit doit être de faible épaisseur par rapport à la taille de particule si le flux d'air est léchant (cas des séchoirs tunnel).

Dans le premier cas, une grande section permet de limiter des effets de bord au niveau des parois. En outre, la tortuosité des passages d'air permet d'assurer une homogénéisation des paramètres du gaz. Concernant les séchoirs tunnel, la faible distance entre la surface et la base du lit permet de limiter l'intensité des gradients de température et d'humidité relative dans l'épaisseur du lit.

I-3-1-1-a : Simulation de la variabilité des particules

Le développement d'un modèle multi-échelles permet de conférer à chaque particule une identité propre et de voir comment se transmet l'hétérogénéité à travers le procédé. En raison de l'importante variabilité des particules, cet aspect est un avantage majeur dans le cadre du séchage du bois énergie. Cette variabilité est, d'une part, d'origine intrinsèque au matériau (densité, teneur en eau initiale et propriétés de transfert interne) et, d'autre part lié à la production de particule (géométrie et orientation du débit).

En connaissant les paramètres décrivant cette variabilité (type de loi de répartition, moyenne et écart type), il est possible de générer numériquement, par tirage aléatoire, un lit de particules obéissant à cette loi de distribution. La principale difficulté réside dans l'identification empirique de cette loi de répartition. Cet aspect n'est pas abordé dans le cadre de ce doctorat. Actuellement, nous choisissons

arbitrairement une loi normale dont nous modulons les paramètres (moyenne et écart type) pour simuler la variabilité des dimensions de la particule, de son plan de débit et de sa teneur en eau initiale.

I-3-1-2 : Equations de conservation au niveau du lit de particules de bois

La particule de bois représente la « brique » élémentaire du lit (Figure 60). Ainsi chaque particule apporte sa contribution à l'évolution spatiale des paramètres de l'air et peut présenter une évolution temporelle de ses paramètres (température et teneur en eau) propre. Ceci permet de tenir compte de la variabilité des particules, et en particulier de leur teneur en eau initiale. Ainsi, au sein d'un CV, les flux globaux de chaleur et de masse entre le lit et l'air correspondent à la somme des flux locaux à la surface de chaque particule (Equation 2.15 et 2.16):

$$q_{m,v,lit\rightarrow air} = \sum_{i=1}^{M}\left(j_{v,bois,i} \times Surf_{part,i} \right) \tag{3.29}$$

$$q_{c\ lit\rightarrow air} = \sum_{i=1}^{M}\left(j_{c,bois,i} \times Surf_{part,i} \right) \tag{3.30}$$

Les flux $j_{c,\,bois,\,i}$ et $j_{v,\,bois,\,i}$ sont estimés au moyen du modèle de Van Meel étendu décrit dans le Chapitre 2 :

$$j_{v,bois,i} = -\dot{\overline{X}}_i \times m_{0,i} \tag{3.31}$$

$$j_{c,bois,i} = -m_{0,i} \times \left(c_{P,b} + \overline{X}_i \times c_{P,l} \right) \times \dot{\overline{T}}_i + m_{0,i} \times L_v\left(\overline{T}_i\right) \times \dot{\overline{X}}_i \tag{3.32}$$

Ainsi, le modèle global est associé à plusieurs milliers de modèles locaux (un par particule) pour accéder aux flux locaux de chaleur et de masse. Ceci confirme l'importance d'avoir un temps de calcul le plus faible possible à l'échelle *particule*.

I-3-2 : Flux de chaleur et de masse entre l'air et la paroi du séchoir

Dans cette partie, à l'intérieur du séchoir, nous ne considérons que les échanges entre l'air et la paroi et négligeons de ce fait les échanges éventuels entre cette paroi et les particules avec lesquelles elle pourrait être en contact.

L'intensité de ces échanges doit être quantifiée afin de prédire l'effet de la paroi sur les paramètres de l'air (déperditions thermiques et condensation) et vice versa (évolution de la température de paroi).

I-3-2-1 : Description de l'enveloppe du séchoir et des hypothèses associées

Pour modéliser l'enveloppe du séchoir, nous utilisons la liste des hypothèses simplificatrices suivantes :

- les propriétés de la paroi sont identiques pour l'intégralité de la périphérie du séchoir et les conditions climatiques environnantes (extérieures au séchoir) sont homogènes tout autour de l'installation : ceci vaut également pour la base d'un séchoir tunnel ;
- les portes sont des surfaces adiabatiques et imperméables (les flux de chaleur au niveau des portes sont nuls et aucune condensation ne se produit à ce niveau) : seule la paroi périphérique participe aux échanges avec l'air intérieur et extérieur.

- la paroi est imperméable aux fluides : les échanges de gaz entre le séchoir et l'extérieur ne se produisent qu'au niveau des points d'injection et d'échappement,
- la surface de paroi prise en compte pour les calculs est la surface intérieure,
- la paroi est une monocouche constituée d'un matériau plus ou moins isolant.

Pour traiter les cas des parois multicouches symétriques, nous calculons les propriétés équivalentes sur l'ensemble de l'épaisseur :

$$e_w = \sum_i e_i \tag{3.33}$$

$$\rho_w \times c_{P,w} = \frac{\sum_i e_i \times \rho_i \times c_{P,w}}{e_w} \tag{3.34}$$

$$\lambda_w = \frac{e_w}{\sum_i e_i / \lambda_i} \tag{3.35}$$

I-3-2-2 : Comportement de la paroi lors du séchage

Lors du séchage, des déperditions thermiques apparaissent à travers les parois du séchoir. En effet, compte tenu (*i*) du gradient thermique entre l'intérieur et l'extérieur du séchoir et (*ii*) de la conductivité thermique de la paroi, un flux de chaleur apparait par conduction du chaud vers le froid.

En outre, si la face interne de la paroi présente un point dont la température est inférieure à la température de rosée de l'air, de la vapeur d'eau se condense à ce niveau. Dans ce cas, nous considérons que l'eau liquide est évacuée à la température de condensation : l'évaporation des condensats n'est pas envisagée.

Pour estimer l'intensité de ces échanges massiques et thermiques au niveau de la paroi, il est primordial de connaître la température en chacun de ces points. À l'intérieur du séchoir, les variations temporelles des conditions climatiques le long du séchoir sont très lentes et très limitées. Elles ne sont provoquées que par l'hétérogénéité des cinétiques de séchage des particules en raison de leur variabilité naturelle. Notons que cette hétérogénéité est atténuée par le nombre de particules dans le séchoir. À l'extérieur, nous supposons que les variations de température (dues aux cycles jour/nuit) sont lentes par rapport au temps caractéristique de diffusion de la chaleur au sein de la paroi. Ainsi le flux de chaleur à travers la paroi peut être considéré proche du régime permanent. De ce fait, nous admettons que le gradient de température est en régime établi dans l'épaisseur de la paroi.

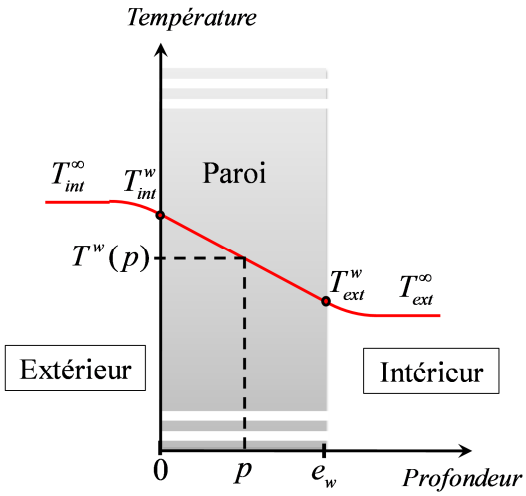


Figure 65 : Profil linéaire de la température à travers une paroi homogène

Dans le cas d'une paroi homogène ou assimilée homogène (Figure 65), les températures des faces interne et externe suffisent à décrire le profil de température à travers la paroi :

$$T^{w}(p) = \left(1 - \frac{p}{e_w}\right) \times T_{int}^{w} + \frac{p}{e_w} \times T_{ext}^{w} \tag{3.36}$$

Pour un CV donné, ces températures T_{int}^{w} et T_{ext}^{w} sont, par hypothèse, homogènes pour toute la portion de paroi que contient ce CV. Ces fonctions ne dépendent donc que de deux variables : le temps et la position du CV le long du séchoir (*x* ou *z*).

I-3-2-3 : Equations de conservation au niveau de la paroi

L'équation de conservation de la masse indique que l'intégration des flux de vapeur au niveau de la face interne de la paroi est égale à la masse de vapeur condensée.

$$j_{v,paroi} \times Surf_w = -\dot{m}_{v,air \to w} \tag{3.37}$$

Le bilan d'énergie prend en compte la chaleur latente de liquéfaction de l'eau condensée au niveau de la paroi, les déperditions thermiques ainsi que l'accumulation de chaleur au sein de la paroi :

$$j_{c,paroi} \times Surf_w = \dot{m}_{v,air \to w} \times L_v\left(T_{int}^{w}\right) + h_{c,ext} \times \left(T_{ext}^{\infty} - T_{ext}^{w}\right) \times Surf_w - m_w \times c_{P,w} \times \frac{\partial \overline{T^w}}{\partial t} \tag{3.38}$$

La densité de flux de chaleur au niveau de la face interne de la paroi est exprimée grâce au coefficient de transfert externe de chaleur :

$$j_{c,paroi} = -h_{c,int} \times \left(T_{int}^{\infty} - T_{int}^{w}\right) \tag{3.39}$$

Afin d'estimer l'intensité de ces flux, il est nécessaire de connaître préalablement l'état du système *paroi* caractérisé par le couple ($\dot{m}_{v,air \to w}$; T_{int}^{w}). Dans un premier temps, nous nous plaçons dans le cas simple du régime permanent de la paroi du séchoir.

I-3-2-3-a : En régime permanent

En régime permanent (*rp*), les températures intérieure et extérieure de l'air et de la paroi sont constantes. Il n'y pas d'accumulation de chaleur dans la paroi et le débit de vapeur condensée est constant.

– *Conservation de la masse (sur la face interne de la paroi)*

Nous adaptons l'équation de conservation de la masse du modèle local (Equation 2.15) au cas de la paroi. Cette paroi n'étant pas un matériau poreux hygroscopique, la valeur de l'activité de surface est toujours égale à 1. En outre, les condensats étant évacués au fur et à mesure, le débit de vapeur de l'air vers la face interne de la paroi est positif ou nul.

L'adaptation de l'Equation 2.15 est donc la suivante :

$$\dot{m}_{v,air\to w,rp} = MAX\left\{0;-h_{m,int}\times C\times M_v\times Surf_w\times\ln\left(\frac{P_{atm}-P_{v,int}^{\infty}}{P_{atm}-P_{vs}\left(T_{int,rp}^{w}\right)}\right)\right\} \tag{3.40}$$

– *Conservation de la chaleur*

Au niveau de la face externe de la paroi, le flux de chaleur échangé avec l'air est égal au flux traversant la paroi :

$$h_{c,ext}\times\left(T_{ext}^{\infty}-T_{ext,rp}^{w}\right)\times Surf_w=\frac{T_{ext,rp}^{w}-T_{int,rp}^{w}}{e_w/\lambda_w}\times Surf_w \tag{3.41}$$

Au niveau de la face interne, nous devons considérer l'énergie de vaporisation de l'eau éventuellement condensée :

$$h_{c,int}\times\left(T_{int}^{\infty}-T_{int,rp}^{w}\right)\times Surf_w=\frac{T_{int,rp}^{w}-T_{ext,rp}^{w}}{e_w/\lambda_w}\times Surf_w-\dot{m}_{v,air\to w,rp}\times L_v\left(T_{int,rp}^{w}\right) \tag{3.42}$$

– *Résolution du système d'équations (sur les deux faces de la paroi)*

Pour résoudre le système formé par les Equations 3.40, 3.41 et 3.42, nous procédons par étude de cas. Dans un premier temps, nous supposons qu'il n'y a pas de condensation : $P_{vs}\left(T_{int,rp}^{w}\right)>P_{v,int}^{\infty}$. $\dot{m}_{v,air\to w,rp}$ est nul et les Equations 3.41 et 3.42 deviennent donc linéaires. Le couple de solutions est le suivant :

$$T_{int,rp}^{w}=\frac{T_{int}^{\infty}\times h_{c,int}\times\left(h_{c,ext}\times e_w/\lambda_w+1\right)+T_{ext}^{\infty}\times h_{c,ext}}{h_{c,int}\times\left(h_{c,ext}\times e_w/\lambda_w+1\right)+h_{c,ext}} \tag{3.43}$$

$$T_{ext,rp}^{w} = \frac{T_{ext}^{\infty} \times h_{c,ext} \times \left(h_{c,int} \times {e_w}/{\lambda_w} + 1 \right) + T_{int}^{\infty} \times h_{c,int}}{h_{c,ext} \times \left(h_{c,int} \times {e_w}/{\lambda_w} + 1 \right) + h_{c,int}} \tag{3.44}$$

Nous vérifions alors que $P_{vs}\left(T_{int,éq}^{w}\right)$ est bien inférieur à $P_{v,int}^{\infty}$.

Dans le cas contraire, l'Equation 3.40 devient :

$$\dot{m}_{v,air \to w,rp} = -h_{m,int} \times C \times M_v \times Surf_w \times \ln\left(\frac{P_{atm} - P_{v,int}^{\infty}}{P_{atm} - P_{vs}\left(T_{int,rp}^{w}\right)} \right) \tag{3.45}$$

Dès lors, le système contient trois équations (3.41, 3.42 et 3.45) non linéaires et fortement couplées. Elles sont donc résolues de façon itérative selon la méthode de Newton-Raphson.

Afin de prédire l'intensité des transferts au niveau de la paroi en toute circonstance, nous devons maintenant étendre notre réflexion au cas plus complexe du régime quasi permanent.

I-3-2-3-b : En régime quasi permanent

Le système ne peut pas toujours être considéré en régime permanent. La perturbation peut résulter de la mise en régime du séchoir (démarrage à froid), de variations de faible amplitude des paramètres de l'air de part et d'autre de la paroi ou de la variabilité des particules. Nous supposons ici que les modifications du gradient de température dans l'épaisseur de la paroi sont quasi-statistiques et donc que le profil reste établi. La prise en compte de ce régime quasi-permanent permet de « lisser » les variations d'intensité des transferts résultant de l'introduction soudaine de particules plus ou moins humides dans le CV en raison du déplacement saltatoire du lit et de la variabilité simulée du bois.

– *Conservation de la masse*

À nouveau, la condensation se produit lorsque la température de la face interne de la paroi est inférieure au point de rosée :

$$\dot{m}_{v,air \to w} = MAX\left\{ 0; -h_{m,int} \times C \times M_v \times Surf_w \times \ln\left(\frac{P_{atm} - P_{v,int}^{\infty}}{P_{atm} - P_{vs}\left(T_{int}^{w}\right)} \right) \right\} \tag{3.46}$$

– *Conservation de la chaleur*

D'après les Equations 3.38 et 3.39, une accumulation de chaleur dans l'épaisseur de la paroi peut apparaitre en régime quasi permanent, résultant de la différence de flux entre la face interne et externe :

$$\begin{aligned} h_{c,int} \times \left(T_{\mathrm{int}}^{\infty} - T_{\mathrm{int}}^{w}\right) \times Surf_w + \dot{m}_{v,air \to w} \times L_v\left(T_{int}^{w}\right) + h_{c,ext} \times \left(T_{ext}^{\infty} - T_{ext}^{w}\right) \times Surf_w \\ = m_w \times c_{P,w} \times \frac{\partial \overline{T^w}}{\partial t} \end{aligned} \tag{3.47}$$

m_w correspond à la masse de la portion de paroi incluse dans le CV :

$$m_w = \rho_w \times Surf_w \times e_w \tag{3.48}$$

Compte tenu de la linéarité du profil de température dans l'épaisseur de la paroi, la température moyenne de cette paroi est égale à la moyenne des températures de surface de la paroi. Cette équation reste valable d'un le cas d'une paroi composite symétrique :

$$\overline{T^w} = \frac{T_{int}^w + T_{ext}^w}{2} \tag{3.49}$$

L'Equation 3.47 devient :

$$h_{c,int} \times \left(T_{\text{int}}^{\infty} - T_{\text{int}}^{w}\right) \times Surf_w + \dot{m}_{v,air \to w} \times L_v\left(T_{int}^w\right) + h_{c,ext} \times \left(T_{ext}^{\infty} - T_{ext}^{w}\right) \times Surf_w = \rho_w \times Surf_w \times e_w \times c_{P,w} \times \frac{\dot{T}_{int}^w + \dot{T}_{ext}^w}{2} \tag{3.50}$$

– *Résolution du système d'équations*

Le système contient pour l'heure deux équations (3.46 et 3.50) à trois inconnues : $\dot{m}_{v,air \to w}$, T_{int}^w, et T_{ext}^w. Il existe donc une infinité de solutions. Pour réduire le nombre des solutions possibles à un seul triplet, nous introduisons une nouvelle équation. Elle relie les vitesses d'évolution des températures interne et externe :

$$\frac{\dot{T}_{int}^w}{T_{int,rp}^w - T_{int}^w} = \frac{\dot{T}_{ext}^w}{T_{ext,rp}^w - T_{ext}^w} \tag{3.51}$$

À travers cette équation, nous supposons que la vitesse d'évolution de la température est corrélée positivement à l'écart au régime permanent. Ce régime permanent est décrit précédemment, dans le paragraphe I-3-2-3-a de ce même chapitre.

Les trois équations du système sont discrétisées dans le temps en utilisant la formulation des séries de Taylor, tronquées au premier ordre, via un schéma totalement explicite (Equations 3.52, 3.53 et 3.54). L'état du système et les flux sont supposés constants entre les instants *t* (inclus) et *t*+Δ*t* (exclus).

$$\dot{m}_{v,air \to w} = MAX\left\{0; -h_{m,int} \times C \times M_v \times Surf_w \times \ln\left(\frac{P_{atm} - P_{v,int}^{\infty}(t)}{P_{atm} - P_{vs}\left(T_{int}^w(t)\right)}\right)\right\} \tag{3.52}$$

$$\rho_w \times Surf_w \times e_w \times c_{P,w} \times \frac{T_{int}^w(t+\Delta t) - T_{int}^w(t) + T_{ext}^w(t+\Delta t) - T_{ext}^w(t)}{2 \times \Delta t} = h_{c,int} \times \left(T_{\text{int}}^{\infty}(t) - T_{\text{int}}^{w}(t)\right) \times Surf_w + \dot{m}_{v,air \to w} \times L_v\left(T_{int}^w(t)\right) + h_{c,ext} \times \left(T_{ext}^{\infty}(t) - T_{ext}^{w}(t)\right) \times Surf_w \tag{3.53}$$

$$\frac{T_{int}^w(t+\Delta t) - T_{int}^w(t)}{\Delta t \times \left(T_{int,rp}^w(t) - T_{int}^w(t)\right)} = \frac{T_{ext}^w(t+\Delta t) - T_{ext}^w(t)}{\Delta t \times \left(T_{ext,rp}^w(t) - T_{ext}^w(t)\right)} \tag{3.54}$$

La valeur du débit de vapeur condensée peut être directement calculée à partir de l'Equation 3.52. En outre, les deux autres équations, linéaires et faiblement couplées, sont résolues par la méthode de Gauss-Jordan :

$$T_{ini}^{w}\left(t+\Delta t\right) = T_{int}^{w}\left(t\right)+\frac{2\times\Delta t\times\left[\left(h_{c,int}\times\left(T_{int}^{\infty}-T_{int}^{w}\left(t\right)\right)+h_{c,ext}\times\left(T_{ext}^{\infty}-T_{ext}^{w}\left(t\right)\right)\right)\times Surf_{w}+\dot{m}_{v,air\to w}\times L_{v}\left(T_{int}^{w}\left(t\right)\right)\right]}{\rho_{w}\times Surf_{w}\times e_{w}\times c_{P,w}\times\left(\frac{T_{ext,rp}^{w}-T_{ext}^{w}\left(t\right)}{T_{int,rp}^{w}-T_{int}^{w}\left(t\right)}+1\right)} \tag{3.55}$$

$$T_{ext}^{w}\left(t+\Delta t\right) = T_{ext}^{w}\left(t\right)+\frac{2\times\Delta t\times\left[\left(h_{c,int}\times\left(T_{int}^{\infty}-T_{int}^{w}\left(t\right)\right)+h_{c,ext}\times\left(T_{ext}^{\infty}-T_{ext}^{w}\left(t\right)\right)\right)\times Surf_{w}+\dot{m}_{v,air\to w}\times L_{v}\left(T_{int}^{w}\left(t\right)\right)\right]}{\rho_{w}\times Surf_{w}\times e_{w}\times c_{P,w}\times\left(\frac{T_{int,rp}^{w}-T_{int}^{w}\left(t\right)}{T_{ext,rp}^{w}-T_{ext}^{w}\left(t\right)}+1\right)} \tag{3.56}$$

En connaissant l'état initial du système et en résolvant les équations de conservation, nous pouvons donc prédire les valeurs des paramètres inconnus au pas de temps suivant, ceci étant réitéré jusqu'à l'état final. Ainsi nous accédons à l'intensité des flux de chaleur et de masse à la surface de la paroi selon son inertie et sa résistance thermique.

I-3-3 : Prédiction de l'évolution spatiale des paramètres de l'écoulement d'air

Lors de la traversée du CV, l'air subit des transformations au contact du bois et de la paroi. À partir des flux de chaleur et de masse à la surface des particules et au niveau de la paroi du séchoir, nous disposons de tous les éléments nécessaires à l'évaluation des conditions d'air en sortie du CV.

I-3-3-1 : Bilan sur la masse d'air au sein d'un volume de contrôle

D'une part (d'après l'Equation 3.16), l'air se charge en humidité lorsque les particules sèchent et inversement en cas d'une condensation de vapeur au niveau de points froids que peuvent représenter les particules en entrée ou la paroi :

$$\frac{\partial q_{m,v}}{\partial x}=\frac{\sum_{i=1}^{M}\left(j_{v,bois}\times Surf_{part}\right)_{i}+j_{v\,paroi}\times Surf_{w}}{\Delta x} \tag{3.57}$$

D'autre part (d'après l'Equation 3.17), l'air se refroidit en chauffant le bois et par déperdition au niveau de la paroi :

$$\left(q_{m,v}\times c_{P,v}+q_{m,a}\times c_{P,a}\right)\times\frac{\partial T_{int}^{\infty}}{\partial x}=\frac{\sum_{i=1}^{M}\left(\left(j_{c,bois}-j_{v,bois}\times c_{P,v}\times\left(T_{int}^{\infty}-\overline{T}\right)\right)\times Surf_{part}\right)_{i}}{\Delta x}+\frac{\left(j_{c,\,paroi}-j_{v\,paroi}\times c_{P,v}\times\left(T_{int}^{\infty}-T_{int}^{w}\right)\right)\times Surf_{w}}{\Delta x} \tag{3.58}$$

I-3-3-2 : Résolution des équations de conservation sur la masse d'air

Selon la méthode des volumes finis, les conditions d'air sont considérées homogènes au sein du CV (T_{int}^{∞} et $P_{v,int}^{\infty}$). En outre, pendant un pas de temps Δt réduit, ces conditions climatiques sont supposées constantes et égales aux conditions d'air en entrée de ce CV (schéma amont). L'incrément de temps Δt est une subdivision du temps de séjour du bois particule dans un CV (Equation 3.28) :

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{séjour}}{K_{résol}} \tag{3.59}$$

avec $K_{résol} \geq 1$.

Les deux équations du système sont discrétisées dans l'espace en utilisant la formulation des séries de Taylor et tronquées au premier ordre, via un schéma totalement explicite (Equations 3.57 et 3.58). Pour le $k^{ème}$ CV d'un séchoir tunnel (Figure 60), l'état du système et les flux sont supposés constants entre les positions $k\times\Delta x$ (inclus) et $(k+1)\times\Delta x$ (exclus) en co-courant et entre les positions $k\times\Delta x$ (inclus) et $(k-1)\times\Delta x$ (exclus) en contre-courant. Dans la suite, de ce paragraphe I, nous prenons pour exemple un séchoir tunnel en co-courant ne comptant qu'un seul module c'est-à-dire un seul point d'injection et un seul point d'échappement des gaz :

$$\frac{q_{m,v}\left((k+1)\times\Delta x\right)-q_{m,v}\left(k\times\Delta x\right)}{\Delta x} = \frac{\sum_{i=1}^{M}\left(j_{v,bois}\times Surf_{part}\right)_i + j_{v\,paroi}\times Surf_w}{\Delta x} \tag{3.60}$$

$$\begin{aligned}\left(q_{m,v}\left(k\times\Delta x\right)\times c_{P,v}+q_{m,a}\times c_{P,a}\right)\times\frac{T_{int}^{\infty}\left((k+1)\times\Delta x\right)-T_{int}^{\infty}\left(k\times\Delta x\right)}{\Delta x}&\\ = \frac{\sum_{i=1}^{M}\left(\left(j_{c,bois}-j_{v,bois}\times c_{P,v}\times\left(T_{int}^{\infty}\left(k\times\Delta x\right)-\overline{T}\right)\right)\times Surf_{part}\right)_i}{\Delta x}&\\ + \frac{\left(j_{c,paroi}-j_{v\,paroi}\times c_{P,v}\times\left(T_{int}^{\infty}\left(k\times\Delta x\right)-T_{int}^{w}\right)\right)\times Surf_w}{\Delta x}&\end{aligned} \tag{3.61}$$

Ces équations discrétisées, linéaires et faiblement couplées, sont résolues par la méthode de Gauss-Jordan afin de déduire la valeur des paramètres de l'air à la sortie du CV :

$$q_{m,v}\left((k+1)\times\Delta x\right) = q_{m,v}\left(k\times\Delta x\right) + \sum_{i=1}^{M}\left(j_{v,bois}\times Surf_{part}\right)_i + j_{v\,paroi}\times Surf_w \tag{3.62}$$

$$\begin{aligned}T_{int}^{\infty}\left((k+1)\times\Delta x\right) = T_{int}^{\infty}\left(k\times\Delta x\right) + \frac{\sum_{i=1}^{M}\left(\left(j_{c,bois}-j_{v,bois}\times c_{P,v}\times\left(T_{int}^{\infty}\left(k\times\Delta x\right)-\overline{T}\right)\right)\times Surf_{part}\right)_i}{q_{m,v}\left(k\times\Delta x\right)\times c_{P,v}+q_{m,a}\times c_{P,a}}&\\ + \frac{\left(j_{c,paroi}-j_{v\,paroi}\times c_{P,v}\times\left(T_{int}^{\infty}\left(k\times\Delta x\right)-T_{int}^{w}\right)\right)\times Surf_w}{q_{m,v}\left(k\times\Delta x\right)\times c_{P,v}+q_{m,a}\times c_{P,a}}&\end{aligned} \tag{3.63}$$

En considérant que, dans le séchoir, la pression est égale à la pression atmosphérique, nous pouvons déduire la pression partielle de vapeur à partir du débit massique de vapeur grâce à la loi des gaz parfaits :

$$P_v = P_{atm} \times \frac{q_{m,v} \times M_a}{q_{m,v} \times M_a + q_{m,a} \times M_v} \tag{3.64}$$

En connaissant les caractéristiques de l'air injecté dans le CV, en calculant les flux locaux de chaleur et de masse à la surface de chaque particule de ce CV (en résolvant pour chacune d'entre elles les Equations 3.31 et 3.32) et en réitérant ce calcul d'un CV au suivant dans le sens de circulation de l'air, nous accédons à l'évolution spatiale des conditions climatiques.

I-4 : Programmation du modèle global et exécution du programme

Les équations décrivant le comportement de la paroi lors du séchage (Equations 3.52, 3.55 et 3.56), les équations liées au régime permanent de la paroi (Equations 3.41, 3.42, 3.43, 3.44 et 3.45), ainsi que les équations de conservation sur la masse d'air (Equations 3.62 et 3.63) sont codées en langage *Fortran 90* dans le programme de simulation *Wood_**online**_drying* compilé au moyen du logiciel *Compaq Visual Fortran v6.6*.

Afin d'optimiser le temps de calcul, Δt est ajusté par l'intermédiaire de $K_{résol}$ selon la rapidité de convergence de l'algorithme de résolution des équations de conservations de chaleur et de masse (Equation 3.59).

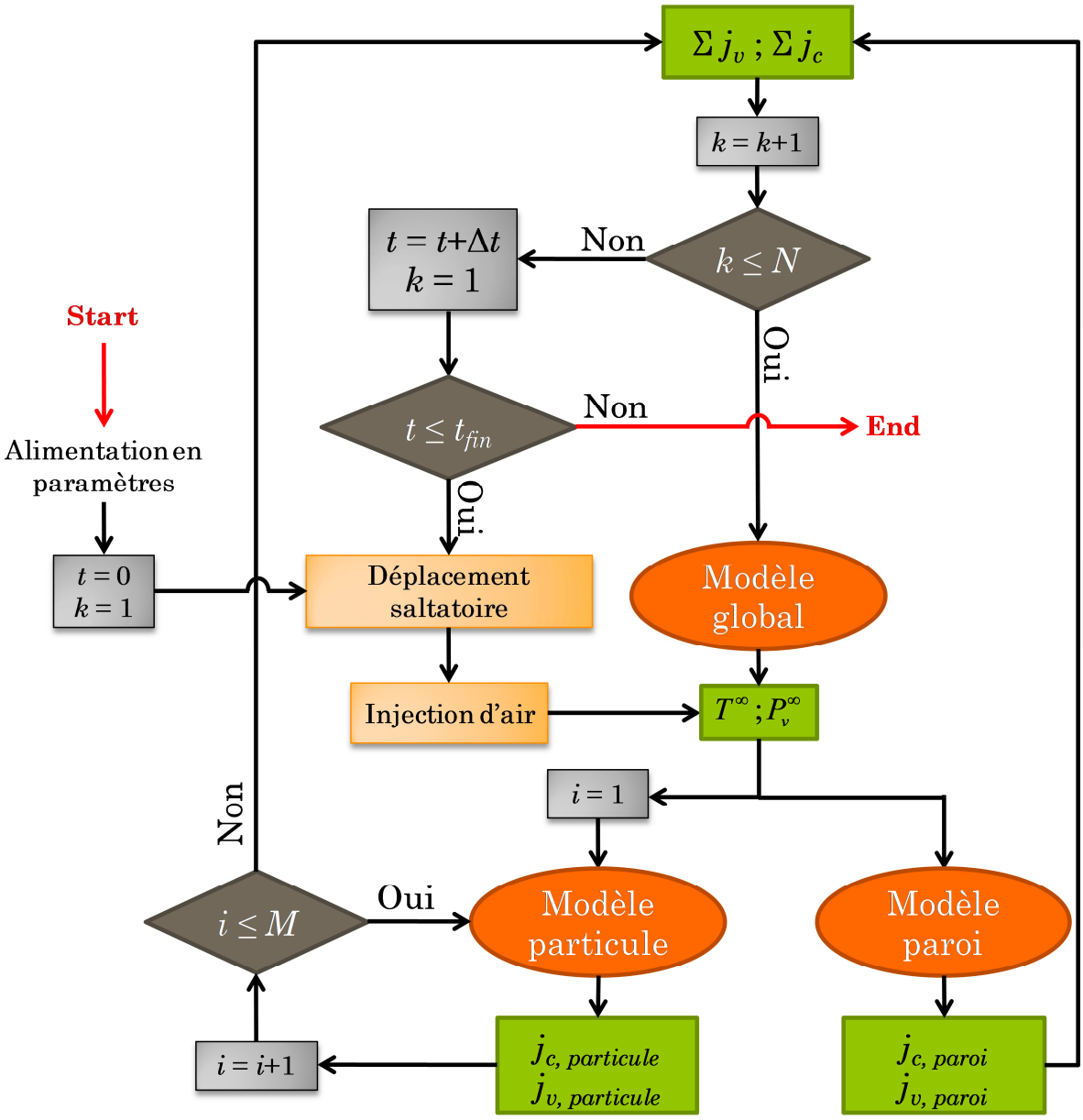


Figure 66 : Diagramme de résolution des équations de *Wood_online_drying*

L'enchainement des équations codées dans *Wood_online_drying* est décrit par la Figure 66.

Remarque : méta-module par méta-module, les CV sont traités successivement dans le sens de l'écoulement d'air ; pour la description de l'enchainement de résolution des équations, nous considérons l'exemple d'un séchoir à configuration aéraulique simple (un seul point d'injection et un seul point d'échappement) en co-courant.

Après l'initiation des paramètres du modèle, un premier déplacement saltatoire du lit se produit. Seul le premier des N CV (k = 1) contient du bois, le séchoir étant initialement vide. L'air est injecté au niveau de ce premier CV. Les paramètres de l'air (T^{∞} et P_v^{∞}) au sein de ce premier CV sont connus puisqu'homogènes et égaux à ceux de l'air injecté. Grâce au modèle local, connaissant les paramètres de l'air, nous pouvons calculer l'évolution temporelle des paramètres du bois ($\overline{T}$ et $\overline{X}$) au cours du pas de temps Δt pour chacune des particules présentes dans le CV (numérotées de i = 1 à M). Nous en déduisons les flux locaux de chaleur et de masse à la surface de chacune de ces particules. Les flux

locaux de chaleur et de masse au niveau de la portion de paroi incluse dans le CV sont également calculés. L'ensemble de ces flux locaux de chaleur et de masse (calculés à la surface des particules et de la paroi) sont sommés. À partir de cette somms de flux, le modèle global nous permet de déterminer les paramètres de l'air (T^{∞} et P_v^{∞}) en entrée du CV suivant. Lorsque l'ensemble des N CV du séchoir sont traités ainsi, nous appliquons un nouveau déplacement saltatoire au lit de particules. Nous nous replaçons au niveau de la première des M particules (i = 1) du premier des N CV (k = 1) et nous réitérons l'intégralité des opérations décrites précédemment, et ce jusqu'à la fin de la simulation ($t \geq t_{fin}$).

Le modèle local permet donc d'accéder à l'évolution temporelle des paramètres des particules de bois ($\overline{T}$ et $\overline{X}$), considérées immobiles pendant le pas de temps Δt, tandis que le modèle global permet d'accéder à l'évolution spatiale des paramètres de l'air (T^{∞} et P_v^{∞}).

II : Etude expérimentale du séchage d'un lit de particules

Afin de valider le modèle global précédemment décrit il est indispensable de confronter les résultats de la simulation à ceux d'expérimentations menées sur des lits de bois.

II-1 : Matériel végétal

II-1-1 : Approvisionnement en bois

Des deux essences étudiées lors de cette thèse, le hêtre présente l'avantage d'une disponibilité locale par rapport à l'eucalyptus. Ceci permet de réduire les délais et les coûts d'approvisionnement. Ainsi nous nous sommes procuré 1 m^3 de plaquettes forestières auprès de la société *FBV Energie Bois*.

II-1-2 : Production des plaquettes forestières

Les arbres issus d'une hêtraie proche de Gerbamont (88120 – France) sont abattus au cours du mois de novembre 2010. Puis, ils sont broyés dans les jours qui suivent au moyen d'une déchiqueteuse à tambour *Kesla C4560 LF* attelée à un tracteur de 300 ch *Deutz-Fahr Agrotron X720*.



Figure 67 : Chantier de production de plaquettes forestières par *FBV Energie Bois*

II-1-3 : Caractéristiques des plaquettes

Pour notre étude, les plaquettes forestières sont définies selon trois paramètres : l'infra-densité du bois, le calibre des plaquettes et la porosité macroscopique du lit.

Les plaquettes obtenues au moyen de cette déchiqueteuse sont de petit calibre : leur plus grande dimension est généralement inférieure à 25 mm.

La valeur mesurée de l'infra-densité du bois de ce lot de plaquettes est de 523 $kg.m^{-3}$.

Enfin, la valeur retenue pour la macroporosité du lit est de 0,60. Cette valeur fut déterminée expérimentalement par la mesure du volume interstitiel en plaçant des plaquettes forestières saturées en eau dans un récipient de grande taille (pour limiter les effets de bord). La macroporosité est le rapport entre (*i*) la masse de l'eau nécessaire au comblement des interstices entre les plaquettes et (*ii*) la masse de l'eau occupant le même volume que l'échantillon de plaquettes.

II-2 : Description du dispositif expérimental

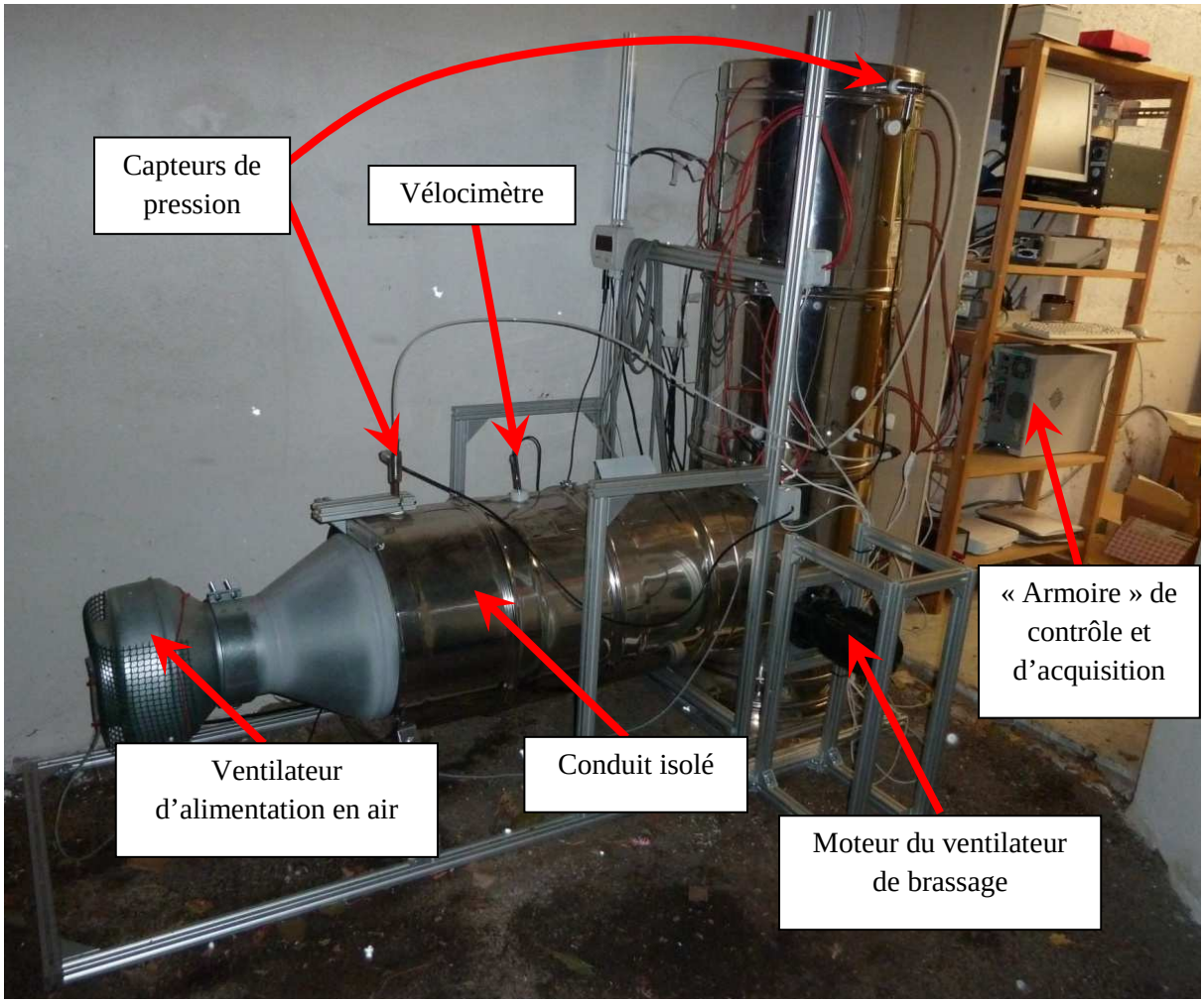


Figure 68 : Dispositif d'étude expérimentale du séchage d'un lit fixe de particules de bois

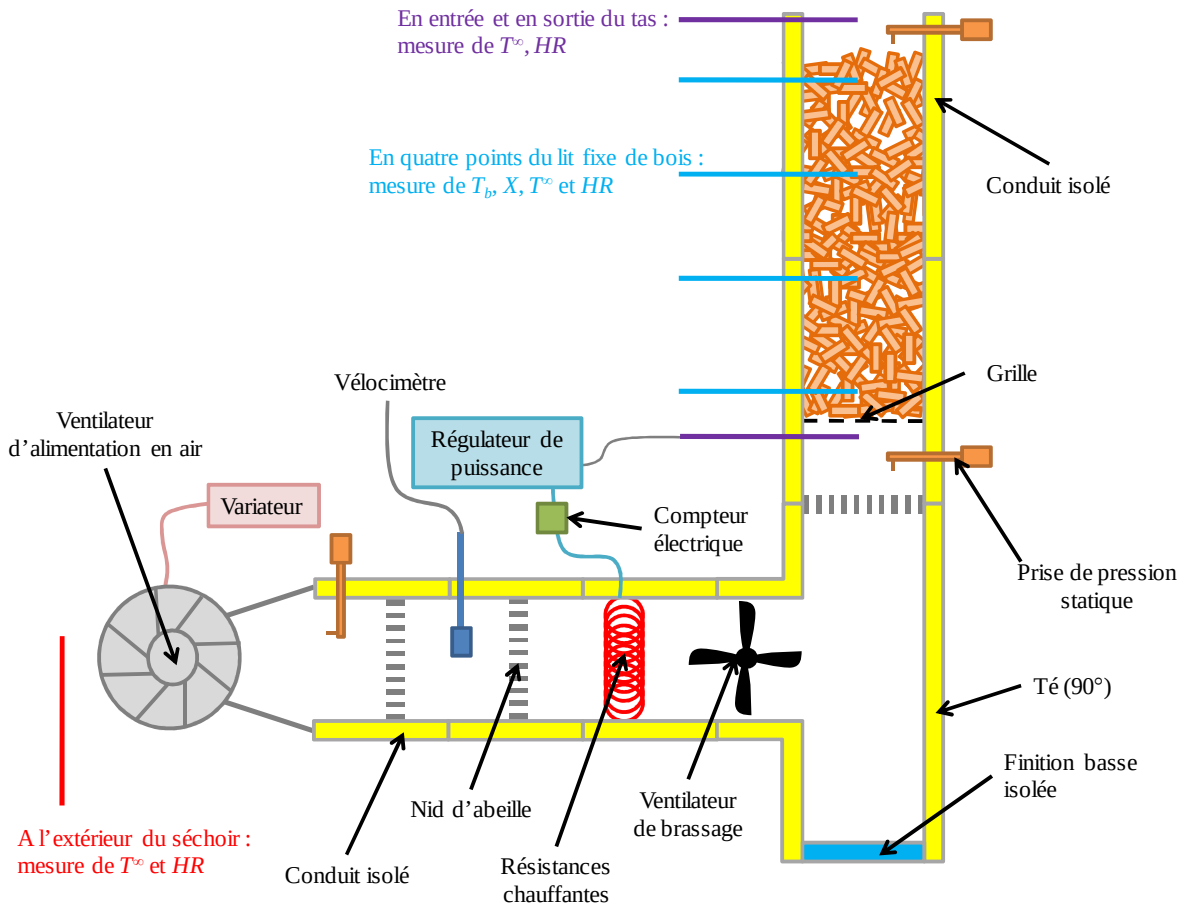


Figure 69 : Schéma de principe du dispositif d'étude du séchage en lit fixe

Les données expérimentales présentées dans ce chapitre sont recueillies au moyen d'un dispositif expérimental original développé au cours de ce doctorat (Figures 68 et 69). Il permet de suivre l'évolution spatiale et temporelle des paramètres du bois et de l'air au sein du lit fixe de plaquettes forestières. Au cours du séchage, ce lit fixe est traversé de bas en haut par un flux d'air forcé et chauffé.

II-2-1 : Réacteur

II-2-1-1 : Enceinte de séchage

L'enceinte de séchage est constituée de l'assemblage de conduits isolés *Isotip série S* de 400 mm de diamètre intérieur. La paroi de ces conduits est constituée d'une couche épaisse de 40 mm de laine minérale à 100 kg.m^{-3} prise en sandwich entre deux tôles d'inox de 5/10e de mm d'épaisseur. La donnée *constructeur* de la résistance thermique de l'ensemble est égale à 0,87 K.W^{-1}. D'après l'Equation 3.35, nous obtenons une valeur de 1,03 K.W^{-1} pour la résistance thermique de cette même paroi. Cependant, ce calcul ne tient pas compte, par exemple, d'éventuels ponts thermiques à la jonction des conduits. Nous conservons donc la donnée *constructeur* pour les différentes simulations. En outre, en l'absence de donnée constructeur, la capacité calorifique volumique est calculée à partir de l'Equation 3.34. Nous obtenons une valeur de 187,2 kJ.m^{-3}.K^{-1}.

La partie horizontale comprend trois éléments de 33 cm de long et la partie verticale est composée de deux éléments de 50 cm de haut. Ces deux segments sont reliés par un té présentant les mêmes

caractéristiques de paroi. La multiplication de ces éléments peut certes être à l'origine de ponts thermiques. Néanmoins elle facilite l'accès aux accessoires de préconditionnement de l'air (dans la partie horizontale) et aux instruments de mesure à disposer au sein du lit fixe de bois (dans la partie verticale).

II-2-1-2 : Injection de l'air

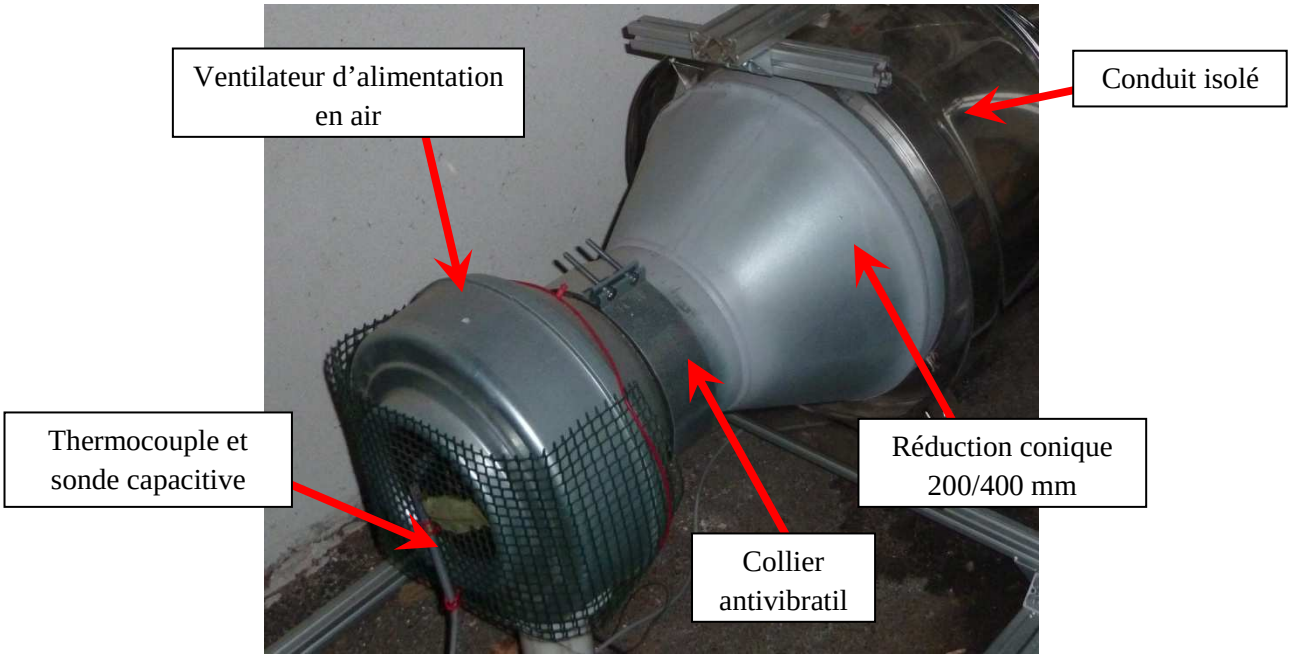


Figure 70 : Alimentation en air extérieur du réacteur

L'air est injecté dans le réacteur grâce à un ventilateur monophasé de gaine *Aldes VC200* pouvant débiter jusqu'à 1000 $m^3.h^{-1}$. Sa vitesse de rotation est régulée par l'opérateur au moyen d'un variateur de tension. Le dimensionnement du ventilateur est réalisé en choisissant la vitesse d'air désirée dans le bois et en estimant les pertes de charge de l'écoulement d'air à travers le lit (Ergun, 1952 ; Annexe VI).

Le ventilateur est connecté au premier conduit isolé horizontal au moyen d'une réduction de diamètre 200/400 mm et d'un collier antivibratil.

La température et l'humidité relative de l'air injecté sont mesurées respectivement au moyen d'un thermocouple (*ThermoEst*, type J, 1 mm de diamètre) et d'une sonde capacitive (*Honeywell HIH-4000*). Cette dernière code l'information de *HR* de 0 à 100 % en une tension proportionnelle de 0,8 à 4 V. Pour ce faire elle est alimentée par en courant continu 5 V.

L'écoulement d'air injecté traverse une succession de trois nids d'abeille en aluminium *Euro-Composites*. Les alvéoles sont longs de 20 mm et larges de 6 mm. Ainsi, ces nids d'abeille permettent, d'une part, de « casser » la rotation de l'air provoquée par le ventilateur d'alimentation et, d'autre part, créer une perte de charge pour uniformiser le débit d'air sur la section de la conduite.

II-2-1-3 : Chauffage de l'air et régulation de la température

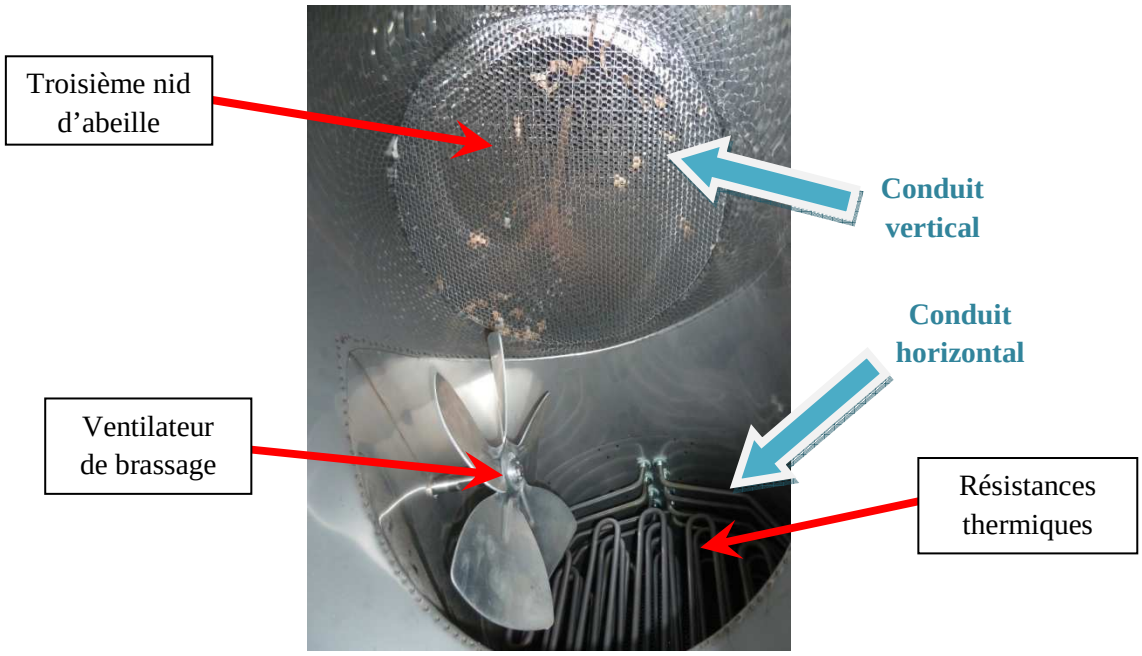


Figure 71 : Système de chauffage et de brassage de l'air

Nous souhaitons qu'à plein régime, de l'air chaud soit injecté à la base du lit fixe à 80 °C et qu'il le traverse avec une vitesse de 1 $m.s^{-1}$. En considérant que l'air extérieur est à 10 °C, la puissance de chauffe nécessaire est de :

$$\mathscr{P}_{e,min} = \rho_g \times \bar{v}_{g,tas} \times \Phi \times A_{conduite} \times c_P \times \left(T_{int}^{\infty} - T_{ext}^{\infty}\right) = 5450\,\mathrm{W}$$

Au niveau du troisième conduit horizontal, l'air entre donc en contact avec une série de quatre éléments chauffants *Ivaldi* d'une puissance totale de 6 kW (Figure 71). Pour les alimenter en électricité, une ligne de courant monophasée de 32 A est dédiée.

Compte tenu de la présence de capteurs au sein du lit fixe, la température maximale d'utilisation du dispositif est de 85 °C. La température du flux d'air est mesurée au moyen de deux thermocouples placés à quelques centimètres sous le lit fixe de bois. Ils sont reliés à un coffret de régulation muni de deux contrôleurs *Eurotherm 3216*. Le premier couple thermocouple/contrôleur sert à réguler la température de l'air. Le second est, quant à lui, utilisé comme sécurité thermique. Ce coffret dispose en outre d'un système de retransmission de ces températures vers l'équipement d'enregistrement des données.

Par ailleurs, nous avons testé l'homogénéité de la température d'air dans la section du réacteur sous le lit fixe. Compte tenu de la mesure de larges variations spatiales de température, il est rapidement apparu évident que la convection verticale au niveau des résistances chauffantes induisait une stratification thermique importante. Pour « casser » cette stratification nous avons mis en place un puissant ventilateur de brassage en amont du conduit en té. L'homogénéité de la température de l'air est alors rétablie à l'attaque du lit fixe.

II-2-1-4 : Suivi de la consommation énergétique du séchoir

La consommation d'énergie des résistances $Q_{e,\,rés}$ est mesurée au moyen d'un compteur électrique *ABB mini 1365*. Nous pouvons ainsi accéder à la puissance électrique :

$$\mathscr{P}_e = \frac{dQ_e}{dt} \tag{3.65}$$

La valeur de la consommation énergétique est transmise à l'ordinateur d'acquisition via un adaptateur de communication RS232 *ABB CRM04000*.

II-2-1-5 : Mesure de l'humidité relative de l'air à l'attaque du lit fixe

Dans ce dispositif, l'humidité relative n'est pas régulée. Elle est en revanche mesurée grâce à une sonde capacitive située à proximité immédiate des thermocouples connectés au boitier de régulation de la température. Pour nous assurer de la justesse de cette mesure, nous calculons la pression partielle de vapeur sous le lit fixe à partir des données de température et d'humidité relative et nous la confrontons à la valeur calculée à partir des données de l'air extérieur. En effet, il n'y a pas d'échange de vapeur entre l'entrée d'air dans le réacteur et la base du lit fixe.

II-2-1-6 : Détermination de la vitesse d'air

Le dispositif a été instrumenté dans le but de suivre la vitesse d'air dans la conduite.

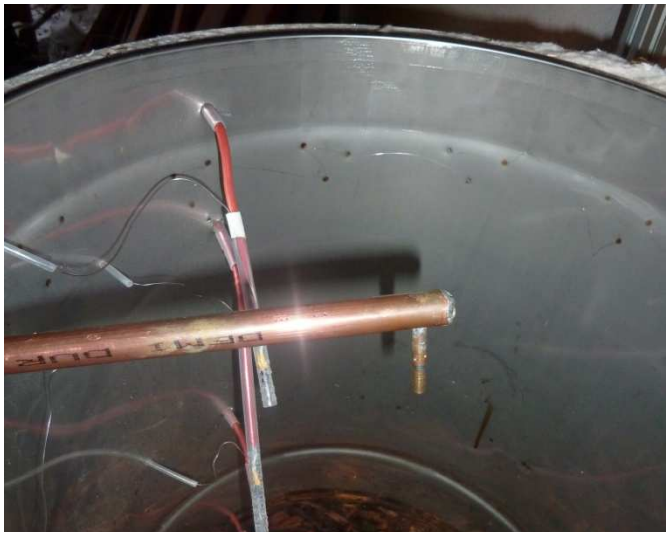


Figure 72 : Prise de pression statique

Dans un premier temps, nous avons tenté de relier la vitesse d'air aux pertes de charges le long du dispositif grâce à deux capteurs de pression différentielle *Druck PMP 4110*. Ces capteurs codent la pression différentielle comprise entre -320 et 320 mbar en une tension proportionnelle. Pour ce faire, ils sont alimentés en courant continu 24 V au moyen d'une alimentation stabilisée *Kert AT 5 V*. Le premier capteur mesure la différence de pression statique dans le conduit horizontal. Le second effectue le même type de mesure de part et d'autre du lit fixe de plaquettes. Les résultats obtenus ne permettent pas une bonne corrélation de ces différences de pression avec la vitesse car les valeurs sont toutes inférieures au centième de la pleine échelle.



Figure 73 : Vélocimètre : sonde à fil chaud à gauche et transmetteur à droite

Nous avons ensuite utilisé un vélocimètre *Testo* constitué d'une sonde à fil chaud associée à un transmetteur à affichage (Figure 73). Cet instrument est également alimenté par l'alimentation stabilisée 24 V. Un mauvais fonctionnement de la retransmission des données du vélocimètre à l'équipement d'acquisition nous a conduits à effectuer les mesures manuellement et périodiquement lors de l'essai. En déplaçant le vélocimètre sous le bord d'attaque du lit fixe (c'est-à-dire cinq centimètres sous la grille), nous avons remarqué que le profil de vitesse n'est ni plat, ni symétrique, ni répétable. Cette importante disparité de résultats est en outre accentuée par le brassage de l'air. L'accès à la valeur moyenne de la vitesse était donc compromis via cette méthode.

La méthode finalement retenue consiste en un calcul de la vitesse d'air à partir de la puissance des résistances et de la différence entre la température de consigne et la température extérieure :

$$\mathscr{P}_e = \left(q_{m,a} \times c_{P,a} + q_{m,v} \times c_{P,v}\right) \times \left(T_{int}^{\infty} - T_{ext}^{\infty}\right) \tag{3.66}$$

D'après l'équation des gaz parfaits nous avons :

$$q_{m,a} = \frac{\left(P_{atm} - P_{v,int}^{\infty}\right) \times \dot{V}}{M_a \times R \times T_{int}^{\infty}} \text{ et } q_{m,v} = \frac{P_{v,int}^{\infty} \times \dot{V}}{M_v \times R \times T_{int}^{\infty}} \tag{3.67) et (3.68}$$

D'après les Equations 3.66, 3.67 et 3.68, nous pouvons en déduire la vitesse moyenne dans la conduite (vide) :

$$\bar{v}_{g,conduite\,vide} = \frac{\mathscr{P}_e \times R \times T_{int}^{\infty}}{A_{conduite} \times \left(T_{int}^{\infty} - T_{ext}^{\infty}\right) \times \left(\frac{\left(P_{atm} - P_{v,int}^{\infty}\right) \times c_{P,a}}{M_a} + \frac{P_{v,int}^{\infty} \times c_{P,v}}{M_v}\right)} \tag{3.69}$$

Les valeurs calculées sont conformes à l'ordre de grandeur des données du vélocimètre. L'hypothèse sous-jacente est que seules les résistances participent à l'échauffement de l'air Nous considérons que l'énergie fournie par les ventilateurs (dissipation visqueuse) est en partie compensée par les déperditions thermiques en amont du lit fixe de bois et que le solde est négligeable vis-à-vis de l'énergie fournie par les résistances électriques.

En connaissant la porosité macroscopique du lit fixe de plaquettes Φ, nous pouvons calculer la vitesse apparente de l'air, verticale ascendante :

$$\bar{v}_{g,tas} = \frac{\bar{v}_{g,conduite\,vide}}{\Phi} \tag{3.70}$$

II-2-2 : Instrumentation du lit fixe de bois

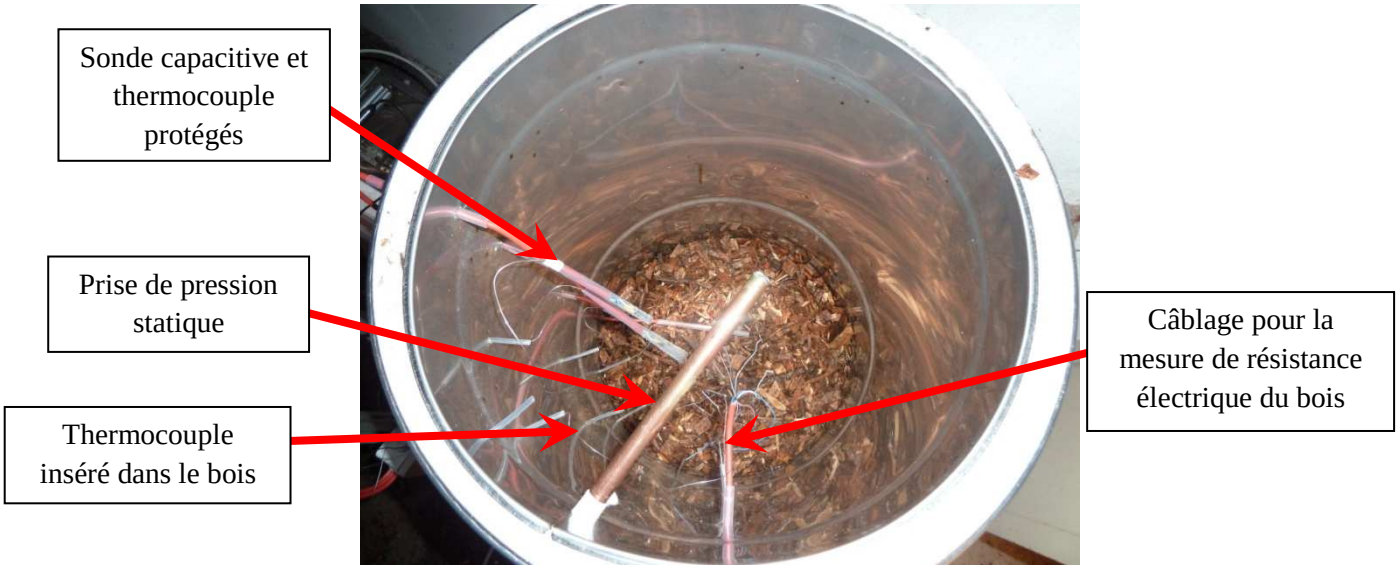


Figure 74 : Passages de paroi pour instrumenter le lit fixe

Un lit fixe de plaquettes forestières est placé au-dessus de la grille soudée dans le conduit vertical. Sa hauteur moyenne est de 72 cm. Au sein du lit fixe, nous mesurons les paramètres de l'air et du bois en quatre hauteurs : 7, 27, 47, et 67 cm (Figure 74). Chaque position est instrumentée lors du chargement en plaquettes forestières. De plus, nous mesurons les caractéristiques de l'air en sortie du lit fixe, c'est-à-dire au-dessus, le flux d'air étant ascendant.

Autant que faire se peut, les mesures s'effectuent au centre du conduit pour limiter les éventuelles perturbations de la paroi (paroi plus froide et entrée d'air extérieur, froid, au niveau des passages de paroi).

Remarque : nous ne disposons pas des outils, expérimentaux ou numériques, nécessaires pour vérifier que l'hypothèse d'homogénéité des paramètres de l'air dans la section du conduit vertical est valable dans toute l'épaisseur du lit ; dans la limite des moyens dont l'équipe d'accueil est actuellement dotée, cette hypothèse est supposée vraie.

II-2-2-1 : Suivi des paramètres de l'air

II-2-2-1-a : Profil d'humidité relative

A chaque niveau, nous disposons une sonde capacitive pour mesurer l'humidité relative de l'air. Cette sonde est protégée du contact des plaquettes grâce à un tube de Téflon débouchant (Figure 74). Afin de réduire le temps de réponse de la sonde, le tube est percé d'une multitude de trous au niveau de la tête de mesure.

II-2-2-1-b : Profil de température

Dans les tubes de Téflon, chaque sonde capacitive est accompagnée d'un thermocouple de type J, de 0,5 mm de diamètre. Ainsi isolé du bois, il permet de mesurer la température de l'air.

II-2-2-1-c : Pertes de charge

Nous mesurons la pression statique de part et d'autre du lit fixe pour en déduire les pertes de charge à travers celui-ci. Nous aurions souhaité comparer les résultats expérimentaux aux estimations obtenus grâce à l'équation d'Ergun (Annexe VI). Cependant, comme nous l'avons évoqué dans le paragraphe consacré à la mesure de la vitesse d'air dans le dispositif, les capteurs choisis ne sont pas adaptés à notre configuration : leur pleine échelle est trop grande par rapport aux valeurs de pressions différentielles.

II-2-2-2 : Suivi des paramètres du bois



Figure 75 : Instrumentation des plaquettes : mesure de la température (à gauche) et de la résistance électrique du bois (à droite)

II-2-2-2-a : Profil de température

Après avoir percé un trou de 1 mm de diamètre à cœur de la plaquette selon la direction longitudinale, nous insérons un thermocouple de type J (Figure 75). Comme pour l'étude de la particule isolée, nous choisissons des thermocouples de 0,5 mm de diamètre afin de limiter l'impact de la température extérieure sur la mesure de la température du bois.

L'extrémité du thermocouple est légèrement courbée pour bénéficier de l'effet *ressort* de la gaine métallique. Ceci permet d'assurer le maintien du thermocouple dans la plaquette lors du chargement du bois.

II-2-2-2-b : Profil de teneur en eau

Le séchage en lit fixe ne permet pas de suivre la masse des plaquettes pour accéder à leur teneur en eau. Nous utilisons une méthode indirecte : la mesure de la résistance électrique du bois (Skaar, 1988 ; Ast, 2009). Par position de mesure, deux plaquettes sont instrumentées. Pour ce faire, nous enfonçons deux pointes en inox dans la plaquette, espacées de 1 cm dans la direction longitudinale. Afin de limiter les risques de fissuration de la plaquette lors de la mise en place des pointes, nous perçons préalablement des trous de 1,6 mm de diamètre. Cette dimension permet un ajustement forcé de la pointe et garantit le contact électrique entre le bois et le métal. La mesure de la résistance est directement réalisée par une centrale d'acquisition de données *Agilent 34970A* munie d'une carte multiplexer *34901A*.

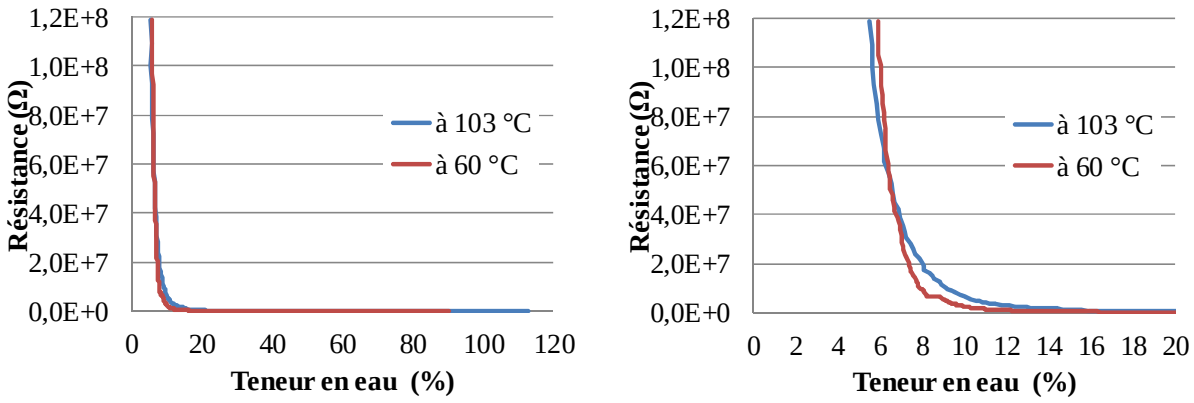


Figure 76 : Evolution de la résistance du bois au cours du séchage obtenu lors d'essais préliminaires sur des planchettes de hêtre (80×10×100 mm)

La mesure de la résistance ne permet pas de remonter, à proprement parler, à la teneur en eau (Figure 76). Mais par la brusque augmentation de sa valeur, elle permet de mettre en évidence une discontinuité de l'électrolyte, à savoir l'eau, entre les deux pointes. Pour les planchettes utilisées lors des essais préliminaires, cette transition correspond toujours à une teneur en eau (moyenne) faible d'environ 8 à 10 %.

Afin de garantir, la répétabilité de ces résultats, nous instrumentons deux plaquettes par niveau de mesure dans le lit fixe.

Remarque : les courbes de résistance sont écrêtées pour les faibles teneurs en eau car les valeurs réelles sont hors de la gamme de mesure du matériel utilisé.

II-2-3 : Chaine d'acquisition

La connexion des différents capteurs et instruments de mesure à un ordinateur et l'exécution du programme *HP_PP.exe* (compilé grâce au logiciel *Microsoft Visual Basic 6.0*) permettent l'enregistrement des données expérimentales :

- les thermocouples convertissent les températures en forces électromotrices qui sont conditionnées par la centrale d'acquisition *Agilent 34970A*,
- les humidités relatives et les pressions sont codées par les capteurs en tension (entre 0 et 5 V) avant d'être transmises à la centrale d'acquisition,
- les résistances sont directement mesurées via le multiplexeur de la centrale d'acquisition

- l'ordinateur interroge régulièrement la centrale *Agilent* via un port COM et enregistre les données des différents capteurs associés,

Les données sont sauvegardées en ASCII dans un fichier généré automatiquement par le programme.

Le compteur d'énergie quant à lui communique directement avec l'ordinateur selon le protocole de communication RS232 et transmet la valeur de la consommation électrique des résistances chauffantes à un logiciel fourni par le fabricant *ABB*. Malheureusement le logiciel en question ne permet pas la sauvegarde automatique des données. Pour y remédier, nous utilisons le logiciel *Mouse and Key Recorder 6.6* qui copie à intervalles de temps régulier les données reçues par le logiciel *ABB* dans un fichier de sauvegarde

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe II-2-1-6 de ce chapitre, seul la vitesse d'air mesurée par le vélocimètre nécessite l'intervention de l'opérateur.

II-3 : Conditions expérimentales

Les essais sont menés à température et vitesse d'air constantes. En vue de tester la fiabilité du modèle pour des profils de séchage variés, nous choisissons des consignes très contrastées d'un essai à l'autre (Tableau 15) :

	Débit d'air ($m^3.h^{-1}$)	Température (°C)
Essai n°1	115	75
Essai n°2	227	35

Tableau 15 : Conditions opératoires pour les essais de séchage de plaquettes forestières en lit fixe

Le débit d'air du premier essai permet d'atteindre une vitesse verticale moyenne dans le lit fixe de 0,42 $m.s^{-1}$. Pour le deuxième essai, la valeur de cette vitesse est de 0,84 $m.s^{-1}$. Ces débits d'air correspondent respectivement aux positions *min.* et *max.* du variateur de vitesse de rotation du ventilateur d'alimentation. Avec les configurations aérauliques décrites ci-dessus, nous nous attendons à obtenir un front de séchage plus marqué dans le premier cas que dans le second.

Le tube vertical est rempli, au-dessus de la grille par 40 à 43 kg plaquettes forestières très humides : leur teneur en eau moyenne initiale est d'environ 150 %.

Les essais sont effectués en extérieur pendant le mois de décembre 2010. Compte tenu de la « fraicheur » du climat hivernal lorrain, les températures ambiantes sont comprises entre -6 et 4 °C. Afin d'éviter que l'eau contenue dans le bois ne subisse deux changements de phase (fusion puis vaporisation), les plaquettes forestières sont réchauffées à une température de 5 °C avant d'être chargées dans le dispositif.

II-4 : Résultats expérimentaux : analyse et interprétations

Afin de faciliter l'analyse des résultats obtenus, nous numérotons de 1 à 4 les positions de mesures, du bas vers le haut.

II-4-1 : Températures de l'air et du bois

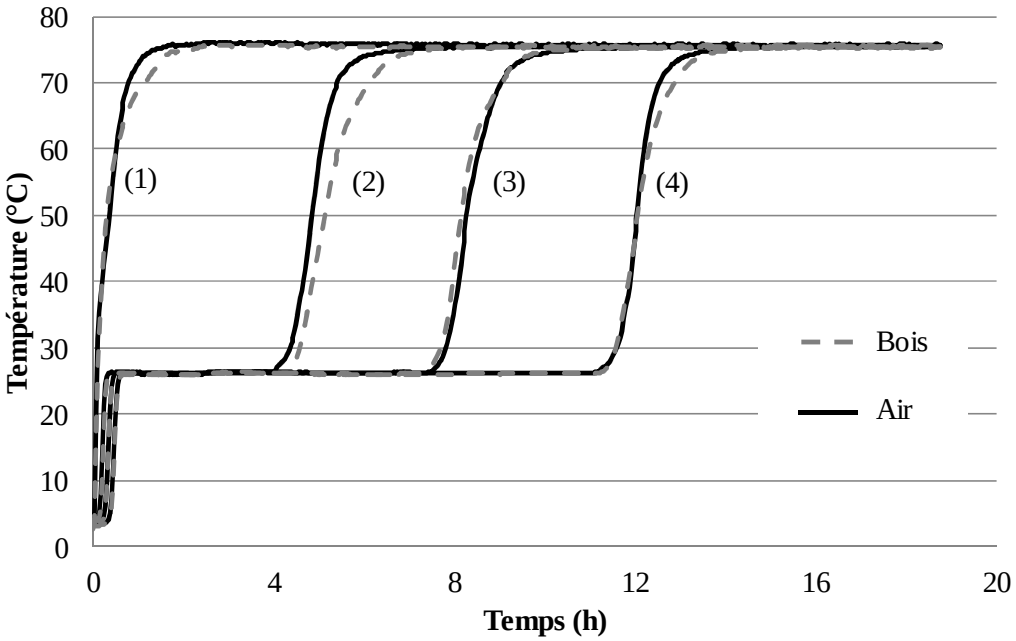


Figure 77 : Evolution temporelle des profils de températures (air et bois) lors du séchage du lit fixe de plaquettes à 75 °C

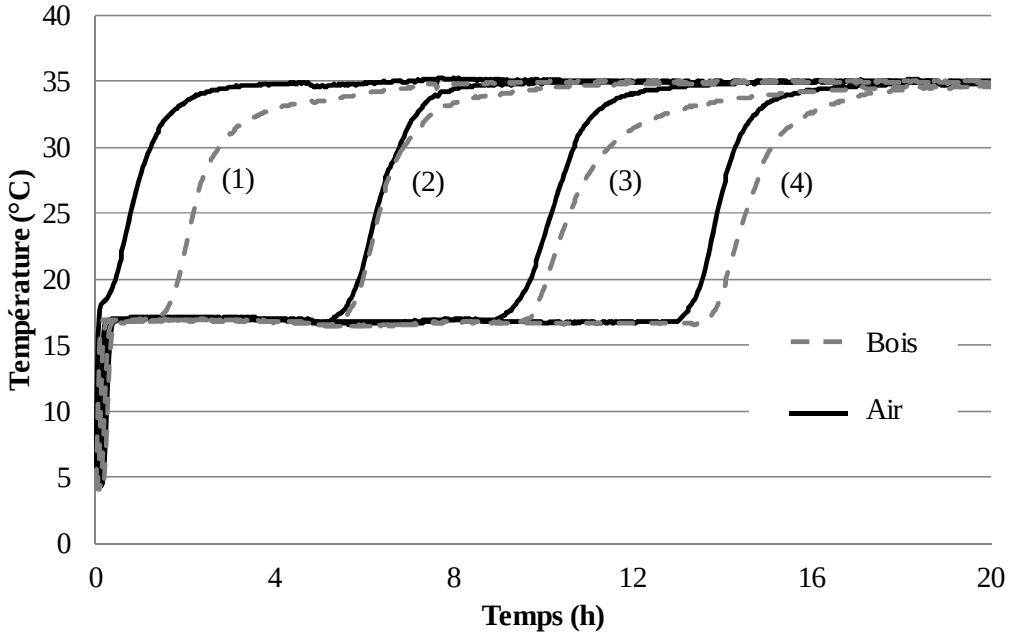


Figure 78 : Evolution temporelle des profils de températures (air et bois) lors du séchage du lit fixe de plaquettes à 35 °C

Au cours du séchage, les températures de l'air et du bois mesurées dans le lit fixe augmentent jusqu'à atteindre la température de l'air injecté au niveau de la grille (Figures 77 et 78). Le temps nécessaire pour aboutir à cette température de consigne est d'autant plus court que le point de mesure est proche

de la base du lit fixe (zone d'injection de l'air chaud). Quelle que soit la hauteur de mesure, cette montée en température peut être décomposée en trois phases :

- les températures de l'air et du bois augmentent rapidement pour atteindre une température intermédiaire commune et unique dans toute l'épaisseur du lit fixe : l'air est saturé en eau et sa température sèche est confondue avec la température humide (saturation adiabatique) ; la valeur de la température humide est définie par le bilan de chaleur sur l'air :

$$\frac{\dot{V}_{init}\times\left(T^{\infty}_{db,init}-T_h\right)}{R\times T^{\infty}_{db,init}}\times\left(c_{P,a}\times M_a\times\left(P_{atm}-P_{v,init}\right)+c_{P,v}\times M_v\times P_{v,init}\right) = \frac{L_v\left(T_h\right)\times\dot{V}_{init}\times M_v}{R\times T^{\infty}_{db,init}}\times\left(P_{vs}\left(T_h\right)\times\frac{P_{atm}-P_{v,init}}{P_{atm}-P_{vs}\left(T_h\right)}-P_{v,init}\right) \quad (3.71)$$

- les températures de l'air et du bois se maintiennent à cette température humide tant que les transferts de vapeur à la surfaces des plaquettes situées en amont du point de mesure sont suffisamment intenses pour saturer l'air, c'est-à-dire tant que la teneur en eau du bois est suffisamment élevée ; la durée de ce palier est conditionnée par la quantité de bois en amont et elle explique à elle seule les variations de durée de l'élévation totale de température,
- le palier s'achève lorsque les plaquettes situées en amont du point de mesure sont trop sèches pour que les transferts de chaleur et de masse intervenant à leurs surfaces ne puissent saturer l'air ; nous observons alors une seconde rampe de montée des températures de l'air et du bois jusqu'à un nouveau palier de température correspondant à la température sèche de consigne.

La seconde rampe intervient plus précocement pour l'air que pour le bois. En effet, dès que l'air n'est plus saturé, sa température augmente tandis que la température du bois demeure égale à la température humide tant que la teneur en eau de celui-ci est supérieure à la teneur en eau critique. Ensuite la température du bois augmente à son tour. En outre, nous remarquons que lors de la seconde rampe, la vitesse de chauffe est indépendante de la position dans le lit fixe. Cette montée en température est d'autant plus progressive que la vitesse d'air est importante. Dans le cas de l'essai à 35 °C, pour un point de mesure donné, la seconde rampe de montée en température est à peine achevée que celle du point de mesure suivant débute. En revanche, la seconde rampe de montée en température est beaucoup plus abrupte dans le cas de l'essai à 75 °C, au cours duquel la vitesse d'air deux fois plus faible. Ainsi, le front de séchage est plus marqué au cours de cet essai à 75 °C, ce qui est confirmé par un déphasage moins important entre la seconde rampe de montée en température relative à l'air et celle correspondant au bois.

II-4-2 : Humidité relative de l'air

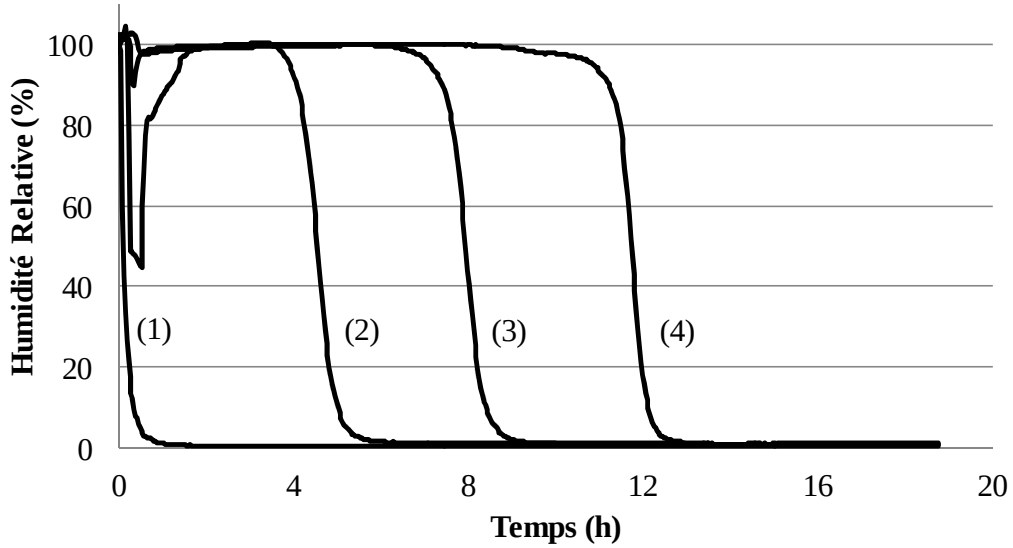


Figure 79 : Evolution temporelle du profil d'humidité relative lors du séchage du lit fixe de plaquettes à 75 °C

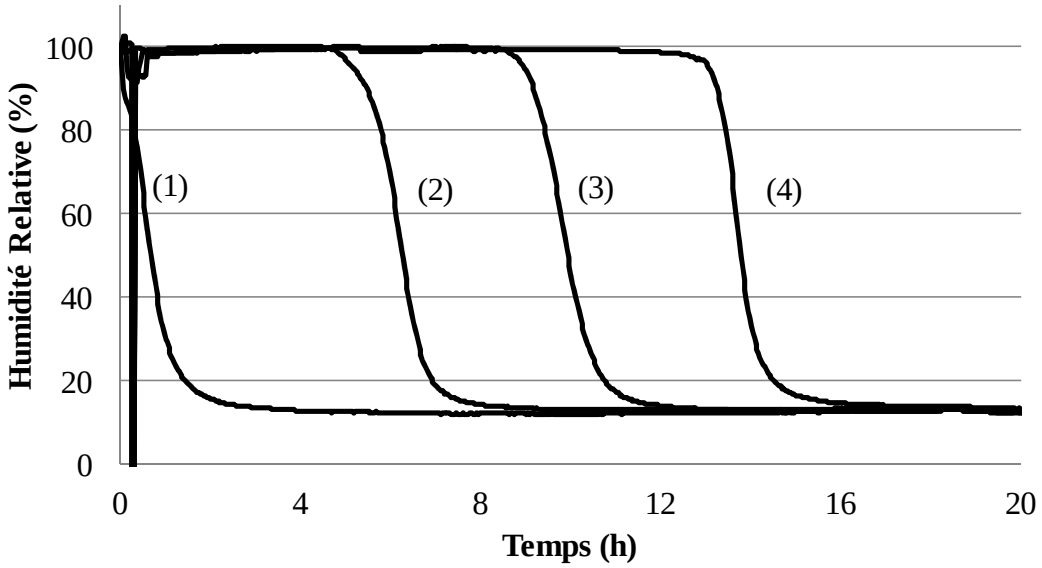


Figure 80 : Evolution temporelle du profil d'humidité relative lors du séchage du lit fixe de plaquettes à 35 °C

Les Figures 79 et 80 présentent le profil d'humidité relative dans le lit fixe respectivement lors des essais à 75 et 35 °C. Les points singuliers observés en début de ces courbes résultent du mauvais fonctionnement d'un capteur et non d'une chute d'humidité relative. Pour y remédier, nous avons remplacé ce capteur dès les premières minutes de l'essai à 35 °C.

Les allures des courbes confirment les interprétations des résultats de température :

- l'air est saturé lors du palier de température,
- le palier de température s'achève lorsque l'humidité relative chute,
- la chute d'humidité relative est plus rapide à 75 qu'à 35 °C : la stratification augmente lorsque la vitesse de l'air diminue.

En observant les quatre dernières figures, nous pouvons remarquer que les évolutions relatives aux trois dernières positions sont réparties régulièrement dans le temps. Le premier point de mesure semble singulier. Nous devons rappeler que les points de mesure sont tous espacés de 20 cm et que le premier est situé à 7 cm de la base du lit fixe. Il semble donc y avoir une limite à la stratification de l'air : les turbulences provoquées par le ventilateur de brassage influencent probablement les conditions climatiques du premier point de mesure. Cet effet s'estomperait rapidement le long du lit fixe en raison de la tortuosité des interstices au sein de celui-ci.

En se référant aux résultats présentés jusqu'alors, nous pouvons confirmer que nous avons atteint l'objectif initial : recueillir des données expérimentales relatives à des profils de séchage différent, c'est-à-dire avec un front de séchage plus ou moins prononcé.

II-4-3 : Teneur en eau du bois (à partir de sa résistance)

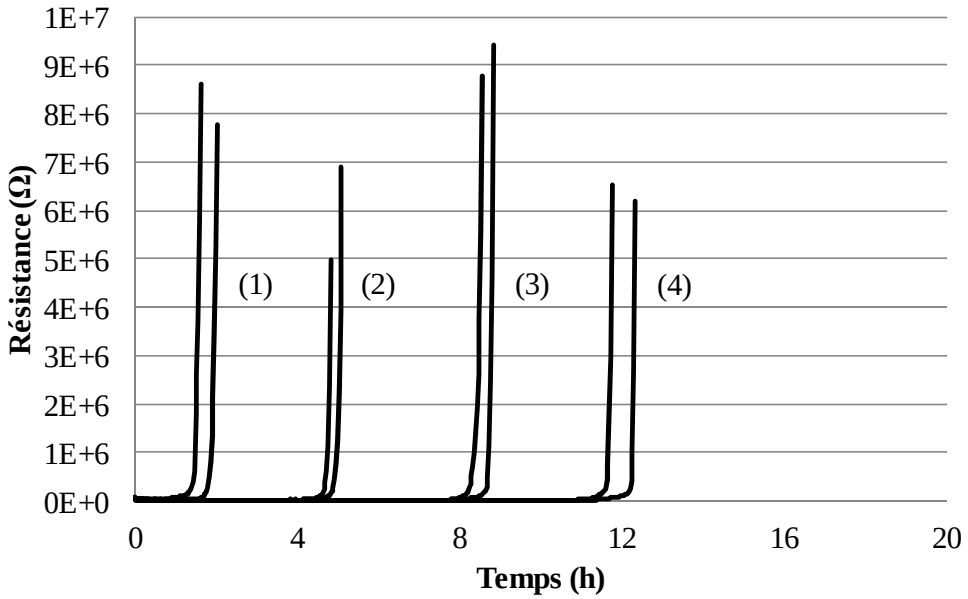


Figure 81 : Evolution temporelle de la résistance du bois le long du lit fixe de lors du séchage à 75 °C

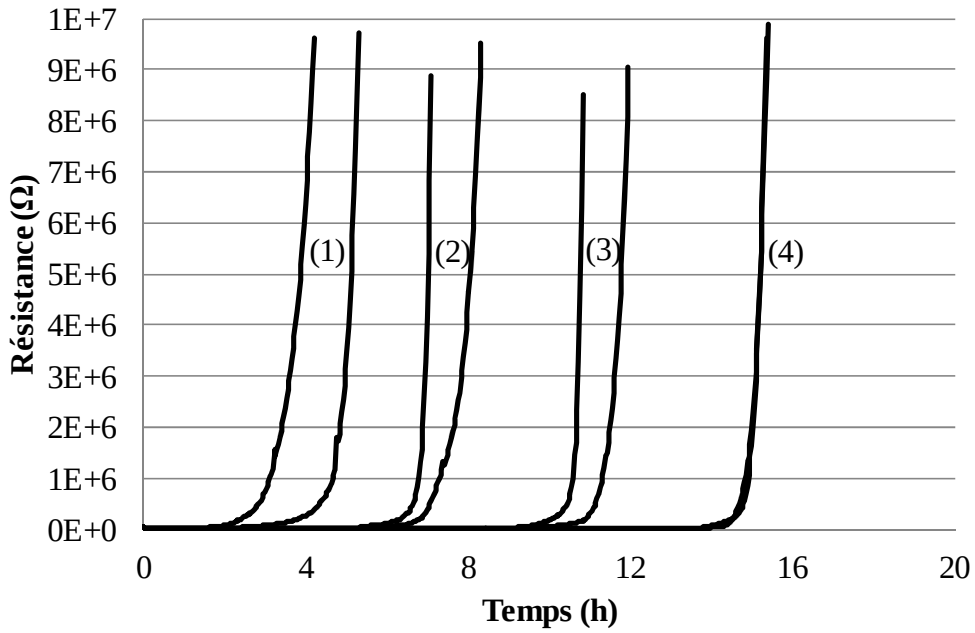


Figure 82 : Evolution temporelle de la résistance du bois le long du lit fixe de lors du séchage à 35 °C

L'étude des Figures 81 et 82, associée aux essais préliminaires (Figure 76), confirme qu'il existe un front de séchage, tel que pouvait le laisser supposer les Figures Figure 77 à Figure 80 : l'augmentation brutale de résistance intervient d'autant plus tôt que la plaquette instrumentée est proche de la base du lit fixe.

Pour une position donnée, nous pouvons remarquer que l'écart de résistances obtenues pour chaque couple de plaquettes instrumentées est globalement plus important dans le cadre du séchage à 35 qu'à 75 °C. Bien que l'échantillonnage de plaquettes par position soit trop réduit pour pouvoir le confirmer, nous pouvons raisonnablement supposer que ceci reflète une plus grande variabilité de la teneur en eau moyenne des plaquettes au moment de la transition des résistances.

Les résultats expérimentaux analysés dans cette partie peuvent dès lors servir de base de référence pour la validation du modèle global.

III : Validation du modèle global

À partir de la description du dispositif et du matériel végétal (paragraphe II de ce même chapitre), nous pouvons modéliser la configuration étudiée.

III-1 : Modélisation de la configuration expérimentale

III-1-1 : Réacteur

Le séchoir est constitué d'un tube vertical de 72 cm de haut et 40 cm de diamètre rempli dont la paroi présente les caractéristiques suivantes :

- elle présente une épaisseur moyenne de 41 mm,
- sa résistance thermique de conduction est de 0,87 $K.W^{-1}$,

- la valeur de sa capacité thermique volumique moyenne est égale à 187,2 kJ.m^{-3}.K^{-1}.

Dans la direction longitudinale, ce réacteur est divisé en 72 CV, chacun ayant une hauteur de 1 cm.

III-1-2 : Conditions climatiques de séchage

III-1-2-1 : A l'attaque du lit fixe

Les paramètres de l'air entrés dans le modèle correspondent aux conditions réellement observées lors des essais expérimentaux (Tableau 16).

	Essai 1	Essai 2
Température (°C)	75	35
Humidité relative (%)	0,7	13
Débit d'air (m^3.s^{-1})	0,032	0,063
Vitesse d'air dans la conduite vide (m.s^{-1})	0,28	0,51
Porosité du lit fixe	0,60	0,60
h_c (W.m^{-2}.K^{-1})	43	65
h_m (m.s^{-1})	0,042	0,055

Tableau 16 : Caractéristiques de l'écoulement d'air à l'attaque du lit fixe

Les valeurs du coefficient de transfert externe de chaleur pour un lit fixe mobile de particules sont calculées pour chaque essai à partir de la formule proposée par Nganhou (2004) :

$$Re = \frac{\rho_g \times v_g \times L_c}{\mu_g} \tag{3.72}$$

$$Pr = \frac{c_{P,g} \times \mu_g}{\lambda_g} \tag{3.73}$$

$$Nu = \left(7 - 10\times\Phi + 5\times\Phi^2\right)\times\left(1 + 0,7\times Re^{0,2}\times Pr^{1/3}\right) + \left(1,33 - 2,4\times\Phi + 1,2\times\Phi^2\right)\times Re^{0,7}\times Pr^{1/3} \tag{3.74}$$

$$h_c = \frac{\lambda_g \times Nu}{L_c} \tag{3.75}$$

La longueur caractéristique L_c considérée pour cet écoulement est la plus grande dimension de la particule : 21 mm. En outre, les valeurs du coefficient de transfert externe de masse sont déterminées à partir de l'Equation 2.28.

III-1-2-2 : A l'extérieur du réacteur

Nous devons connaître la température extérieure afin d'évaluer les déperditions thermiques à la surface du réacteur. Les valeurs retenues correspondent aux moyennes des valeurs enregistrées lors de l'expérimentation. Elles sont égales à -3 et 4 °C respectivement pour les essais à 75 et 35 °C.

En convection naturelle, comme c'est le cas à l'extérieur du réacteur, nous admettons que le coefficient de transfert externe de chaleur est égal à 8 W.m^{-2}.K^{-1}.

III-1-3 : Matériel végétal

Comme pour l'expérimentation, nous simulerons le séchage de plaquettes forestières de hêtre dont la teneur en eau initiale est de 150 %. Nous simulons une variabilité de ce paramètre initial en effectuant un tirage aléatoire selon une loi gaussienne dont l'écart type est arbitrairement fixé à 5 % de teneur en eau.

Conformément aux mesures expérimentales, la macroporosité du lit fixe est égale à 0,60 et nous considérons une infra-densité du bois de 523 $kg.m^{-3}$, homogène sur l'ensemble du lot.

À partir d'observations du lit fixe de plaquettes, la géométrie de la plaquette *type* identifiée est un parallélépipède rectangle ayant pour dimensions 21×21×5 mm. Comme pour la teneur en eau initiale, nous simulons une variabilité de cette géométrie en faisant un tirage aléatoire selon une loi gaussienne dont l'écart type est fixé artificiellement égal à 10 % de la moyenne de chaque dimension. Les caractéristiques de la particule *type* sont résumées dans le tableau ci-dessous :

	Moyenne	Ecart type
Longueur (mm)	21	10 %
Largeur (mm)	21	10 %
Epaisseur (mm)	5	10 %
Densité ($kg.m^{-3}$)	523	/
Température initiale (°C)	5	/
Teneur en eau initiale (%)	150	10 %

Tableau 17 : Caractéristiques de la plaquette forestière de hêtre *type*

À partir de cette taille moyenne de plaquette et en connaissant le volume d'un CV, nous pouvons calculer le nombre de particules *M* (Equation 3.26) : 227.

Compte tenu du mode de fonctionnement des déchiqueteuses, l'épaisseur de la plaquette est très rarement orientée dans la direction longitudinale. De ce fait, nous allons considérer deux orientations extrêmes : direction tangentielle dans l'épaisseur (« débit sur quartier ») ou direction radiale dans l'épaisseur (« débit sur dosse »). Dans la réalité, l'orientation est une composée de ces deux configurations *types*.

Pour chaque type de débit et chaque condition climatique, nous devons identifier les paramètres de l'activité adimensionnelle. Le dispositif expérimental destiné à recueillir des cinétiques de séchage de particules isolées (Chapitre 2 : II-1-2) n'est pas adapté à l'étude des plaquettes forestières : la masse de ce type d'échantillon, à peine 3 g, est trop faible par rapport à la précision de la balance. En revanche, les paramètres de *TransPore* 3-D ont été ajustés pour simuler de manière fiable le séchage du hêtre (Chapitre 2 : III-2-1-1). En outre, les particules *types* choisies présentent une géométrie (parallélépipède) et un type de débit simple (vrai dosse ou vrai quartier), facilement modélisables pour *TransPore*.

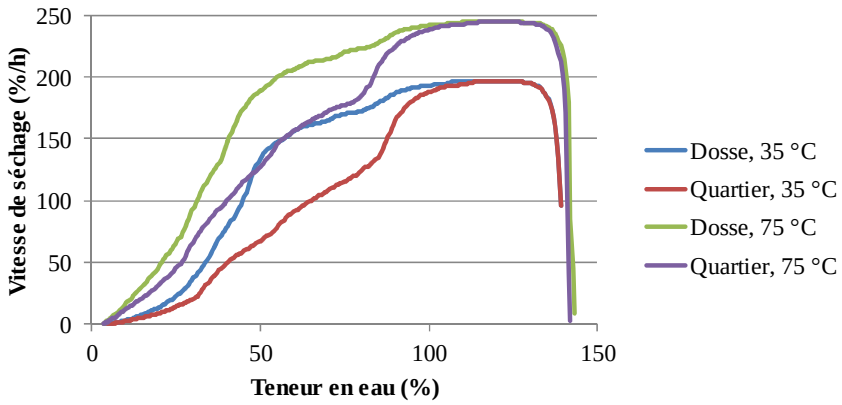


Figure 83 : Cinétiques de séchage de plaquettes forestières de hêtre simulées par *TransPore*

Ainsi, les paramètres de l'activité adimensionnelle sont identifiés à partir de simulations effectuées au moyen de cet outil numérique (Figure 83). Pour ce faire nous appliquons la même méthode que pour le traitement des cinétiques expérimentales. Les paramètres retenus sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Température	Débit	X_{cr} (%)	*A*	*B*	*C*	*D*
75 °C	Dosse	94,5	5,12	-2,01	4,98	-5,42
	Quartier	99,9	1,59	-1,48	3,02	-6,30
35 °C	Dosse	107	3,10	-2,32	9,42	-3,59
	Quartier	115	3,76	-1,78	12,3	-9,42

Tableau 18 : paramètres de l'activité adimensionnelle pour des plaquettes de hêtre (21×21×5 mm)

III-2 : Analyse qualitative des résultats numériques

Dans ce paragraphe, nous nous attachons à démontrer que le modèle global permet de prédire les tendances dégagées de l'analyse des résultats expérimentaux. Nous insistons particulièrement sur la prise en compte de la diversité de conditions climatiques à l'attaque du lit fixe lors des simulations.

III-2-1 : Conditions climatiques

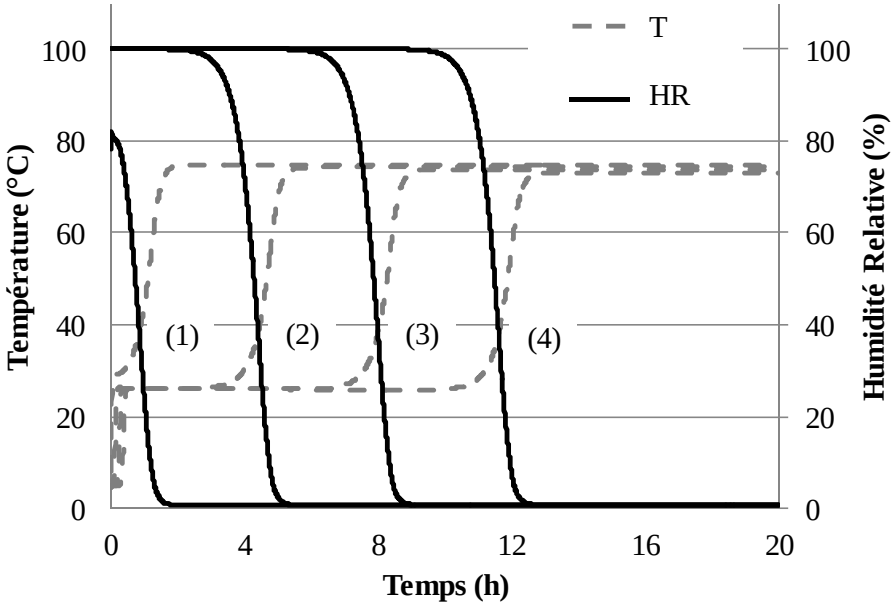


Figure 84 : Profil de conditions climatiques simulé pour le séchage du lit fixe de plaquettes forestières à 75 °C

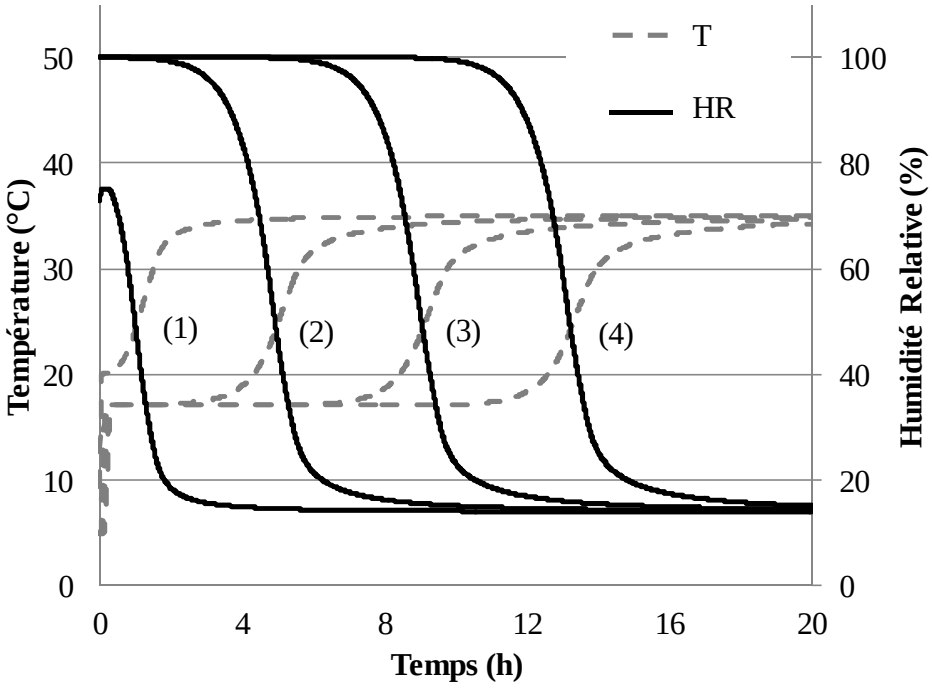


Figure 85 : Profil de conditions climatiques simulé pour le séchage du lit fixe de plaquettes forestières à 35 °C

Les tendances d'humidité relative et de température de l'air obtenues par simulation (Figures 84 et 85) sont semblables aux résultats expérimentaux :

- la montée en température se déroule en trois phases : deux rampes séparées par un palier,

- lors de ce palier, l'air est saturé en eau et c'est lorsque l'humidité relative chute que la seconde rampe débute,
- la stratification de l'air est plus marquée lors de la simulation à 75 °C (lorsque la vitesse d'air à travers le lit fixe est faible).

III-2-2 : Paramètres du bois

III-2-2-1 : Teneur en eau

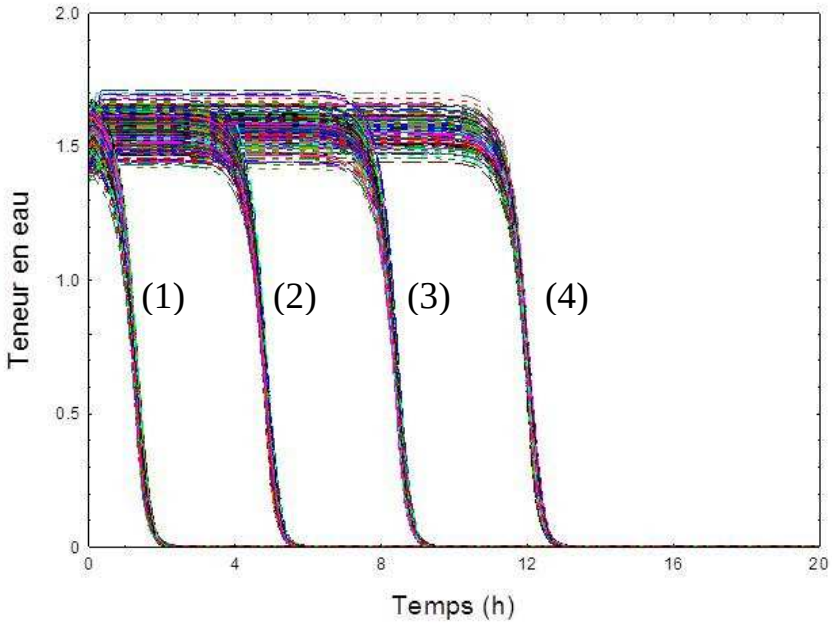


Figure 86 : Evolution du profil de teneur en eau des particules se situant au niveau des quatre positions de mesure le long du lit fixe de plaquettes forestières séché à 75 °C

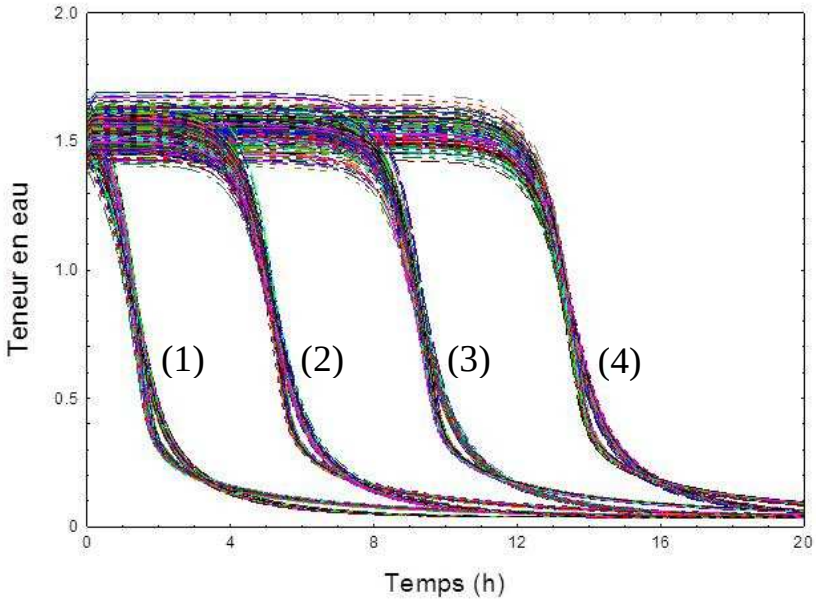


Figure 87 : Evolution du profil de teneur en eau des particules se situant au niveau des quatre positions de mesure le long du lit fixe de plaquettes forestières séché à 35 °C

Compte tenu de l'épaisseur du faisceau de courbes au début du séchage, les Figures 86 et 87 démontrent que le modèle global est bel et bien capable de tenir compte de l'hétérogénéité de la teneur en eau initiale du produit à sécher. Ceci confirme la pertinence de la structure multi-échelle du modèle développé.

En outre, le modèle permet de prédire une diminution de cette hétérogénéité au cours du séchage. Cependant, nous pouvons observer un comportement bimodal en fin de séchage à 35 °C, avec deux groupes de courbes clairement dissociés. Ils correspondent aux deux types de débit de plaquettes considérés (dosse et quartier). En réalité il existe une multitude de types de débit intermédiaires et la dissociation de ces deux groupes n'aurait donc pas pu être observée expérimentalement. Il s'agit donc d'une mise en évidence des limites des hypothèses simplificatrices adoptées dans cette modélisation. Pour prévenir ce type de singularité, il serait pertinent d'étoffer le pool d'activités de surface en considérant le cas des débits de type *faux-quartier* et *fausse-dosse*. En effet, *TransPore* nous permet de pondérer les propriétés de transfert du code par l'angle des accroissements annuels (cerne du bois) au sein de la section des plaquettes : une rotation est appliquée aux tenseurs des propriétés (perméabilités, coefficients de diffusion, conductivités thermiques, etc.). Les cinétiques ainsi simulées permettraient d'identifier les nouvelles activités de surfaces.

III-2-2-2 : Température

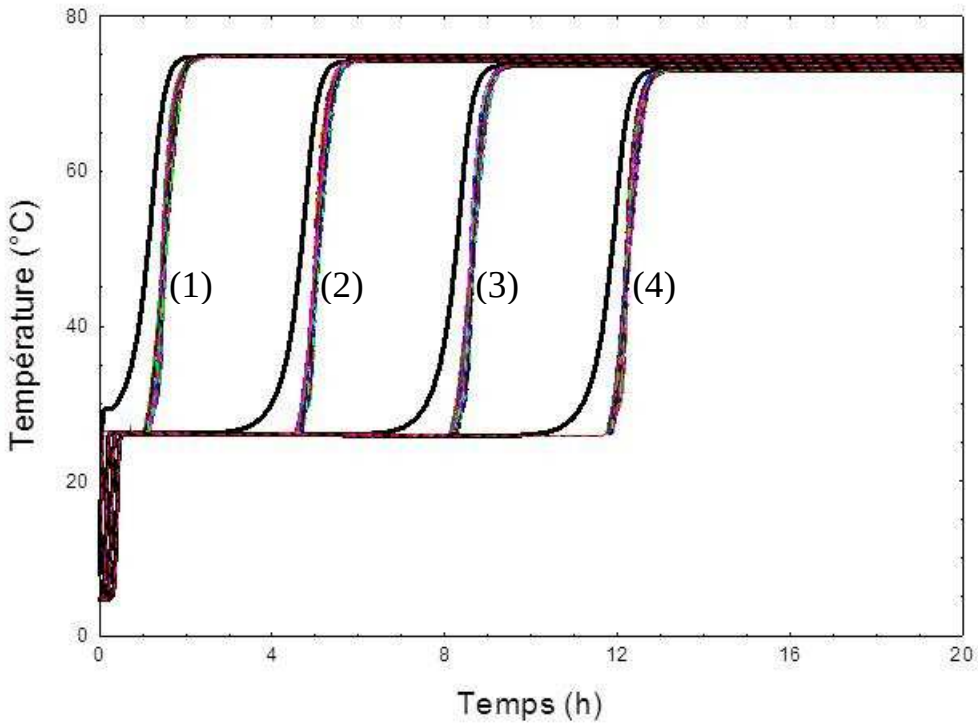


Figure 88 : Evolution du profil de température des particules se situant au niveau des quatre positions de mesure le long du lit fixe de plaquettes forestières séché à 75 °C

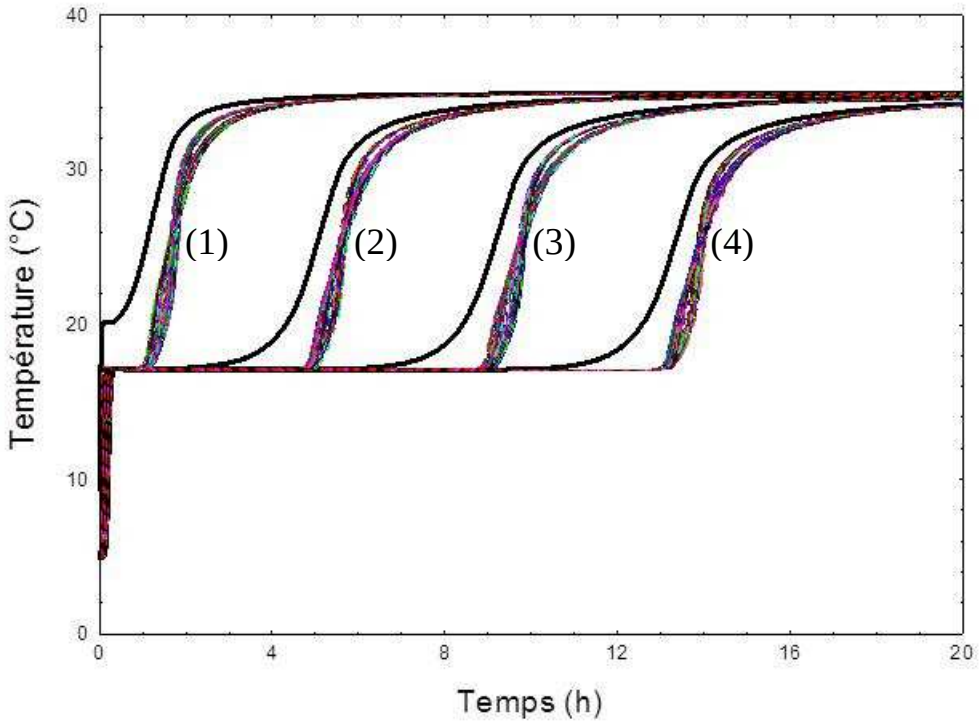


Figure 89 : Evolution du profil de température des particules se situant au niveau des quatre positions de mesure le long du lit fixe de plaquettes forestières séché à 35 °C

Pour chaque position, le faisceau de courbes multicolore correspond aux températures de toutes les plaquettes (Figures 88 et 89). Bien que la température soit initialement homogène sur toute la masse de bois, on peut observer une hétérogénéité apparaitre puis disparaitre au cours du séchage. Celle-ci est induite par l'hétérogénéité de la teneur en eau initiale, par la diversité des types de débit et par le couplage entre transferts de chaleur et de masse. Cette hétérogénéité est d'autant plus forte que la vitesse de séchage est faible.

Sur ces mêmes figures, nous avons représenté par un trait noir épais la température de l'air (à gauche de chaque faisceau multicolore). Conformément aux résultats expérimentaux, le modèle prédit un décalage entre la courbe de la température de l'air et celle du bois lors de la seconde rampe qui correspond au temps nécessaire pour que la teneur en eau du bois décroisse sous la teneur en eau critique à partir du moment où l'air n'est plus saturé (c'est-à-dire quand la température de l'air devient supérieure à la température humide). Comme pour les résultats expérimentaux, nous observons une réduction de ce décalage lorsque la vitesse de l'air à travers le lit fixe diminue : le front de séchage est alors plus marqué.

L'analyse qualitative des résultats numériques montre que les phénomènes observés expérimentalement sont fidèlement simulés par le modèle global. Pour achever la validation du modèle global, il faut dès lors confirmer que l'intensité de ces phénomènes simulés est réaliste.

III-3 : Analyse quantitative des résultats numériques

Pour chaque type de paramètre étudié, nous superposons les résultats expérimentaux et numériques sur le même graphique. Afin de faciliter la lecture des graphiques obtenus, nous ne traçons pas les

faisceaux de courbes obtenues numériquement par la prise en compte de la variabilité des paramètres des plaquettes forestières : seules les courbes relatives à la particule *type* sont représentées.

III-3-1 : Dans le cas où la vitesse d'air est faible (essai à 75 °C)

III-3-1-1 : Evolution des conditions climatiques le long du lit fixe

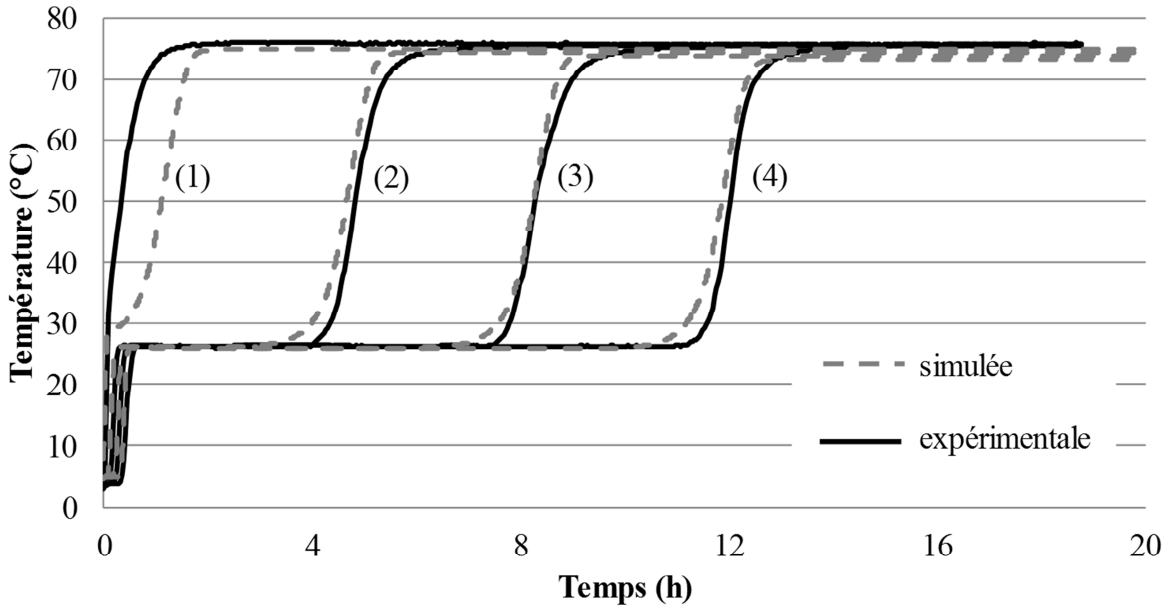


Figure 90 : Profils de température d'air obtenus expérimentalement et numériquement pour une vitesse d'air faible

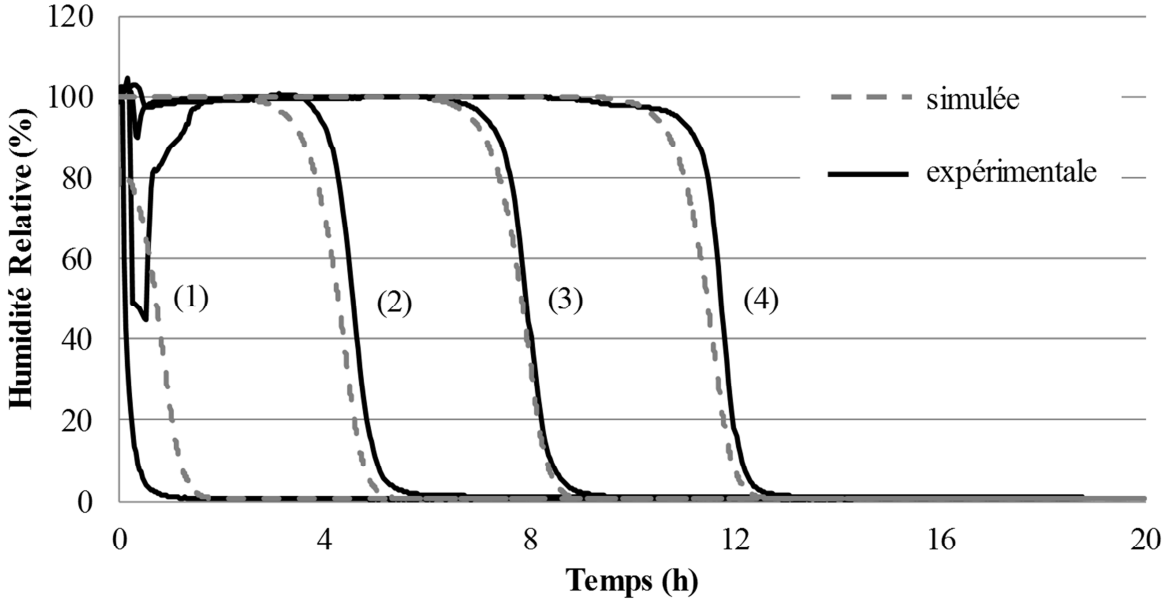


Figure 91 : Profils d'humidité relative obtenus expérimentalement et numériquement pour une vitesse d'air faible

La confrontation des résultats présentés en Figure 90 et Figure 91 montre un très bon accord entre l'expérimentation et la simulation pour les positions n°2 à 4 :

- la température de palier est, dans les deux, cas égale à 27 °C,
- pour chaque position, la seconde rampe de montée en température de l'air intervient au même instant quelle que soit la nature des résultats ; en outre, la vitesse de cette rampe est identique,
- les observations du point précédent sont également valables pour l'humidité relative : le modèle global prédit une chute des valeurs à un instant et avec une vitesse réaliste.

Concernant le premier point de mesure, nous observons un retard des résultats numériques. Ceci s'explique par le fait que le modèle n'est capable de simuler que des configurations aérauliques simples : il ne tient pas compte de l'homogénéisation des conditions climatiques dans la première partie du lit fixe en raison de turbulences locales résultant de la proximité du ventilateur de brassage.

Enfin, nous devons noter qu'à la fin de l'essai, la température de l'air prédite est inférieure à celle mesurée. Cette dernière correspond sensiblement à la température de l'air injecté à la base du lit fixe. En outre, l'écart de valeur est d'autant plus important que le point de mesure est haut dans le lit fixe. L'intensité des déperditions thermiques simulées est supérieure à la réalité. Pour expliquer cette différence, nous pouvons émettre trois hypothèses :

- les données *constructeur* relatives à la paroi du conduit seraient erronées ; nous avions notamment évalué une résistance thermique à la diffusion supérieure à la valeur annoncée,
- l'hypothèse d'homogénéité des conditions climatiques dans la section du lit fixe conduit à une surévaluation de la température de la couche d'air à proximité de la paroi et induit une surestimation des fuites de chaleur,
- la valeur choisie du coefficient de transfert externe de chaleur à l'extérieur du dispositif est trop élevée.

Néanmoins, cet écart de température est faible : sa valeur maximale est de 2 °C. Nous considérons donc qu'il ne met pas en péril la validité du modèle.

III-3-1-2 : Evolution des grandeurs au sein du bois

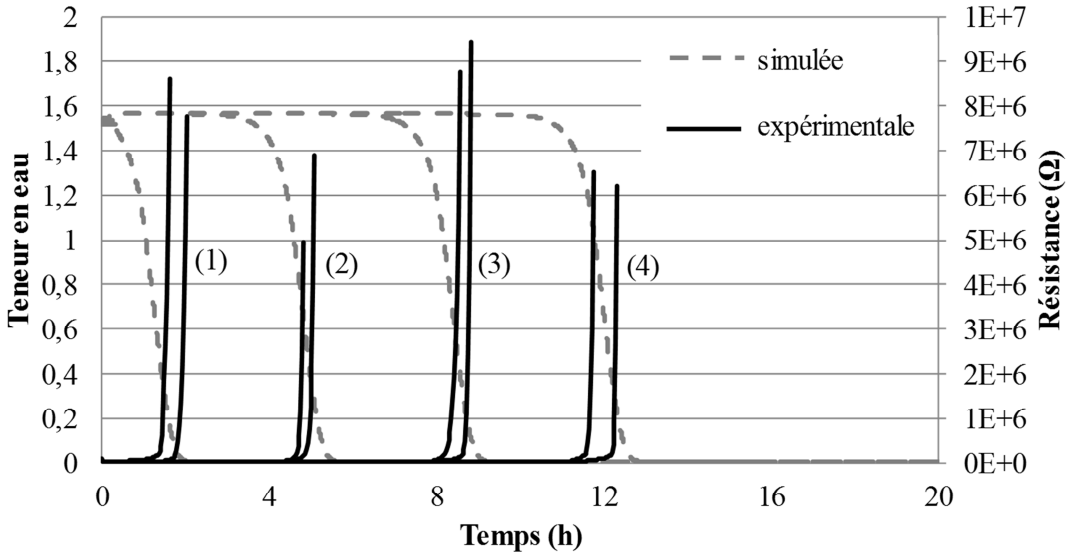


Figure 92 : Suivi expérimental et numérique de la teneur en eau du bois pour une vitesse d'air faible

Pour chaque point de mesure, la Figure 92 confirme que l'augmentation brutale de résistance électrique du bois mesurée expérimentalement se manifeste à la fin du séchage : elle intervient systématiquement lorsque la teneur en eau du bois simulée chute à une valeur de 20 % environ.

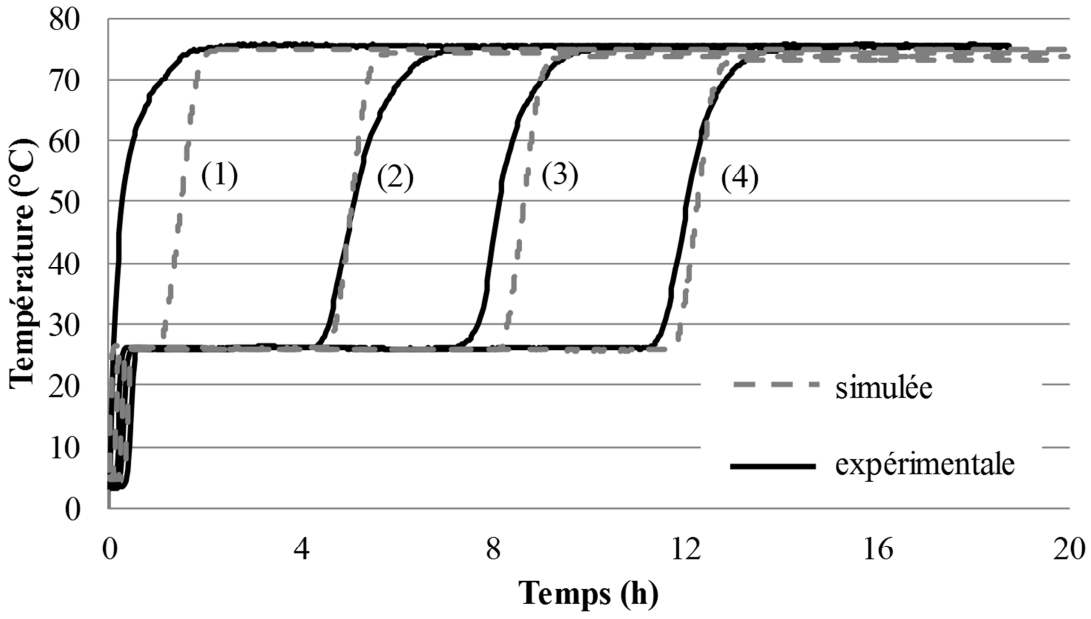


Figure 93 : Evolution de la température du bois au niveau des quatre positions de mesure le long du lit fixe pour une vitesse d'air faible

Contrairement au cas de l'air, la vitesse de la seconde rampe de montée en température du bois simulée est légèrement supérieure à celle de la courbe expérimentale. En outre, l'inflexion de la courbe numérique en fin de rampe est plus brutale qu'en réalité. Cette différence de profil est directement liée aux paramètres identifiés de l'activité adimensionnelle. Ceci est donc révélateur de la difficulté de choisir la particule représentative des plaquettes composant le lit fixe.

Cependant, pour chaque point de mesure, l'écart entre les deux courbes reste réduit : l'accord des résultats demeure acceptable. Par ailleurs, il faut garder à l'esprit que la variabilité des plaquettes est absente, tant expérimentalement que numériquement, par la mesure de l'évolution temporelle des paramètres d'une seule particule.

Les autres observations formulées dans le cadre de la confrontation des profils de températures d'air sont également valables pour le profil de température du bois (cf. paragraphe III-3-1-1 de ce même chapitre).

III-3-2 : Dans le cas où la vitesse d'air est élevée (essai à 35 °C)

Nous ne répétons pas ici l'analyse approfondie menée pour l'essai à 75 °C. Nous nous limitons à la mise en exergue des différences de cohérence de résultats entre ces deux essais.

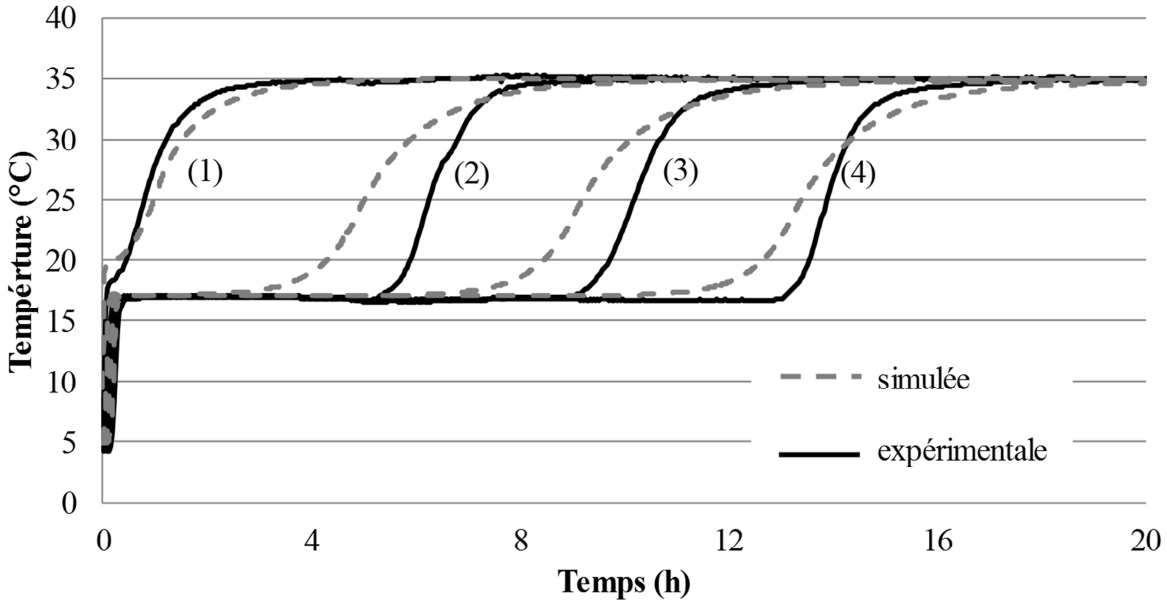


Figure 94 : Evolution de la température de l'air au niveau des quatre positions de mesure le long du lit fixe pour une vitesse d'air élevée

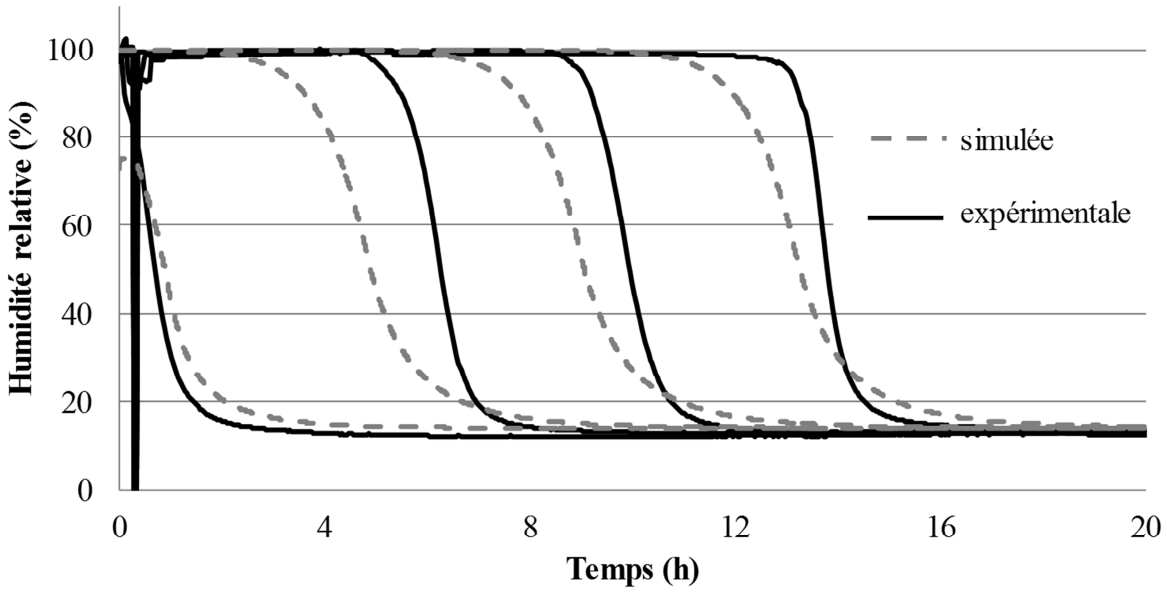


Figure 95 : Evolution de l'humidité relative au niveau des quatre positions de mesure le long du lit fixe pour une vitesse d'air élevée

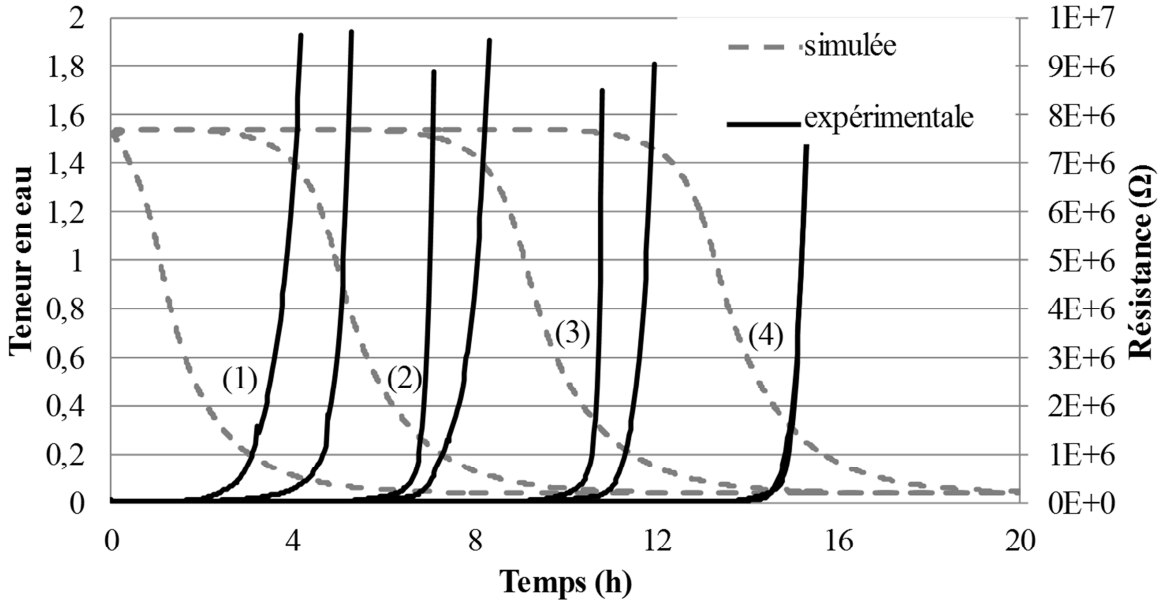


Figure 96 : Suivi expérimental et numérique de la teneur en eau du bois pour une vitesse d'air élevée

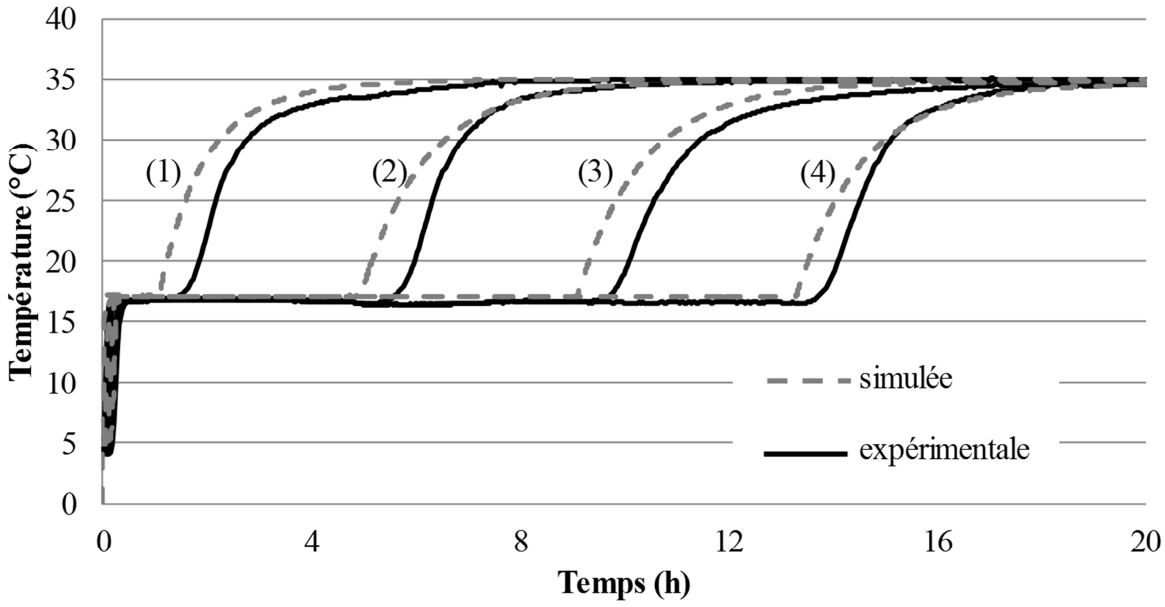


Figure 97 : Evolution de la température du bois au niveau des quatre positions de mesure le long du lit fixe pour une vitesse d'air élevée

Les quatre graphiques présentés dans ce paragraphe montrent qu'une similitude des allures des courbes n'engendre pas automatiquement une parfaite superposition des résultats expérimentaux et numériques. En effet, le modèle prédit un début de séchage plus précoce associé à un front de séchage moins marqué et à une fin de séchage qui « traine ».

Cette observation ne remet pas en cause la validité du modèle mais met en évidence la complexité de la détermination de la valeur des paramètres du modèle. D'une part, la fin de séchage qui « traine » souligne l'importance de la précision de l'activité de surface et met en exergue la difficulté à identifier

cette fonction à faible teneur en eau du bois. D'autre part, concernant les coefficients de transferts externes, il existe dans la littérature une importante diversité de formules permettant d'accéder à leurs valeurs (Whitaker, 1972 ; Pang, 1996 ; Basirat-Tabrizi *et al.*, 2002 ; Nganhou, 2004) et il n'est pas toujours aisé de discerner la plus pertinente. En outre, elles font intervenir des paramètres qui ne sont pas toujours faciles à évaluer :

- longueur caractéristique et sphéricité (dans le cas où il existe une importante diversité de géométrie de particules),
- vitesse d'air à la surface de la particule (qui dépend notamment de la tortuosité des interstices au sein du lit fixe),
- etc.

Pour utiliser le modèle global comme outil d'aide à la conception et à l'optimisation de séchoirs industriels, il sera préalablement nécessaire d'identifier les valeurs des coefficients de transferts externes le long du réacteur.

À part pour des particules de bois isolées, cette identification n'a pas été menée dans le cadre de ce doctorat. Dans la suite de ce manuscrit, les valeurs des coefficients utilisés sont à nouveau calculées à partir de la formule de Nganhou (Equation 3.74).

Conclusion du chapitre 3

En couplant les études théorique et expérimentale du séchage d'un lit fixe de particules, nous avons été en mesure de développer un modèle global performant tant du point de vue prédictif qu'interactif. D'une part, les simulations sont en accord avec les cinétiques de séchage obtenues au moyen du second dispositif expérimental original, mis au point lors de ce doctorat, et ce pour des configurations aérauliques variées. D'autre part, la mise en œuvre du modèle de Van Meel étendu à l'échelle de la particule permet de conserver un temps de calcul réduit malgré le nombre important de plaquettes forestières mis en jeu simultanément : moins de dix secondes sont nécessaires à la simulation de vingt heures de séchage pour le lit fixe de particules pris comme exemple dans ce chapitre, soit 16 000 plaquettes environ, avec un ordinateur de bureau (Microprocesseur Intel de 2,66 GHz).

Par ailleurs, la structure double-échelle permet de conférer une identité propre à chaque particule. Le modèle tient bel et bien compte de la variabilité naturelle du bois. Nous pouvons donc dès lors prédire la réduction de l'hétérogénéité de la teneur en eau du bois au cours du séchage. Or cette hétérogénéité est un paramètre tout aussi important que la teneur en eau moyenne pour la mise en œuvre de la biomasse dans des procédés de conversion thermochimique de plus en plus exigeants vis-à-vis de la matière première.

Chapitre 4 : Utilisation du nouvel outil numérique pour la conception ou l'optimisation de séchoirs industriels

Introduction du chapitre 4

Le potentiel prédictif du modèle global étant démontré, il peut être utilisé comme outil numérique d'aide à la conception et à l'optimisation de séchoirs à lit condensé. La prise en compte des échanges au niveau de la paroi sera, par exemple, un avantage significatif pour identifier les solutions techniques pertinentes en vue de l'amélioration de la performance énergétique de l'installation industrielle.

Dans la suite de ce chapitre, nous allons donc démontrer l'utilité du modèle global à travers deux exemples fictifs mais néanmoins pertinents. D'une part, nous chercherons à optimiser le fonctionnement d'un séchoir en lit fixe mobile. D'autre part, nous identifierons les solutions techniques à retenir pour la construction d'un nouveau séchoir tunnel. Pour ce faire, il s'agira d'identifier le meilleur compromis entre (*i*) qualité du produit (valeur moyenne et hétérogénéité de la teneur en eau), (*ii*) flux matière et (*iii*) performance énergétique du séchoir.

Remarque : chacun des exemples étant fictif, les caractéristiques de l'air, des particules, du lit et du séchoir sont choisies arbitrairement, en s'attachant néanmoins à ce qu'elles soient réalistes.

I : Aide à l'optimisation, exemple d'un séchoir à lit fixe mobile

L'entreprise étudiée désire produire une tonne par heure (débit à l'état anhydre) de bois dont la teneur en eau moyenne est inférieure à 20 %. En outre, l'hétérogénéité de cette valeur doit être inférieure à 10 %.

Après avoir été récoltée et broyée, la biomasse forestière est séchée en tas à l'air libre. Au bout de quelques semaines, sa teneur en eau atteint une moyenne de 60 % pour un écart type de 5 %. Le processus est alors achevé par séchage industriel. Pour ce faire, l'entreprise dispose d'une source d'air chaud issue d'une installation industrielle annexe.

Pour l'heure, la chaine de production ne permet pas d'atteindre les objectifs précédemment énoncés : en sortie du séchoir, la teneur en eau moyenne est d'environ 40 %.

Grâce à notre modèle, nous devons donc identifier les solutions techniques permettant d'améliorer la qualité du séchage tout en respectant le flux matière désiré ou, tout du moins, en l'impactant au minimum.

I-1 : Description du système

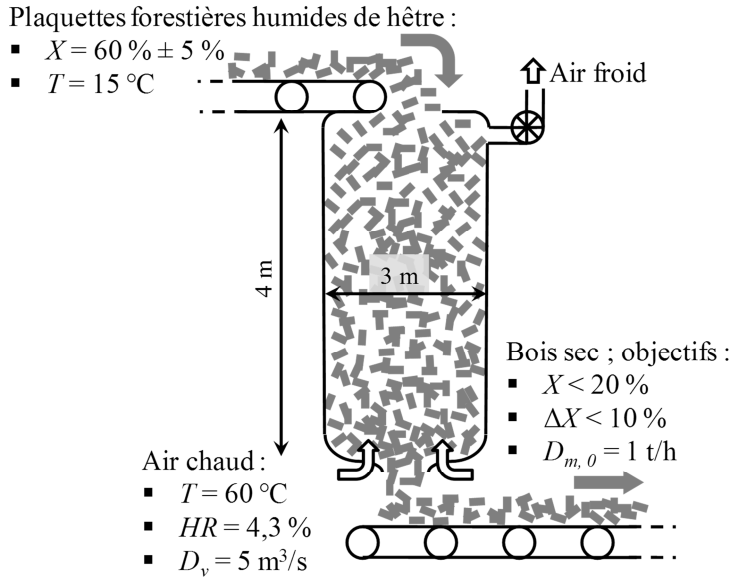


Figure 98 : Description schématique du séchoir à lit fixe mobile utilisé

I-1-1 : Séchoir et lit

Le séchoir utilisé est de type *lit fixe mobile* (Figure 98). Il est constitué d'une tour circulaire verticale de 4 m de haut pour 3 m de diamètre. Le bois circule verticalement de haut en bas tandis que l'air le traverse de bas en haut : il s'agit d'une configuration à contre-courant. Nous considérons que les dimensions et la configuration aéraulique ne peuvent être modifiées.

Compte tenu de l'unicité des points d'injection et d'échappement des gaz, le séchoir ne comporte qu'un seul module et donc un seul méta-module. Afin de permettre la discrétisation des équations de conservation sur l'écoulement d'air, la tour est divisée, dans sa hauteur, en 100 CV.

La paroi est constituée d'une simple tôle d'acier dont les caractéristiques sont les suivantes :

e (cm)	ρ (kg.m^{-3})	λ (W.m^{-1}.K^{-1})	c_P (J.kg^{-1}.K^{-1})
1	7500	45	450

Tableau 19 : Caractéristiques de la paroi de la tour de séchage

Les conditions climatiques environnantes sont constantes. L'air est à une température de 15 °C et présente une humidité relative de 50 %. En outre, le coefficient de transfert externe de chaleur a pour valeur 8 W.m^{-2}.K^{-1}.

I-1-2 : Source de chaleur

Le séchoir exploite l'énergie fatale d'une installation annexe. Nous disposons donc d'une source de chaleur de 5 m^3.s^{-1} à une température de 60 °C et à une humidité relative de 4,3 %. Ainsi, l'humidité absolue de cet air est la même que celle de l'air extérieur : 0,53 %. Le débit volumique est le seul paramètre de la source de chaleur qui puisse être modulé. Cependant, ceci ne présente aucun intérêt puisque même en utilisant l'intégralité de la chaleur disponible, la teneur en eau objectif n'est pas atteinte. L'opérateur doit donc moduler des paramètres autres que ceux de l'air pour optimiser le séchage.

I-1-3 : Matériel végétal

Le bois à sécher se présente sous forme de plaquettes forestières grossières. Elles sont issues du broyage de billons de hêtre. Les plaquettes sont considérées de géométrie parallélépipédique rectangle. Les caractéristiques de cette biomasse forestière sont disponibles dans le tableau suivant :

Paramètre	Moyenne	Ecart type
Longueur	60 mm	6 mm
Largeur	40 mm	4 mm
Epaisseur	20 mm	2 mm
Densité	550 kg.m^{-3}	/
Teneur en eau	60 %	5 %
Température	15 °C	/
Porosité du lit	0,60	/

Tableau 20 : Caractéristiques des plaquettes forestières de hêtre à sécher

À partir de la géométrie du séchoir, de la porosité du lit de particules et de la densité du bois, il nous est possible de calculer la vitesse de lit correspondant au débit désiré. La valeur obtenue est de 0,64 m.h^{-1}. De même, à partir de la géométrie du séchoir et de la porosité du lit de particules, nous pouvons déduire une vitesse verticale d'air de 1,18 m.s^{-1}. Ceci nous permet de calculer les valeurs des coefficients de transferts externes à partir des Equations 3.72 à 3.75 et 2.28 :

- h_c = 49 W.m^{-2}.K^{-1},
- h_m = 0,046 m.s^{-1}.

Nous disposons alors de tous les éléments pour obtenir une cinétique de séchage grâce à *TransPore*, ce qui nous permet ensuite d'identifier les paramètres de l'activité de surface adimensionnelle (selon la méthode décrite dans le Chapitre 2) :

Paramètre	Valeur
Xcr	103 %
A	5,79
B	-4,25
C	7,82
D	-15,1

Tableau 21 : Paramètres du modèle identifiés pour une plaquette forestière de hêtre grossière (60×40×20 mm)

I-2 : Simulation du séchage dans la configuration non optimisée

À partir de la description précédente, nous sommes en mesure de modéliser le système et de simuler le séchage dans la configuration non-optimisée.

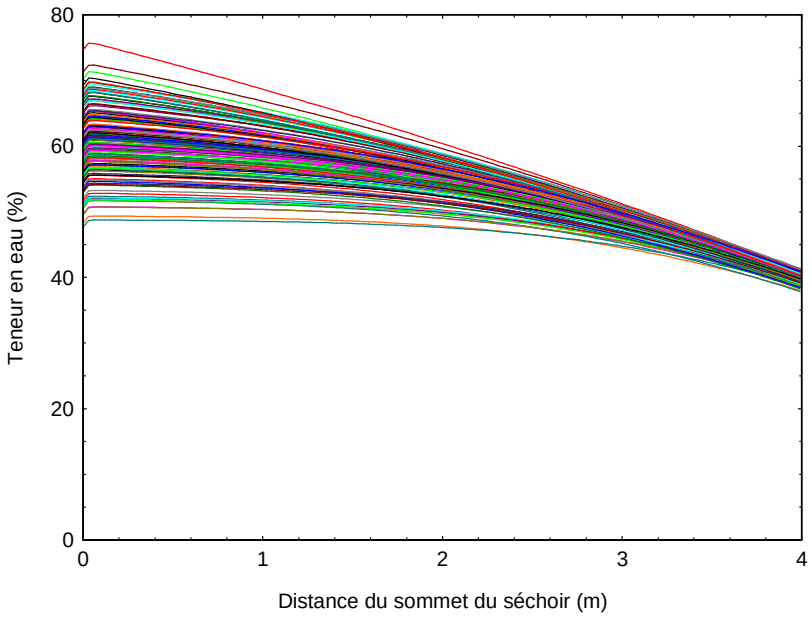


Figure 99 : Evolution de la teneur en eau simulée pour la configuration initiale

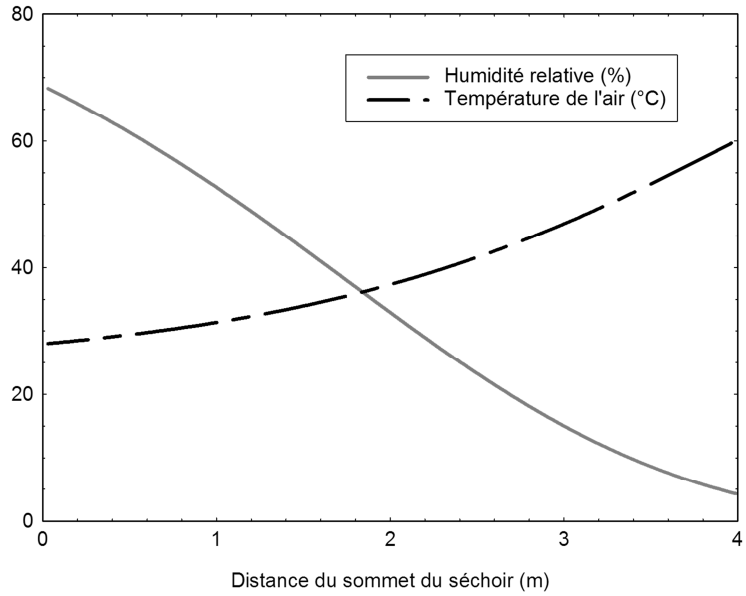


Figure 100 : Profil des conditions climatiques simulées pour la configuration initiale

Les particules froides (15 °C) pénètrent au sommet du séchoir. Elles sont alors en contact avec de l'air refroidi et chargé en humidité (Figure 100). Nous observons donc un phénomène de condensation à la surface des particules (Figure 99). Cette condensation, qui peut expliquer un retard du séchage, n'aurait pas pu être simulée sans l'extension du modèle de Van Meel.

Puis, le long du séchoir, la teneur en eau décroît lentement pour atteindre une valeur moyenne de 40 %, soit le double de la teneur en eau objectif (Figure 99). En revanche, l'hétérogénéité de teneur en eau finale est proche de 5 %. De ce point de vue, la qualité du séchage est suffisante. Cette hétérogénéité ne sera donc pas le paramètre déterminant pour l'optimisation du séchage.

Remarque : L'hétérogénéité de teneur en eau finale correspond à la différence entre les teneurs en eau extrêmes en sortie du séchoir.

I-3 : Recherche par le modèle des solutions techniques à retenir pour l'optimisation du séchoir existant

I-3-1 : Réduction de la vitesse du lit

La première piste explorée est la réduction de la vitesse du lit. Au cours de simulations successives nous faisons varier la vitesse verticale du bois jusqu'à identifier l'optimum. Cet optimum correspond à la situation où la teneur en eau finale est égale à 20 %. En effet, toute diminution supplémentaire de ce paramètre résulte d'une réduction accrue de la vitesse du lit de particules et donc du flux matière.

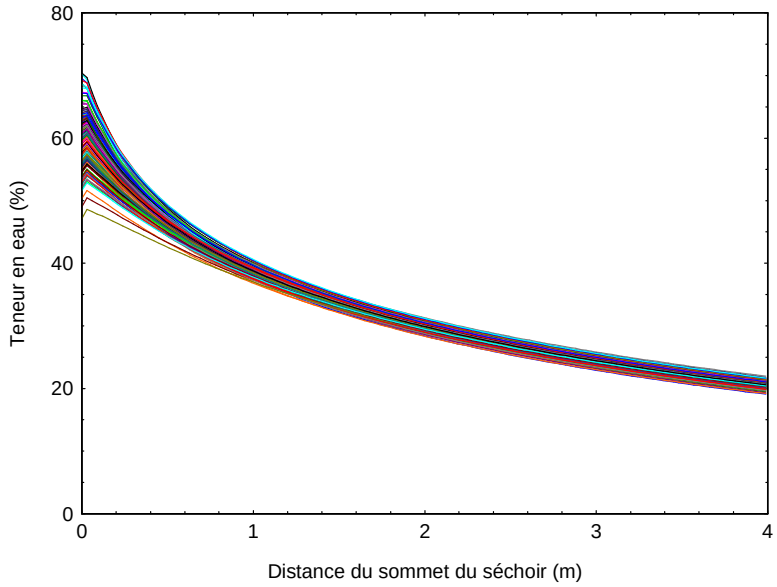


Figure 101 : Evolution de la teneur en eau simulée pour une vitesse de lit égale à 0,21 m.h^{-1}

Avec une vitesse du lit de particules égale à 0,21 m.h^{-1}, nous obtenons une biomasse ayant une teneur en eau égale moyenne à 20 % en sortie du séchoir (Figure 101). En outre, la dispersion des valeurs de ce paramètre est d'environ 3 %. Cette configuration permet donc d'atteindre les objectifs qualitatifs.

Cependant, comme nous pouvions nous y attendre, la solution n'est pas convenable du point de vue quantitatif : le débit massique de bois sec traité, 330 kg.h^{-1}, correspond de ce fait au tiers des besoins de l'entreprise.

Nous devons donc explorer d'autres pistes d'optimisation pour augmenter le débit de bois tout en conservant la qualité obtenue ici.

I-3-2 : Isolation de l'enveloppe du séchoir

Tout au long du séchoir, de l'énergie est dissipée à travers la paroi du réacteur vers l'extérieur. Cette quantité d'énergie perdue, d'autant plus importante que la paroi est fine et conductrice de chaleur (Equation 3.42), n'est donc pas utile au séchage du bois : elle participe au refroidissement de la masse d'air et conduit à réduire l'écart psychométrique par l'intermédiaire de la pression de vapeur saturante. En outre, la paroi devient un point froid au niveau duquel la vapeur d'eau peut se condenser. Certes cette condensation permet de restaurer, en partie, le pouvoir évaporatoire de l'air mais la quantité d'eau liquide obtenue correspond à autant de vapeur qui ne peut être évacuée dans la masse d'air. En effet, dans le cas d'une tour de séchage, ce condensat ne peut pas en réalité être évacué et contribue à

réhumidifier les plaquettes situées à proximité de la paroi. Ceci constitue une limite de la version actuelle du modèle global qui considère que l'eau condensée au niveau de la paroi est évacuée.

Dans la configuration initiale, le choix de la paroi en acier d'un centimètre d'épaisseur est particulièrement défavorable à la prévention des pertes thermiques. Nous décidons donc d'isoler thermiquement l'enveloppe du séchoir par apposition d'une épaisseur de 110 mm de laine de verre au niveau de sa face extérieure (Tableau 22).

Acier		Laine de verre		Monocouche équivalente	
e (mm)	10	e (mm)	110	e (mm)	120
λ (W.m^{-1}.K^{-1})	45	λ (W.m^{-1}.K^{-1})	0,039	λ (W.m^{-1}.K^{-1})	0,043
ρ (kg.m^{-3})	7500	ρ (kg.m^{-3})	35	$\rho \times c_P$ (J.m^{-3}.K^{-1})	314×10^3
c_P (J.kg^{-1}.K^{-1})	450	c_P (J.kg^{-1}.K^{-1})	1030		

Tableau 22 : Calcul des caractéristiques de la monocouche équivalente à l'enveloppe du séchoir à optimiser, à partir des Equations 3.33, 3.34 et 3.35

Remarque : rigoureusement, la monocouche équivalente ne peut être définie que pour une paroi multicouche symétrique ; dans le cadre des deux études de cas proposées dans ce chapitre, nous prenons la liberté d'appliquer ce principe à des parois multicouches asymétriques.

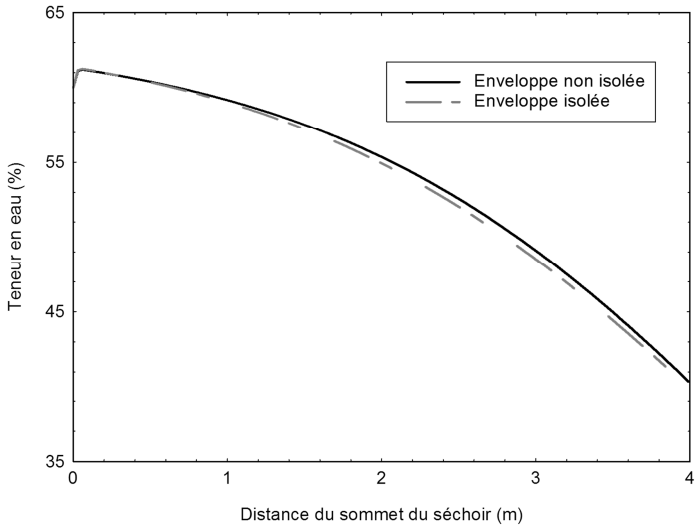


Figure 102 : Simulation du bénéfice de l'isolation de la paroi du séchoir sur la cinétique de séchage

Paroi	X en sortie (%)	Air en sortie		Rendement (%)	Efficacité (kg.kWh^{-1})	Déperditions thermiques (%)
		T (°C)	HR (%)			
Non isolée	40,3	27,1	69,3	55,7	0,80	2,64
Isolée	39,9	27,7	67,8	56,8	0,82	0,14

Tableau 23 : Impact de l'isolation de la paroi sur le bilan énergétique du séchoir

Par simulation, nous pouvons prédire le bénéfice de la mise en œuvre de la laine de verre sur la teneur en eau finale (Figure 102 et Tableau 23). Ici, la configuration (non isolée) est la configuration initiale pour laquelle la vitesse du lit, 0,64 m.h^{-1}, correspond à un débit de bois traité d'une tonne par heure.

L'isolement du séchoir a un impact sur la cinétique de séchage mais celui-ci demeure à peine perceptible (Figure 102). La réduction de la teneur en eau finale est inférieure à 0,5 % pour la configuration initiale. À la suite de l'isolation, le nouvel optimum de vitesse peut être identifié selon la méthode décrite dans le paragraphe précédent. Elle demeure égale à 0,21 m.h^{-1} : bien qu'égal à 0,01 m.h^{-1}, l'incrément de vitesse utilisé pour l'identification du flux matière optimal est trop important pour apprécier le bénéfice de l'isolation.

En revanche, le Tableau 23 nous permet de mettre en évidence un impact limité mais néanmoins non négligeable de l'isolation de l'enveloppe sur l'efficacité du séchoir. Les déperditions, par rapport au débit de chaleur injecté, sont réduites de 2,5 points pour atteindre la valeur très faible de 0,14 %. Cette isolation s'accompagne d'une augmentation d'environ 2 % du rendement énergétique et de l'efficacité du séchoir. Le rendement énergétique est défini par le rapport entre l'énergie utile à l'évaporation de

l'eau et de l'énergie de la source de chaleur. L'efficacité, quant à elle, correspond à la masse d'eau évaporée par unité d'énergie fournie au système.

En résumé, l'isolation thermique de la tour de séchage ne permet donc qu'un gain limité sur la teneur en eau final du bois. Dans le cas présent, elle ne peut donc pas être considérée comme une solution technique pertinente visant à améliorer la qualité du séchage. Cependant, cette isolation ne doit pas être négligée du point de vue des performances énergétiques de l'installation. En effet, la tendance actuelle est à la rationalisation de l'énergie. Ceci permet, d'une part, de démontrer la réduction de l'empreinte carbone des produits (grâce aux analyses de cycle de vie). D'autre part, il est utile de se souvenir que l'énergie peut représenter jusqu'à 70 % du coût du cycle de vie d'un séchoir convectif (Mujumdar, 2007). Dès lors, le retour sur investissement de l'isolation thermique du séchoir apparaît évident. Cette amélioration sera donc mise en œuvre pour les configurations suivantes.

I-3-3 : Influence du calibre des particules

L'analyse de la Figure 100 montre qu'en sortie du séchoir, l'air n'est pas totalement saturé. Le potentiel évaporatoire du fluide n'est donc pas totalement exploité. La résistance aux transferts internes au sein des plaquettes grossières semble limiter la vitesse de séchage. Pour tester cette hypothèse nous décidons d'étudier le séchage de plaquettes forestières de taille réduite : 20×20×5 mm. Nous considérons que cette réduction de granulométrie ne s'accompagne pas d'une modification de la macroporosité du lit de particules. Comme pour le paragraphe I-1-3 de ce même chapitre, nous sommes en mesure de déterminer les valeurs des coefficients de transferts externes et des paramètres de l'activité adimensionnelle. Ces valeurs sont reportées dans le tableau suivant :

Paramètre	Valeur
h_c	75 $W.m^{-2}.K^{-1}$
h_m	0,069 $m.s^{-1}$
Xcr	107 %
A	5,93
B	-3,80
C	9,21
D	-15,8

Tableau 24 : Paramètres du modèle identifiés pour une plaquette forestière de hêtre finement broyée (20×20×5 mm)

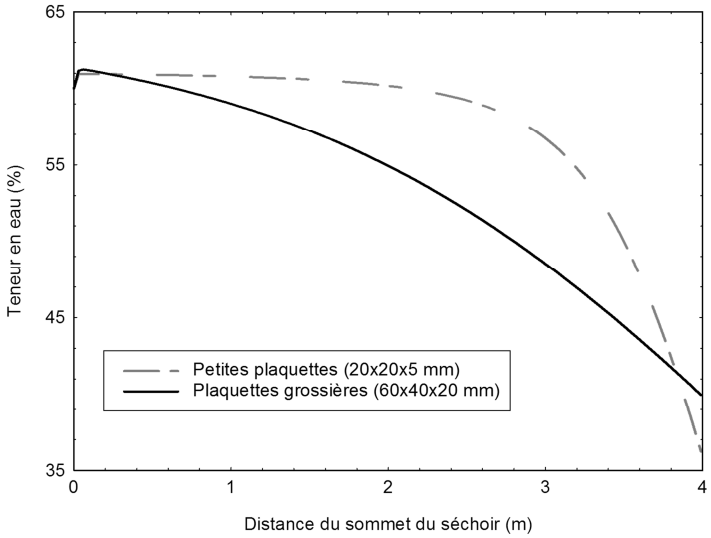


Figure 103 : Simulation du bénéfice de la réduction de calibre des plaquettes forestières sur la cinétique de séchage

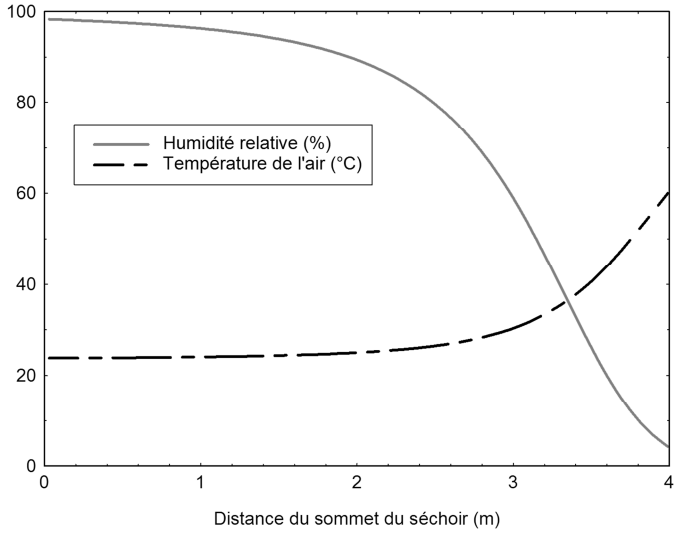


Figure 104 : Profil des conditions climatiques simulées lors du séchage d'un lit de petites plaquettes forestières circulant à une vitesse de 0,64 m.h^{-1}

La cinétique de séchage prédite par le modèle global pour ces petites plaquettes forestières est très différente de celle obtenue pour les plaquettes grossières (Figure 103). Au sommet du séchoir, nous pouvons à nouveau observer une condensation de vapeur à la surface des particules. L'intensité de ce phénomène est alors moindre que pour les plaquettes grossières car l'échauffement plus rapide des petites plaquettes en réduit la durée. Puis la teneur en eau diminue très lentement dans les deux premiers mètres de la tour. Ceci résulte de la présence d'un air devenu froid et proche de la saturation en vapeur au contact des particules de bois (Figure 104). Dans la seconde moitié du séchoir, la vitesse de séchage augmente fortement (Figure 103). La rupture brutale de pente observée sur cette courbe de teneur en eau du bois va de pair avec un front de séchage marqué (Figure 104). La géométrie initiale des plaquettes imposait, quant à elle, un profil de conditions climatiques à travers le lit beaucoup plus plat (Figure 100). En fin de séchage, la teneur en eau du bois atteint une valeur d'environ 36 %, soit 4

points de mieux que pour les plaquettes grossières. L'intensité de l'évaporation d'eau dans cette partie du séchoir explique donc que l'air soit très chargé en humidité dans la partie haute.

Dans cette configuration, le potentiel évaporatoire de l'air est très bien exploité puisque le gaz sort du séchoir dans un état proche de la saturation en vapeur. En revanche, la teneur en eau moyenne est toujours éloignée de l'objectif à atteindre. En effet, l'efficacité énergétique accrue du séchoir n'est pas garante d'un séchage de qualité, loin s'en faut. De ce constat, nous pouvons tirer la conclusion que la source de chaleur imposée et les objectifs (qualitatifs et quantitatifs conjugués) ne sont pas compatibles.

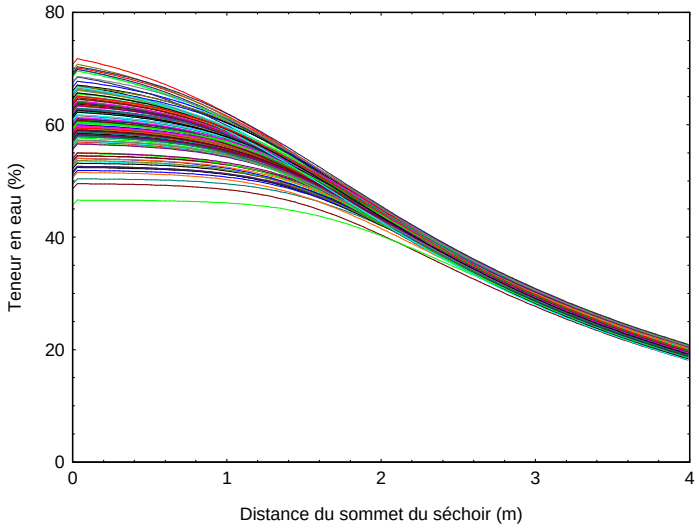


Figure 105 : Evolution de la teneur en eau des petites plaquettes simulée pour une vitesse de lit égale à 0,40 m.h^{-1}

Pour atteindre les objectifs qualitatifs, la vitesse du lit doit être réduite à 0,40 m.h^{-1} (Figure 105). Le flux matière objectif (1 t.h^{-1}) n'est pas atteint, il chute à 620 kg.h^{-1}. Néanmoins, il est à comparer au flux matière de 330 kg.h^{-1} obtenu pour les plaquettes grossières (Tableau 25). Dans ce cas la vitesse de séchage est contrôlée par la résistance aux transferts internes, ce qui ne permet pas d'exploiter l'intégralité du potentiel évaporatoire de l'air : l'air en sortie est chaud (T = 41,4 °C) et loin de la saturation (HR =24, 6 %). Il n'est alors pas surprenant que ce système ouvert (pas de recyclage d'air) présente un rendement énergétique dramatiquement bas (37,5 %).

Plaquettes	Rendement matière (kg.h^{-1})	X en sortie (%)	Air en sortie		Rendement (%)	Efficacité (kg.kWh^{-1})
			T (°C)	HR (%)		
Grossières	1000	39,9	27,7	67,8	56,8	0,82
	330	20,1	41,4	24,6	37,5	0,54
Fines	1000	36,2	23,3	98,8	67,1	0,97
	620	20,0	24,9	92,5	70,6	1,02

Tableau 25 : Résumé des aspects qualitatifs, quantitatifs et énergétiques des configurations étudiées

La réduction du calibre est donc une solution simple et efficace d'optimisation du séchoir en question. En revanche, avant de mettre en œuvre cette solution, l'entreprise devra évidemment s'assurer que la granulométrie obtenue est compatible avec les usages avals de cette biomasse. En outre, le coût différentiel de ce broyage en petite plaquettes devra être évalué *ex ante*.

Remarque : dans le Tableau 25, nous pouvons nous étonner de voir l'efficacité énergétique du séchoir augmenter quand le flux matière diminue lorsque les particules séchées sont de petites dimensions alors que l'inverse se produit avec les particules de grandes dimensions. En effet, l'eau résiduelle est d'autant plus difficile à évaporer que la teneur en eau est faible, ce qui est conforme avec les observations concernant les particules de grandes tailles. Dans ce cas, la vitesse de séchage est commandée par les transferts internes et non limitée par le pouvoir évaporatoire de l'air. Or, lors du séchage des petites particules, le comportement opposé est observé : l'air sort du séchoir proche de la saturation. Ainsi, les particules froides introduites massivement (1 $t.h^{-1}$) provoquent un refroidissement important de l'air et donc une diminution de son potentiel évaporatoire. Dans une certaine mesure, il n'est pas absurde de voir la réduction du flux matière aller de pair avec une augmentation énergétique de l'installation.

I-3-4 : Source de chaleur additionnelle

Nous avons pu montrer précédemment que la source de chaleur est sous-dimensionnée pour pouvoir réduire la teneur en eau de 60 % à 20 % d'une tonne de bois (base sèche) par heure. Pour atteindre ce flux matière objectif, la mise en œuvre d'une source de chaleur propre additionnelle devient indispensable. Le modèle global permet alors d'évaluer la puissance requise. Deux paramètres de la source de chaleur peuvent être ajustés : le débit d'air chaud et sa température. L'élévation de température n'est ici pas envisagée car l'introduction d'air particulièrement chaud et sec à la base du séchoir représenterait un danger pour la sécurité de l'installation. En effet, le point d'injection coïncide avec la zone où les particules sont les plus sèches, ce qui pourrait provoquer une auto-inflammation des fines. Seul le débit d'air sera donc augmenté.

Pour sécher un lit constitué de petites plaquettes forestières, nous décidons d'augmenter le débit d'air chaud sans modifier sa température. Ce débit doit atteindre la valeur de 8,3 $m^3.s^{-1}$ (h_c = 102 $W.m^{-2}.K^{-1}$; h_m = 0,094 $m.s^{-1}$), soit 3,3 $m^3.s^{-1}$ supplémentaires, pour être en mesure de répondre à toutes les exigences du cahier des charges ; la puissance additionnelle correspondante est de 160 kW.

Si les utilisations avales de la biomasse sont incompatibles avec un broyage fin, une stratégie différente doit être adoptée. En effet, même un doublement du débit initial (10 $m^3.s^{-1}$) ne permet de produire que 1$t.h^{-1}$ de bois à 25 % de teneur en eau : à cette température de 60 °C, la géométrie et les dimensions des particules grossières ne favorisent pas l'efficacité des transferts internes. Ainsi, pour les accélérer, nous décidons d'augmenter la température de l'air chaud. En maintenant le débit d'air à 8,3 $m^3.s^{-1}$, la température doit atteindre 83 °C pour garantir la qualité du produit en sortie du séchoir (h_c = 66 $W.m^{-2}.K^{-1}$; h_m = 0,067 $m.s^{-1}$). La puissance de chauffe additionnelle est alors de 327 kW.

Que ce soit par la détermination de la puissance de la source de chaleur additionnelle nécessaire ou par le calcul de la consommation énergétique spécifique de chaque configuration, le modèle développé se révèle être un outil puissant pour l'optimisation de séchoirs existants.

II : Aide à la conception, exemple d'un séchoir à lit entrainé

L'entreprise étudiée souhaite produire 450 $kg.h^{-1}$ (base sèche) de bois bûche destiné à la production de charbon de bois (problème fréquent au Brésil). Avant la carbonisation, la moyenne et l'hétérogénéité de la teneur en eau du bois doivent être inférieures à respectivement 15 % et 10 %.

Disposant d'une ressource pérenne en biomasse forestière, l'entreprise souhaite construire un séchoir industriel pour traiter cette matière première humide. Afin de limiter les coûts d'exploitation, le séchoir sera couplé à une source d'air chaud issue d'une installation industrielle annexe.

En utilisant le modèle global, nous devons donc identifier une géométrie et une configuration aéraulique pertinente du séchoir à construire.

II-1 : Description du système

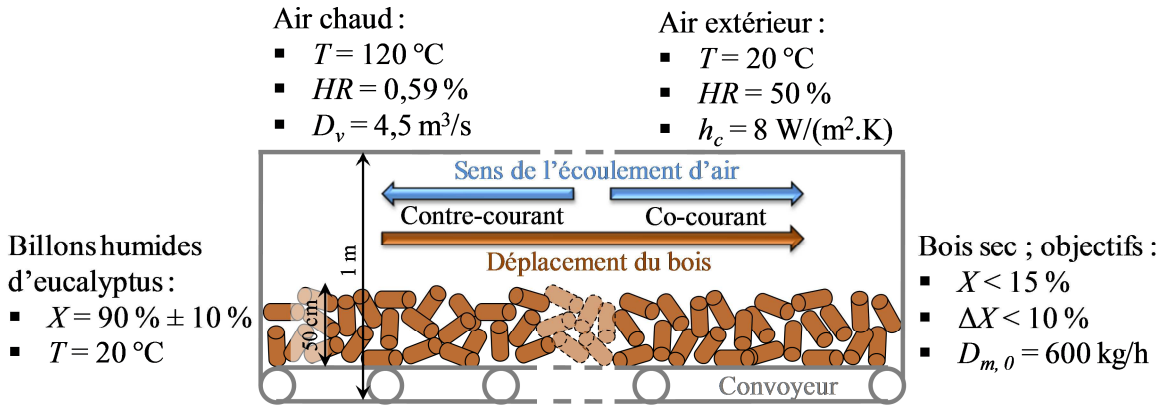


Figure 106 : Description schématique du séchoir tunnel utilisé

II-1-1 : Source de chaleur

Grâce à l'énergie fatale d'une industrie voisine, de l'air ambiant, initialement à 20 °C et 50 % d'humidité relative, est chauffé à 120 °C (*HR* = 0,59 %). Ainsi, 4,5 $m^3.s^{-1}$ d'air chaud sont constamment injectés dans le séchoir.

II-1-2 : Matériel végétal

La géométrie des bûches à sécher est unique : il s'agit de petits billons non fendus issus d'une plantation d'eucalyptus traitée en TCR. Ces billons sont considérés parfaitement cylindriques. Les caractéristiques de cette biomasse forestière sont disponibles dans le tableau suivant :

Paramètre	Moyenne	Ecart type
Longueur	300 mm	20 mm
Diamètre	85 mm	5 mm
Densité	600 $kg.m^{-3}$	/
Teneur en eau	90 %	10 %
Température	20 °C	/
Porosité du lit	2/3	/

Tableau 26 : Caractéristiques des billons d'eucalyptus à sécher

Les paramètres de l'activité de surface adimensionnelle sont ceux identifiés à partir de la cinétique expérimentale obtenue lors du séchage à 120 °C d'un billon d'eucalyptus de géométrie similaire (Tableau 13).

II-1-3 : Séchoir et lit

Compte tenu de la taille importante des particules, l'utilisation d'un séchoir tunnel est retenue. Les billons d'eucalyptus seront disposés en lit mince (50 cm d'épaisseur) sur un tapis roulant (Figure 106).

La section du tunnel est prédéfinie. Une largeur de trois mètres permet de compenser la faible épaisseur du lit. Le lit occupe toute la largeur du tunnel et est donc également large de trois mètre. Une hauteur intérieure d'un mètre est choisie pour accueillir le lit et le système de convoyage. La réduction de l'espace entre le lit et le plafond du séchoir permettrait d'accroître l'efficacité du séchoir. Cependant, cette solution n'est pas envisagée car l'entreprise veut se prémunir de tout phénomène de bourrage qui provoquerait une baisse de la productivité.

L'enveloppe est constituée d'une paroi intérieure de béton et d'une isolation extérieure en laine de verre dont les caractéristiques sont les suivantes :

Béton		**Laine de verre**		**Monocouche équivalente**	
e **(mm)**	200	e **(mm)**	100	e **(mm)**	300
λ **(W.m^{-1}.K^{-1})**	1,65	λ **(W.m^{-1}.K^{-1})**	0,039	λ **(W.m^{-1}.K^{-1})**	0,112
ρ **(kg.m^{-3})**	2150	ρ **(kg.m^{-3})**	35	$\rho \times c_P$ **(J.m^{-3}.K^{-1})**	$1{,}46\times10^{6}$
c_P **(J.kg^{-1}.K^{-1})**	1008	c_P **(J.kg^{-1}.K^{-1})**	1030		

Tableau 27 : Calcul des caractéristiques de la monocouche équivalente à l'enveloppe du séchoir à concevoir, à partir des Equations 3.33, 3.34 et 3.35

À partir de la géométrie du séchoir, de la porosité du lit de particules et de la densité du bois, il est possible de calculer la vitesse de lit correspondant au débit objectif. La valeur obtenue est de 1,5 m.h^{-1}.

De même, à partir de la géométrie du séchoir et de la porosité du lit de particules, nous pouvons déduire une vitesse d'air selon l'axe ($0x$) de 1,8 m.s^{-1}. Celle-ci permet de calculer les valeurs des coefficients de transferts externes à partir des Equations 3.72 à 3.75 et 2.28 :

- h_c = 29 W.m^{-2}.K^{-1},
- h_m = 0,032 m.s^{-1}.

Afin de permettre la discrétisation des équations de conservation sur l'écoulement d'air, le tunnel est divisé en CV de 25 cm de long.

Remarque : l'exemple fictif traité ici vise à démontrer le potentiel du modèle comme outil d'aide à la conception. Ainsi, conscients qu'il existe probablement dans la littérature des formules de calcul du coefficient de transferts externe de chaleur plus adaptées au cas du séchoir tunnel que celle proposée par Nganhou, nous décidons pour autant de ne pas remettre en cause ici ce choix. La formule pourra être affinée lors de travaux ultérieurs sans invalider l'utilité du modèle pour concevoir un nouveau séchoir.

II-1-4 : Paramètres ajustables du système

Afin d'explorer l'ensemble du potentiel du modèle global, cet exemple est traité en complément du précédent. La nature de la paroi, le calibre des particules et la quantité de chaleur disponible sont considérés comme adéquats. Seules la géométrie du tunnel et la configuration aéraulique peuvent être modifiées.

II-2 : Recherche par le modèle des solutions techniques à retenir pour la conception du nouveau séchoir

Afin de faciliter la lecture des cinétiques de séchage simulées, le faisceau de courbes (résultant de la variabilité initiale des particules) est réduit à une courbe unique : celle de la particule *type*. Nous pouvons ainsi identifier les paramètres optimaux pour atteindre l'objectif en teneur en eau finale. Pour la meilleure configuration identifiée, ces paramètres seront ensuite éventuellement ajustés si l'hétérogénéité de la teneur en eau est trop élevée.

II-2-1 : Optimisation de la teneur en eau moyenne du lit à la sortie de séchoirs en échappement libre

Il s'agit dans cette partie d'identifier les géométries de séchoir permettant d'atteindre la teneur en eau désirée pour chaque type de configuration aéraulique. La section du tunnel étant fixée, nous n'agissons que sur la longueur de l'installation. Cette longueur doit, autant que possible, être réduite afin de limiter la surface d'implantation et le coût d'investissement (enveloppe, système de convoyage, etc.) ; nous parlons alors de longueur optimisée.

II-2-1-1 : Configurations aérauliques simples

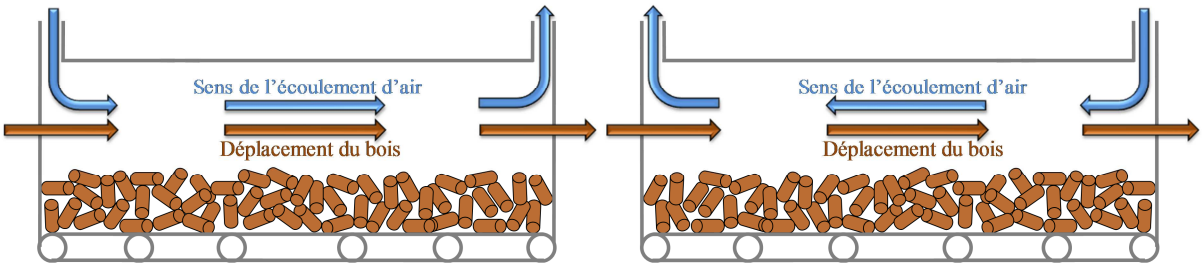


Figure 107 : Configurations aérauliques simples ; co-courant à gauche et contre-courant à droite

Le tunnel ne comporte qu'un point d'injection d'air et un seul point d'échappement, situés aux extrémités du séchoir (Figure 107). Compte tenu de l'unicité de ces points, le séchoir ne comporte qu'un seul module et donc un seul méta-module.

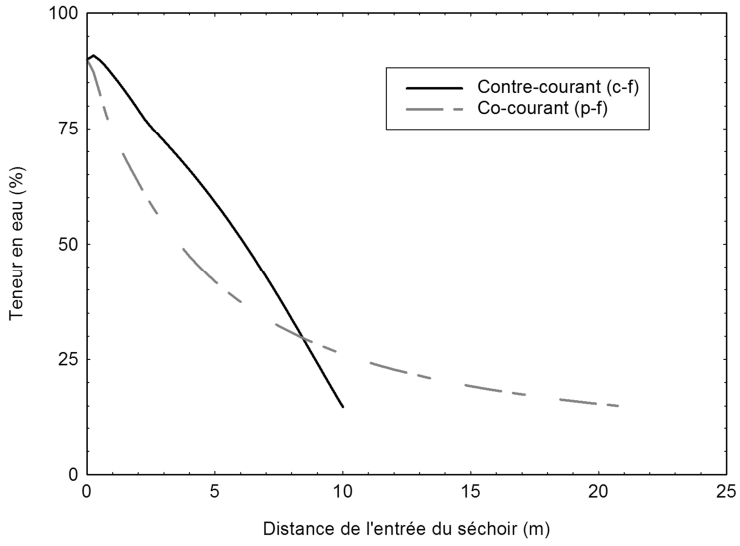


Figure 108 : Evolution simulée de la teneur en eau moyenne du lit le long de séchoirs à configurations aérauliques simples dont les longueurs sont optimisées

La Figure 108 montre que pour l'exemple étudié, la configuration à contre-courant (notée *c-f*) est la plus efficace des configurations aérauliques simples : la longueur optimale de séchoir est alors égale à 10 m contre 20,75 m dans le cas du co-courant (notée *p-f*).

En outre, nous pouvons remarquer que, dans la première partie du séchoir, la vitesse de séchage en co-courant est supérieure à celle en contre-courant. Cette tendance s'inverse dans la seconde partie du séchoir. Ce constat peut-être mis en relation avec les différences fondamentales de profils de conditions climatiques qui caractérisent ces deux configurations aérauliques simples (Tableau 28).

	Paramètre du séchage	Configuration à co-courant	Configuration à contre-courant
Début du tunnel	Température de l'air	Elevée	Basse
	Humidité relative	Basse	Elevée
	Température du bois	Basse	Basse
	Conséquence	**Pas de condensation**	Condensation à la surface des particules
Fin du tunnel	Température de l'air	Basse	Elevée
	Humidité relative	Elevée	Basse
	Température du bois	Elevée	Elevée
	Conséquence	Teneur en eau d'équilibre élevée	**Teneur en eau d'équilibre basse**

Tableau 28 : Influence des conditions climatiques le long du tunnel sur la vitesse de séchage du bois

II-2-1-2 : Configurations aérauliques mixtes

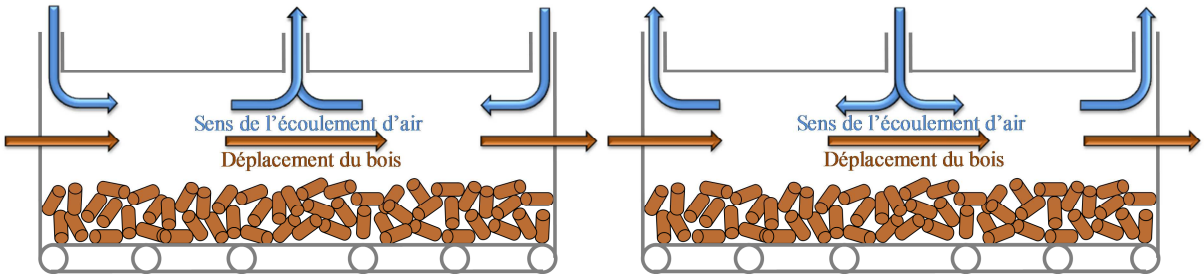


Figure 109 : Configurations aérauliques mixtes ; co-courant puis contre-courant (*p-f* + *c-f*) à gauche et contre-courant puis co-courant (*c-f* + *p-f*) à droite

Au regard des résultats précédents, nous avons l'intuition qu'il est possible de réduire la longueur du séchoir si nous pouvons obtenir une vitesse de séchage élevée tant au début qu'à la fin du tunnel. Pour ce faire, l'air est injecté, à débits égaux, à chaque extrémité du séchoir (Figure 109). L'échappement du gaz s'effectue, quant à lui, au milieu du tunnel (configuration co-courant puis contre-courant, notée *p-f* + *c-f*).

La configuration opposée, notée *c-f* + *p-f*, qui consiste en l'injection centrale de l'air et l'évacuation aux extrémités du tunnel sera également étudiée (Figure 109).

Dans le cas de ces configurations mixtes, le séchoir comporte deux modules correspondant chacun à un méta-module. Du fait de la quantité limitée de chaleur disponible, le doublement du nombre de modules engendre une division par deux des débits massiques d'air sec en leur sein.

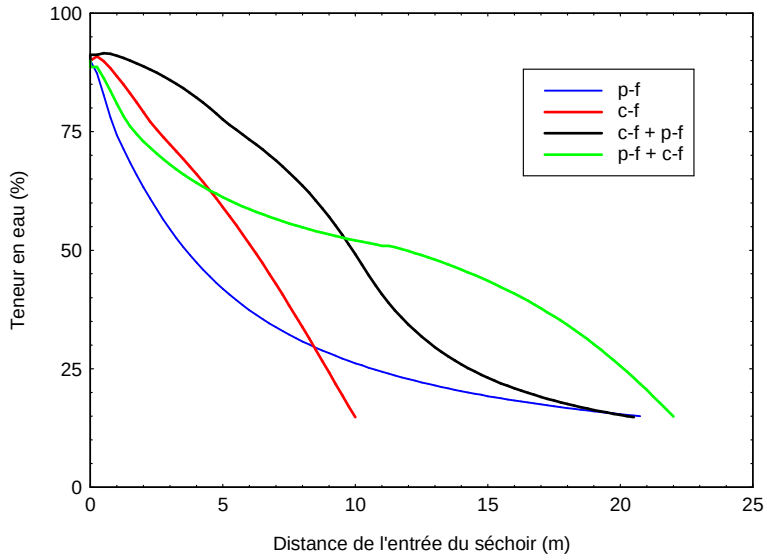


Figure 110 : Evolution simulée de la teneur en eau moyenne du lit le long de séchoirs à configurations aérauliques mixtes dont les longueurs sont optimisées

La Figure 110 montre que le gain escompté n'est pas obtenu. Les longueurs optimisées des configurations *p-f* + *c-f* et *c-f* + *p-f* sont respectivement 22 et 20,5 m. Ces configurations mixtes ne permettent pas de réduire significativement la longueur du séchoir même par rapport à la configuration à co-courant.

En outre, la Figure 110 contredit notre intuition qui nous a conduits à étudier ces configurations mixtes : la configuration *p-f* + *c-f* est moins efficace que celle du type *c-f* + *p-f*.

Nous pouvons néanmoins tenter d'améliorer ces configurations mixtes en ajustant les deux paramètres que sont les longueurs relatives des modules et la répartition du débit d'air chaud dans les modules.

II-2-1-2-a : Ajustement de la longueur relative des modules

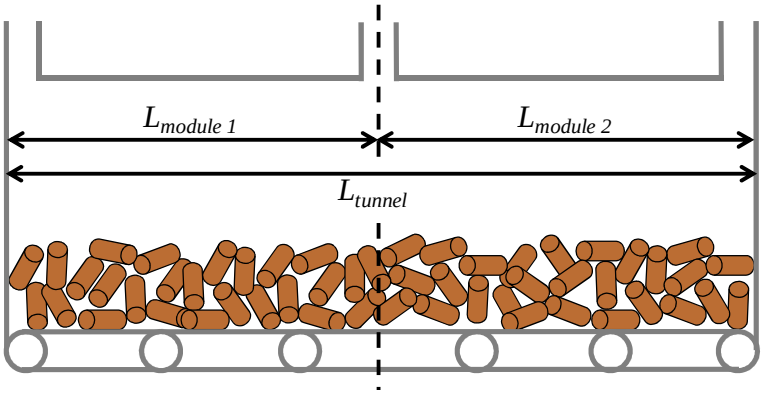


Figure 111 : Définition schématique de la limite des modules d'une configuration aéraulique appliquée à un séchoir tunnel

Le point d'échappement (cas de la configuration *p-f* + *c-f*) ou d'injection d'air (cas de la configuration *c-f* + *p-f*) peut être déplacé le long du tunnel. Nous définissons alors les longueurs relatives des modules comme suit :

$$L^*_{module1} = L_{module1} / L_{tunnel} \quad \text{et} \quad L^*_{module2} = L_{module2} / L_{tunnel} \qquad (4.1 \text{ et } 4.2)$$

Les débits massiques d'air sec demeurent égaux dans les deux modules.

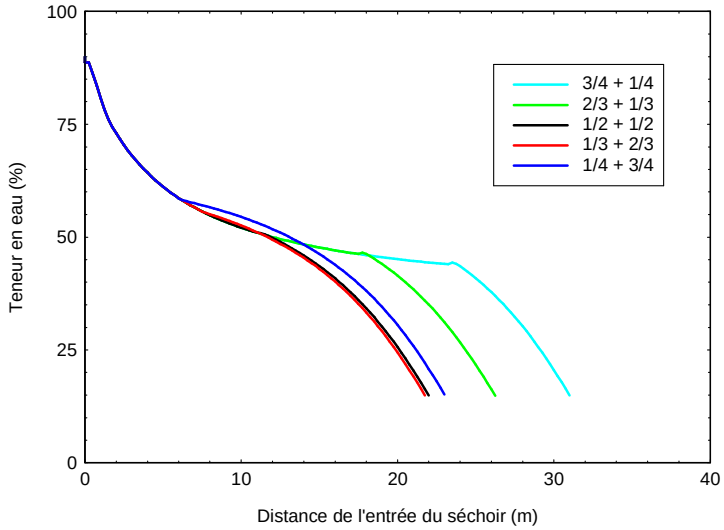


Figure 112 : Influence des longueurs relatives des modules sur la longueur optimisée d'un tunnel à configuration *p-f + c-f*

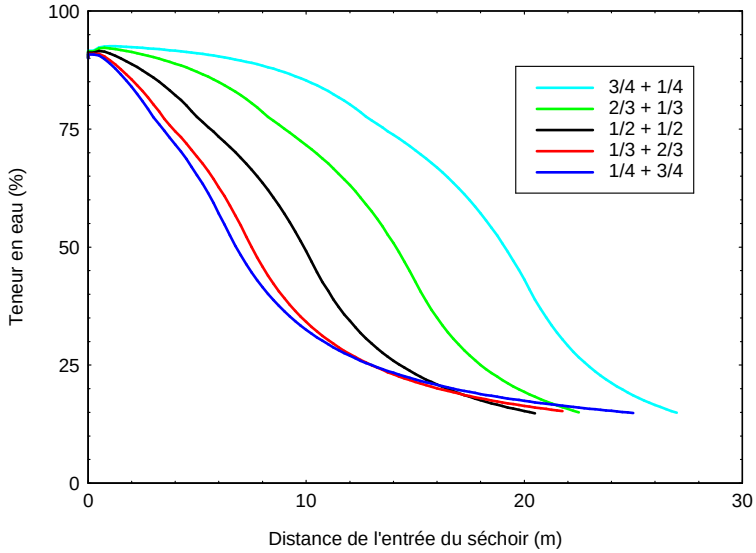


Figure 113 : Influence des longueurs relatives des modules sur la longueur optimisée d'un tunnel à configuration *c-f + p-f*

Les Figures 112 et 113 montrent que le déplacement de la limite des modules le long du tunnel ne permet aucune réduction de la longueur optimisée par rapport à la situation initiale (limite à mi longueur), et ce pour les deux configurations mixtes étudiées. La seule exception est constatée pour la configuration *p-f + c-f* avec une limite de module au tiers de la longueur. Cependant, malgré le gain de 25 cm obtenu, cette configuration demeure la moins efficace des quatre étudiées.

II-2-1-2-b : Ajustement de la répartition du débit d'air chaud dans les modules

Au regard des résultats précédents, nous considérons ici que la limite des modules demeure à mi longueur du tunnel.

Pour l'étude de l'influence de la répartition du débit d'air chaud, les points d'injection (cas de la configuration *p-f* + *c-f*) ou d'échappement d'air (cas de la configuration *c-f* + *p-f*), situés aux extrémités du tunnel, doivent être munis de systèmes de régulation.

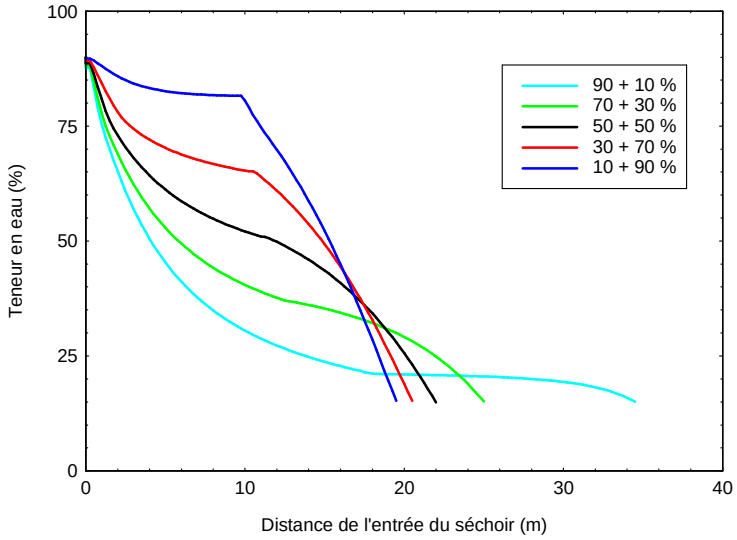


Figure 114 : Influence de la répartition du débit d'air chaud dans les modules sur la longueur optimisée d'un tunnel à configuration *p-f + c-f*

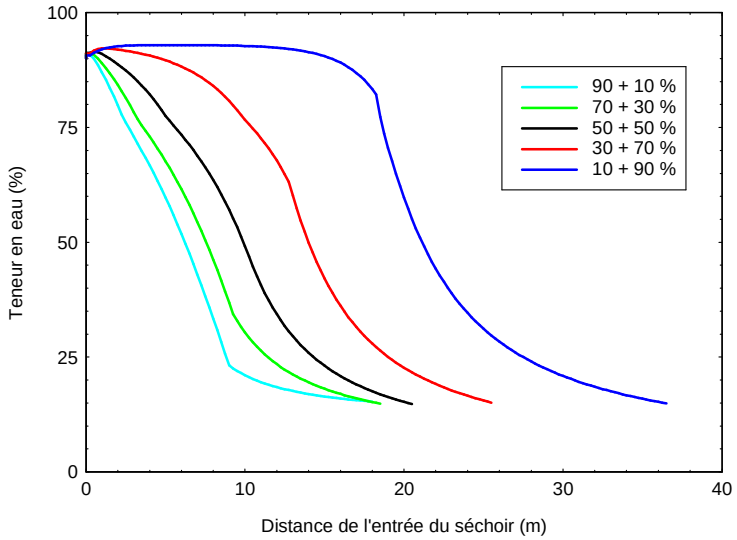


Figure 115 : Influence de la répartition du débit d'air chaud dans les modules sur la longueur optimisée d'un tunnel à configuration *c-f + p-f*

Grâce aux cinétiques de séchage prédites par le modèle global et présentées dans les Figures 114 et 115, nous pouvons prévoir une augmentation de la longueur optimisée du tunnel d'autant plus importante que le module en co-courant est favorisé.

En revanche, une répartition du débit d'air en faveur du module en contre-courant s'accompagne d'une réduction de la longueur du tunnel. Du point de vue de la cinétique de séchage, nous nous rapprochons alors d'une configuration aéraulique simple à contre-courant. Cependant, la longueur optimisée (18 m minimum) est presque deux fois plus élevée que celle identifiée pour la configuration simple à contre-courant (10 m), l'utilité du module en co-courant étant sujette à discussion.

II-2-1-3 : Bilan sur les séchoirs à échappement libre

Les simulations présentées jusqu'alors montrent qu'une configuration aéraulique simple à contre-courant est à privilégier. Dans ce cas, la longueur optimisée du séchoir est environ deux fois inférieure à celles identifiées pour les autres configurations.

Nous pouvons également remarquer que les configurations aérauliques mixtes ne permettent aucune réduction significative de la longueur du séchoir, même par rapport à une configuration simple à co-courant. En outre, la mise en œuvre de ces configurations mixtes nécessite des coûts d'investissement et de maintenance plus importants. L'intérêt qu'elles représentent semble être nul dans le cadre de l'exemple étudié. Cependant, pour conclure sur l'intérêt des solutions mixtes, il faudrait étudier les cas où les paramètres ajustables (longueurs relatives des modules et la répartition du débit d'air chaud dans les modules) varient simultanément.

II-2-2 : Intérêt du recyclage partiel de l'air

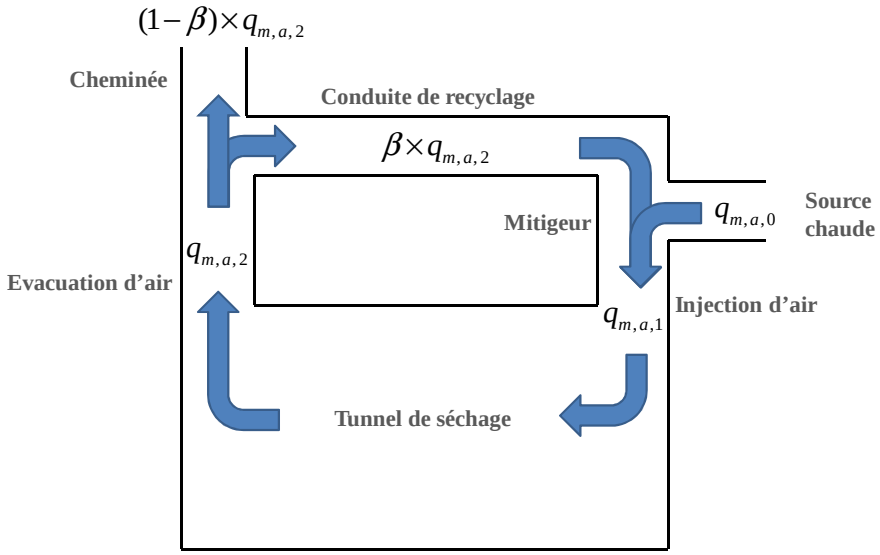


Figure 116 : Représentation schématique du système de recyclage d'air

Afin d'optimiser l'exploitation du potentiel évaporatoire de l'air, un recyclage peut être envisagé : il s'agit de prélever une plus ou moins grande proportion de l'air évacué du séchoir pour le mélanger, avant injection, avec l'air issu de la source chaude. Ceci permet d'augmenter le débit d'air sec (Figure 116) :

$$q_{m,a,1} = q_{m,a,0} + \beta \times q_{m,a,2} \tag{4.3}$$

Or, le débit d'air sec ne varie pas le long du module :

$$q_{m,a,1} = q_{m,a,2} \tag{4.4}$$

Nous obtenons donc :

$$q_{m,a,1} = \frac{q_{m,a,0}}{1-\beta} \tag{4.5}$$

Nous pouvons alors introduire le facteur d'augmentation de débit d'air sec γ :

$$\gamma = \frac{q_{m,a,1}}{q_{m,a,0}} = \frac{1}{1-\beta} \tag{4.6}$$

Le Tableau 29 présente les valeurs du taux de recyclage et du facteur d'augmentation correspondant envisagées lors de cette étude de cas.

Taux de recyclage (β)	Facteur d'augmentation du débit d'air sec (γ)
0	1 (débit de référence)
1/3	1,5
1/2	2
2/3	3

Tableau 29 : Influence du taux de recyclage des gaz évacués sur le débit d'air sec

Dans ce paragraphe, les configurations aérauliques mixtes étudiées sont constituées de deux modules de même longueur et dans lesquels circulent des débits d'air sec identiques.

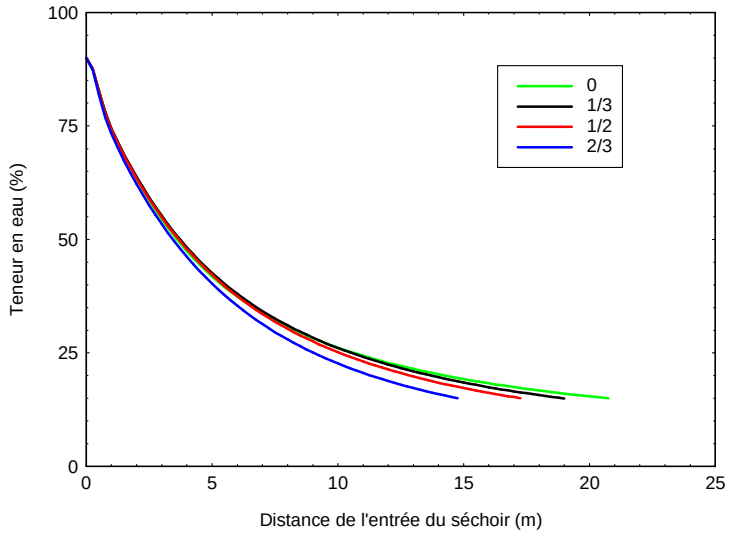


Figure 117 : Influence du taux de recyclage des gaz évacués sur la longueur optimisée d'un tunnel en configuration co-courant

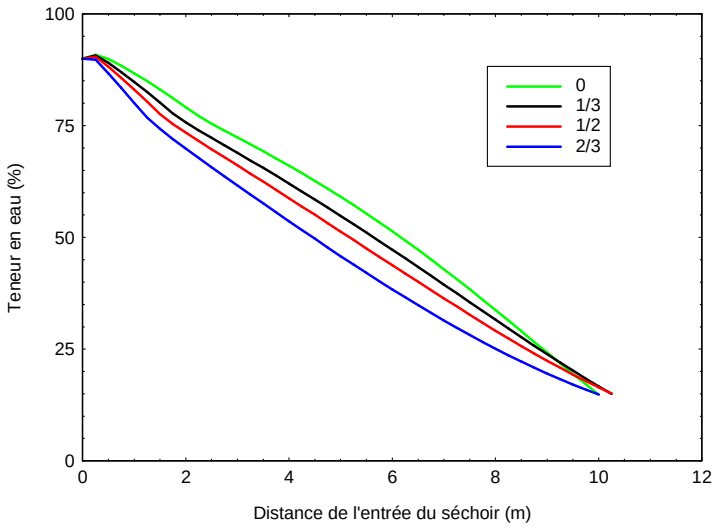


Figure 118 : Influence du taux de recyclage des gaz évacués sur la longueur optimisée d'un tunnel en configuration contre-courant

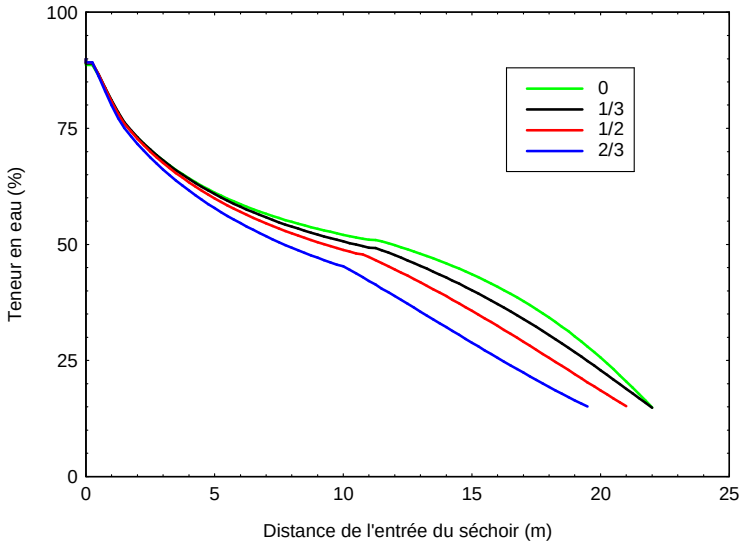


Figure 119 : Influence du taux de recyclage des gaz évacués sur la longueur optimisée d'un tunnel à configuration *p-f + c-f*

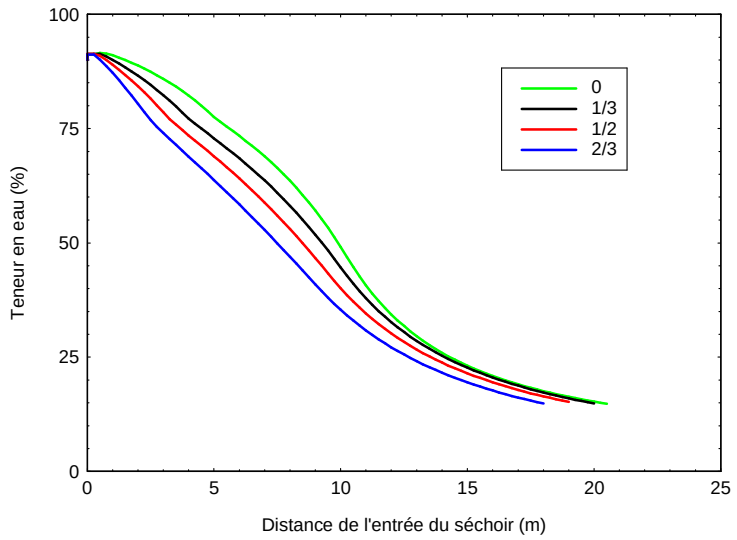


Figure 120 : Influence du taux de recyclage des gaz évacués sur la longueur optimisée d'un tunnel à configuration *c-f + p-f*

Contrairement au cas du contre-courant (Figure 118), la longueur optimisée est sensible au recyclage de l'air dans les configurations à co-courant et mixtes (Figures 117, 119 et 120). L'augmentation du taux de recyclage participe à une réduction significative de la longueur optimisée du séchoir.

Un résumé des valeurs obtenues est disponible dans le Tableau 30.

Taux de recyclage / Configuration aéraulique	0	1/3	1/2	2/3
Co-courant	20,75	19,00	17,25	14,25
Contre-courant	10	10,25	10,25	10
p-f + c-f	22,00	22,00	21,00	19,50
c-f + p-f	20,50	20	19	18

Tableau 30 : Résumé de l'influence du taux de recyclage des gaz évacués sur la longueur optimisée du tunnel

La longueur du tunnel est d'autant plus réduite que le taux de recyclage des gaz évacués est important. Nous serions donc tentés d'accroître sa valeur jusqu'à obtenir un air saturé en vapeur d'eau à la sortie du séchoir. Cependant, nous devons rester modérés dans l'augmentation de ce taux de recyclage car elle va de pair avec une hausse de la consommation d'énergie électrique pour la ventilation.

Les résultats du Tableau 30 confirment que les configurations aérauliques mixtes ne sont pas adaptées pour l'exemple traité.

En outre, la configuration à contre-courant demeure la plus efficace et ce quel que soit le taux de recyclage. Nous privilégions définitivement cette configuration aéraulique simple. Compte tenu de l'insensibilité de cette configuration vis-à-vis du recyclage d'air (du point de vue de la longueur optimisée du tunnel), nous sommes en droit de nous poser la question de la pertinence d'un tel système. En effet, sa mise en œuvre engendre un surcoût au niveau de l'investissement, du fonctionnement et de la maintenance. En revanche, le recyclage permet d'abaisser la température de l'air en entrée du séchoir sans affecter l'efficacité de l'installation (Tableau 31).

Taux de recyclage	Température de l'air injecté
0	120,0 °C
1/3	99,0 °C
1/2	88,9 °C
2/3	78,9 °C

Tableau 31 : Effet du taux de recyclage sur la température de l'air injecté dans un séchoir en configuration contre-courant

Or, le point d'injection de l'air chaud coïncide avec l'extraction du produit sec, ce qui peut provoquer l'auto-inflammation des fines et, ensuite, un incendie du lit de particules (Saastamoinen *et al.*, 2000). Nous estimons, compte tenu de la nature du produit séché, de la géométrie des particules et de la température limitée de la source de chaleur, que ce risque est maîtrisé.

La configuration retenue est donc un séchoir tunnel dépourvu de système de recyclage des gaz évacués dans lequel l'air et le bois circulent à contre-courant.

Remarque : Dans le cadre de cette étude de cas, l'intérêt du recyclage est apparu limité. En effet, la géométrie du séchoir étant optimisée lors de la conception, la marge de manœuvre pour améliorer l'efficacité énergétique de l'installation est faible. En revanche, le recyclage devient un atout significatif pour optimiser le fonctionnement d'un séchoir existant dont le rendement initial est faible si le facteur limitant réside dans la lenteur des transferts internes.

II-2-3 : Optimisation de l'hétérogénéité de la teneur en eau finale

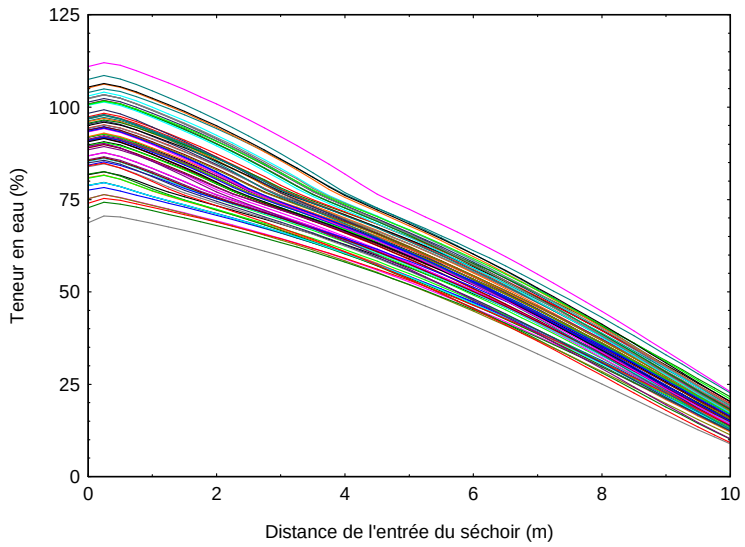


Figure 121 : Réduction insuffisante de l'hétérogénéité de teneur en eau par le séchoir choisi

La configuration choisie permet certes une réduction de la teneur en eau moyenne du lit à 15 %, l'objectif fixé dans le cahier des charges, mais la réduction de l'hétérogénéité de ce paramètre est insuffisante. En effet, l'hétérogénéité de la teneur en eau finale est de 14 %, soit quatre points plus élevée que l'objectif fixé (Figure 121).

Cette hétérogénéité est donc le paramètre contraignant pour l'identification de la longueur optimisée. Elle nécessite que la longueur soit augmentée par rapport à celle identifiée précédemment en raisonnant uniquement sur la moyenne de la teneur en eau du lit.

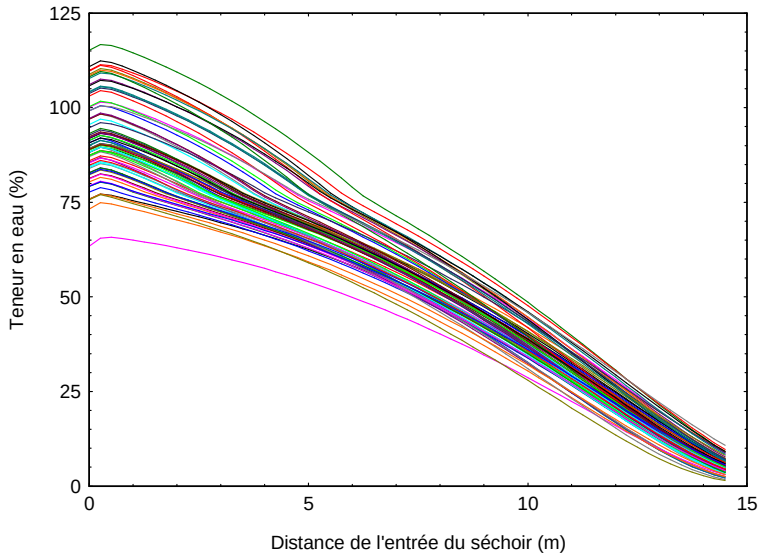


Figure 122 : Longueur de séchoir en configuration contre-courant optimisée pour la réduction de l'hétérogénéité de la teneur en eau du lit

Pour obtenir une hétérogénéité de teneur en eau du lit inférieure à 10 %, la longueur du tunnel doit être portée à 14,5 m (Figure 122). La moyenne de teneur en eau du lit atteint alors la valeur de 5,3 %.

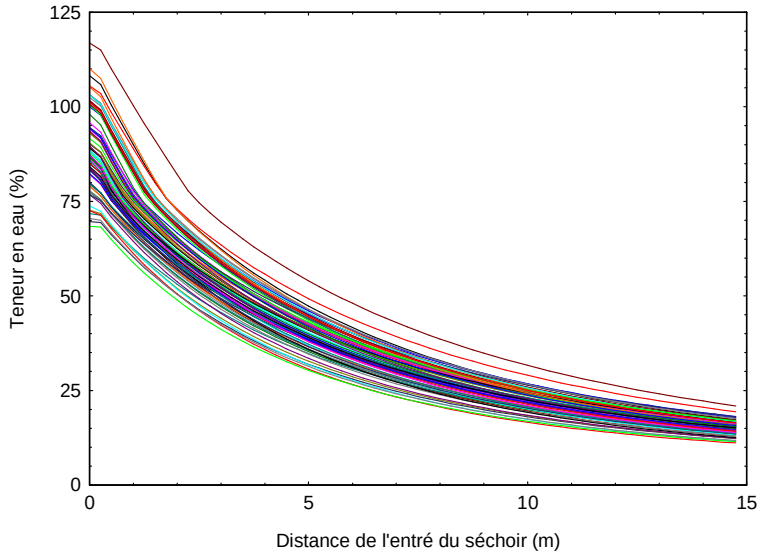


Figure 123 : Longueur de séchoir en configuration co-courant optimisée pour la réduction de l'hétérogénéité de la teneur en eau du lit

À titre de comparaison, nous avons montré dans le paragraphe précédent qu'un séchoir à configuration co-courant de 14,75 m de long permettait d'atteindre la moyenne de teneur en eau objectif si le taux de recyclage de l'air était fixé à 2/3 (Figure 123). L'hétérogénéité de la teneur en eau est alors d'environ 9 %. Dans ce cas, et contrairement au précédent, la moyenne de teneur en eau devient le paramètre contraignant.

De ces deux configurations, proches dans leur encombrement, nous retenons la première du fait de sa simplicité, et de son caractère économe (absence de système de recyclage).

II-2-4 : Sensibilité aux variations de teneur en eau moyenne initiale

De façon très succincte, nous étudions ici l'effet d'une augmentation de la teneur en eau initiale, à une valeur de 100 %, sur le flux matière de l'installation. Sans modifier la vitesse d'avance du tapis roulant, le produit obtenu présente une moyenne et une hétérogénéité de teneur en eau égales à respectivement 10,5 % et 14,5%. Du point de vue de l'hétérogénéité de teneur en eau, le bois traité ne répond alors plus aux exigences de l'entreprise. Son temps de séjour doit être allongé en diminuant sa vitesse d'avance. Pour que le bois atteigne à nouveau le standard exigé, la vitesse doit être réduite à 1,40 $m.s^{-1}$, ce qui correspond à un flux matière de 420 $kg.h^{-1}$. (6,67 % inférieur au flux voulu).

L'industriel devra donc choisir entre construire un séchoir surdimensionné pour être capable de s'accommoder des pics de teneur en eau initiale ou accepter une baisse transitoire du flux ou de la qualité du produit en cas d'augmentation de la teneur en eau initiale.

Conclusion du chapitre 4

À travers ces exemples, nous avons pu démontrer l'efficacité du modèle global vis-à-vis de l'optimisation d'installations existantes et de la conception d'une nouvelle génération de séchoirs. Son caractère interactif permet de valider (ou non) rapidement les solutions techniques envisagées pour l'amélioration du flux matière, de la qualité du produit et de l'efficacité énergétique de l'installation : huit minutes suffisent à simuler 150 heures de fonctionnement du séchoir en tenant compte de la variabilité initiale du bois (soit 150 000 particules) et moins de dix secondes sont nécessaires à la prédiction de la cinétique de séchage moyenne, et ce avec un ordinateur de bureau (Microprocesseur Intel de 2,66 GHz).

Avant de proposer un tel outil de décision aux professionnels, il serait pertinent de coupler ce modèle double-échelle à un module économique. Ceci permettrait de confronter les coûts et les gains des solutions techniques pouvant être mises en œuvre afin d'orienter les choix d'investissement.

En outre, il est intéressant de noter que le laboratoire dispose maintenant de deux modèles adaptés à l'étude du séchage en continu des particules de grandes dimensions. D'une part, le modèle développé dans le cadre de ce doctorat permet de prédire (*i*) l'évolution temporelle de la teneur en eau moyenne de chaque particule, (*ii*) la réduction de l'hétérogénéité de teneur en eau au sein du lit et (*iii*) l'évolution spatiale des conditions climatiques. D'autre part, le code numérique *TransPore* permet de simuler le champ de teneur en eau au sein de la particule à partir des profils de conditions climatiques obtenus précédemment. Or, l'hétérogénéité de teneur en eau au sein d'une particule de grande taille peut être toute aussi élevée que celle observée à l'échelle du lit (en considérant la teneur en eau moyenne de chaque particule).

Conclusions générales et perspectives

Conclusions générales :

Le travail mené lors du doctorat a permis le développement, la validation et l'utilisation d'un outil numérique utile à la conception d'une nouvelle génération de séchoirs ou l'optimisation d'installations existantes.

À l'échelle de la particule de bois, le séchage est simulé au moyen du modèle de Van Meel étendu qui cumule plusieurs avantages. D'une part, la nature de ce modèle, semi-analytique, permet de réduire drastiquement le temps de calcul par rapport aux modèles numériques. En effet, l'utilisation du concept de courbes caractéristiques de séchage permet de tenir compte de l'influence des fentes et des retraits du bois sur la cinétique de séchage, sans toutefois pouvoir prédire l'occurrence et l'intensité de ces phénomènes. Bien évidemment, cette réactivité du modèle s'accompagne d'une perte d'information (notamment les champs de température et de teneur en eau au sein de la particule) mais fort heureusement cette information perdue n'est généralement pas pertinente pour l'étude du séchage du bois énergie. D'autre part, grâce à la prise en compte de manière explicite du couplage entre transferts de chaleur et de masse, l'évolution des moyennes de teneur en eau et de température de la particule peut être simulée fidèlement, même avec des conditions climatiques variables. En outre, ce couplage explicite permet de prédire les phénomènes de condensation qui pourraient expliquer des retards de séchage.

À l'échelle du séchoir, la pertinence de la structure double-échelle du modèle est démontrée. Premièrement, elle permet la prise en compte de la variabilité initiale des paramètres du bois (teneur en eau, géométrie, débit, etc.) pour simuler l'évolution de l'hétérogénéité de la teneur en eau du lit de particules le long du séchoir. Deuxièmement, l'adaptation du code est facilitée en cas de modification du type de particule à sécher : seuls quelques paramètres (activité de surface, porosité macroscopique du lit, etc.) doivent être ajustés. Par ailleurs, l'implémentation du modèle de Van Meel étendu en tant que module local est pleinement justifiée par les caractères prédictif et réactif de celui-ci. En effet, ce modèle est parfaitement apte à prédire le comportement de chaque particule du lit, soumise à des conditions climatiques variables lors de sa traversée du séchoir, et est garant de l'interactivité du modèle global. Enfin, la prise en compte des déperditions thermiques à travers la paroi et des phénomènes éventuels de condensation à la surface (intérieure) de celle-ci est un atout de poids pour établir des bilans énergétiques complets de l'installation.

Nous obtenons ainsi un puissant outil numérique d'aide à la décision. Les cinétiques simulées sont utiles au dimensionnement d'un séchoir industriel et de la source de chaleur associée ainsi qu'à l'identification des solutions à mettre en œuvre pour maximiser le flux matière et l'efficacité énergétique de l'installation tout en garantissant la qualité du produit (moyenne et hétérogénéité de la teneur en eau du lit).

Parallèlement au travail de modélisation et de programmation décrit précédemment, un soin particulier fut apporté à la mise au point d'outils, expérimentaux et numérique, indispensables à l'alimentation en paramètres et à la validation du modèle double-échelle.

Pour l'étude du séchage de particules de bois isolées, nous disposons maintenant d'un dispositif expérimental original permettant le suivi, simultané et sans interaction, de la teneur en eau (par l'intermédiaire de la masse) et de la température de surface du bois. Les cinétiques obtenues peuvent être valorisées selon plusieurs protocoles. D'une part, les paramètres de l'activité de surface peuvent être identifiés directement à partir de ces données expérimentales. D'autre part, les cinétiques expérimentales peuvent être utilisées comme *témoin* pour apprécier la justesse des cinétiques prédites

par le modèle local et donc valider ce dernier. Enfin, elles sont susceptibles d'être utilisées pour ajuster les paramètres de la version tridimensionnelle de *TransPore* qui pourra à son tour fournir les cinétiques de séchage utiles à l'alimentation et à la validation du modèle local.

Nous avons alors à notre disposition deux outils complémentaires pour l'alimentation en paramètres et la validation du modèle local : *TransPore* et un dispositif expérimental. Le premier est utilisé dans le cas de l'étude du séchage de particules de hêtre ou d'épicéa (*Picea abies* L.) dont la géométrie est simple (avivés) et quelles qu'en soient les dimensions. *A contrario*, le second est utilisé pour les particules d'au moins 50 g, quelles qu'en soient l'essence et la géométrie.

Par ailleurs, pour la validation du modèle global, nous avons conçu et construit un dispositif expérimental répondant aux exigences de l'étude du séchage d'un lit de particules. En effet, la densité de l'instrumentation nous permet d'apprécier l'hétérogénéité des conditions de séchage à travers le lit et de mettre en évidence un front de séchage plus ou moins marqué.

Perspectives de ce travail :

Le modèle présenté dans ce manuscrit, couplé à une méthode (expérimentale ou numérique) d'alimentation en paramètres, répond à nos attentes en terme de qualité de prédiction. Le potentiel de cet outil numérique laisse donc entrevoir une intéressante perspective de valorisation commerciale dans le cadre d'expertises d'installations industrielles existantes ou à construire. Cependant, avant d'envisager sereinement ce type de valorisation, il nous parait important de souligner que des pistes d'amélioration de ce travail ont d'ores et déjà pu être identifiées.

Concernant le modèle local, il semble primordial de finaliser le travail amorcé sur la différenciation des températures moyenne et de surface grâce à l'utilisation d'une mémoire évanescente. Ceci renforcera la validité de ce modèle lorsqu'il est appliqué à l'étude du séchage des particules de grandes dimensions. Par ailleurs, nous avons pu montrer l'intérêt de tenir compte des dégradations thermiques du bois lors du séchage à haute température. En vue d'améliorer la concordance entre les résultats expérimentaux et numériques, il serait donc opportun d'intégrer un bilan de masse de la matière lignocellulosique dans le système d'équations et de tenir compte de la contribution de ces dégradations thermiques dans le bilan de chaleur. Sans être une priorité, l'approfondissement de cette perspective permettra d'étendre le domaine de validité du modèle tout en proposant une évaluation de la perte de matière première due au séchage à haute température.

La principale perspective d'amélioration du modèle global repose sur la prise en compte des transferts convectifs et diffusifs d'air et de vapeur au sein du lit. Il serait dès lors possible de mettre en évidence une hétérogénéité de teneur eau finale du bois selon la position des particules dans la section du lit. Autrement dit, nous pourrions simuler le séchage d'un lit épais léché par un écoulement d'air dans un séchoir tunnel. De même, nous pourrions évaluer l'influence sur la cinétique de la proximité de la particule à la paroi dans un séchoir à lit fixe mobile. Cependant, cette perspective nécessiterait d'avoir recours à la CFD (*computational fluid mechanics*), ce qui impose un saut quantitatif important dans la complexité du modèle. Effet, la CFD impose généralement la résolution des équations de Navier et Stokes sur l'écoulement d'air qui, dans certains cas, peut être turbulent. En outre, cette complexité serait renforcée par le besoin d'accéder à la description tridimensionnelle de la macroporosité du lit fixe de particules. Ainsi, l'amélioration de la qualité des cinétiques de séchage prédites, grâce à l'intégration de la CFD dans le modèle de global, devrait être mise en regard avec la dégradation du caractère interactif de ce même modèle. En revanche, l'utilisation de la CFD permettrait de connaitre *a priori* le champ de vitesse de l'air dans la section du lit pour vérifier voire affiner l'hypothèse

homogénéité des conditions aérauliques, et ce sans que cette CFD ne soit, à proprement parlé, intégrée au modèle global. La deuxième piste d'amélioration identifiée pour le modèle global est un affinement de la description des échanges thermique et massique au niveau de la paroi du séchoir. Pour un séchoir tunnel, il conviendrait de différencier les surfaces à l'air libre et celle en contact avec le sol. En outre, même si leur surface d'échange est faible par rapport à celle des parois latérales, il serait judicieux de ne plus considérer les portes du tunnel comme des parois adiabatiques. Un simple bilan énergétique d'installations existantes permettra estimer *a priori* le bénéfice que l'on est en droit d'espérer de ce type d'amélioration du modèle. Par ailleurs, dans le cas d'un séchoir à lit fixe mobile, l'hypothèse d'évacuation des condensats formés au niveau de la face intérieure de la paroi est peu opportune. Un discernement du devenir des condensats en fonction du type de séchoir semble donc pertinent. Enfin, les transferts paroi/bois ne devraient plus être considérés comme nuls lorsque ces deux éléments sont en contact (cas notamment des tours de séchage à lit fixe mobile).

Pour profiter au mieux du potentiel de la structure double-échelle du modèle, permettant la prise en compte de la variabilité des paramètres initiaux du bois (teneur en eau, taille, densité, etc.), il semblerait approprié d'étudier les lois de distribution statistique des valeurs de ces paramètres.

Evidemment, les perspectives d'amélioration peuvent également concerner les outils d'alimentation en paramètres du modèle. Pour le dispositif expérimental, nous pourrions tout aussi bien perfectionner la méthode de mesure de la teneur en eau que celle de la température de surface. D'une part, avec l'adaptation de l'appareil de pesée et du porte échantillon à la particule, il serait envisageable d'étudier expérimentalement le séchage des plaquettes forestières. L'étude du séchage de ce type de bois énergie ne serait dès lors plus limitée aux seules essences pour lesquelles *TransPore* est validé. D'autre part, la mise en place d'une caméra thermique dans l'enceinte permettrait de connaître la température de l'intégralité de la surface de la particule. Ainsi, nous serions à même d'évaluer convenablement la moyenne de la température de surface (aujourd'hui, le pyromètre ne fournit qu'une information ponctuelle) et nous disposerions d'une information particulièrement riche pour ajuster finement les paramètres de *TransPore*. En outre, quelques modifications pourraient être apportées à *TransPore* afin d'étendre ses possibilités d'utilisation. Il conviendrait, par exemple, d'adapter le maillage à des géométries de particules complexes et pourquoi pas de manière automatique. De plus, un travail de grande ampleur consisterait en l'alimentation en paramètres de *TransPore* pour d'autres essences que le hêtre et l'épicéa. Ceci pourrait s'effectuer soit au prix d'une étude bibliographique minutieuse soit au moyen de la chaîne d'acquisition expérimentale mise au point depuis de nombreuse années au sein de l'équipe d'accueil.

Un pool de cinétiques de séchage pourrait alors être obtenu par l'utilisation en routine de ces outils performants destinés à l'alimentation du modèle. À partir de ce jeu de données, il serait ensuite envisageable de préciser les fonctions liant les valeurs identifiées de la teneur en eau critique et des paramètres de l'activité adimensionnelle aux conditions climatiques (température, humidité relative et coefficients de transferts), à la teneur en eau initiale voire aux dimensions de la particule.

Enfin, il nous semble essentiel de préciser que le travail présenté dans ce manuscrit a vocation à constituer un socle commun pour l'étude de modes de séchage exclus dans le cadre de ce doctorat. Par exemple, en France, les plaquettes forestières sont aujourd'hui majoritairement séchées en tas à l'air libre, sous hangar ou bâche *Toptex*. Pour simuler ce type de séchage au moyen du modèle global, il conviendrait alors de prendre en compte la diffusion et la convection des gaz au sein du tas, tel que

cela a été évoqué précédemment, et d'y coupler un module de dégradations biologiques de la matière lignocellulosique, exothermiques.

Annexes

Annexe I Présentation du code de simulation *TransPore*

Définition des équations de conservation

Lors du séchage du bois, il y a un couplage entre les transferts de chaleur et de masse. La simulation de ce procédé consiste donc en un suivi de l'état du milieu (le bois) par calcul numérique. Cet état est défini par l'évolution temporelle du champ spatial de la température, de la teneur en eau et de la pression de la phase gazeuse.

Les équations de conservation de chaleur et de masse sont écrites en considérant les phases constitutives du milieu poreux à partir des travaux de Whitaker (Whitaker, 1977a, b ; Chen et Whitaker, 1986). Le bois est un milieu poreux qui est constitué de trois phases :

- une phase gazeuse (air sec et vapeur d'eau),
- une phase liquide (eau libre),
- une phase solide (bois et éventuellement eau liée).

Les équations utilisées sont très fortement couplées et non linéaires. La description de ces transferts a été améliorée (Ben Nasrallah et Perré, 1988) afin de prendre en compte les spécificités du matériau bois (aspiration des ponctuations aréolées, diffusion de l'eau adsorbée dans la matrice cellulosique). Les équations de conservation de masse utilisées tiennent compte des transferts dus à la migration capillaire et à la filtration de la phase liquide, à la diffusion-convection de la phase gazeuse et à la migration diffusive de la phase adsorbée. Le bilan énergétique tient compte de la conduction, de la chaleur latente de vaporisation et de la chaleur différentielle de sorption. Enfin, la pression résulte d'un bilan du flux des gaz et du volume de cette phase dans le matériau. La prise en compte de cette pression étend considérablement le domaine de validité du modèle, notamment pour les séchages à hautes températures.

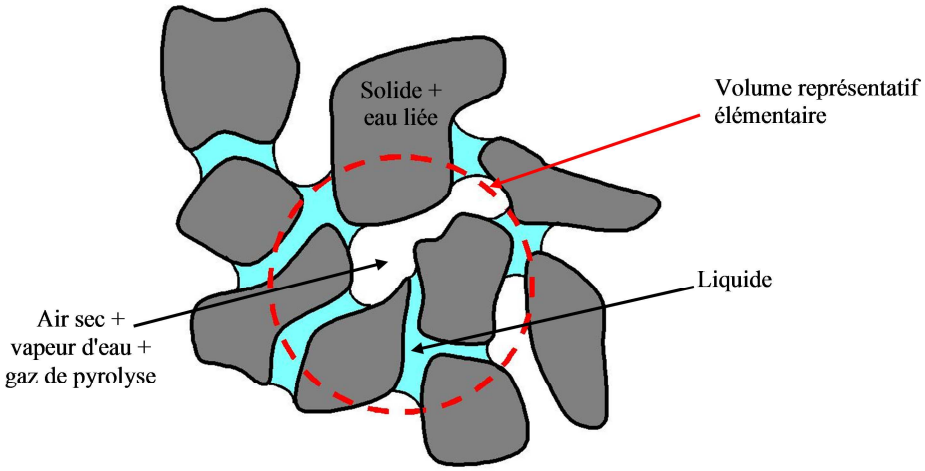


Figure 124 : Volume élémentaire représentatif du milieu poreux (d'après Perré, 2007a)

Cependant, l'arrangement des trois phases est complexe et rarement connu, ce qui empêche toute résolution de ces équations à l'échelle microscopique. Il est donc préférable de décrire le milieu en utilisant des équations macroscopiques. La valeur macroscopique d'une grandeur φ sera définie comme la moyenne de cette grandeur sur un volume élémentaire représentatif (VER) du milieu poreux centré sur le point géométrique considéré (Figure 124).

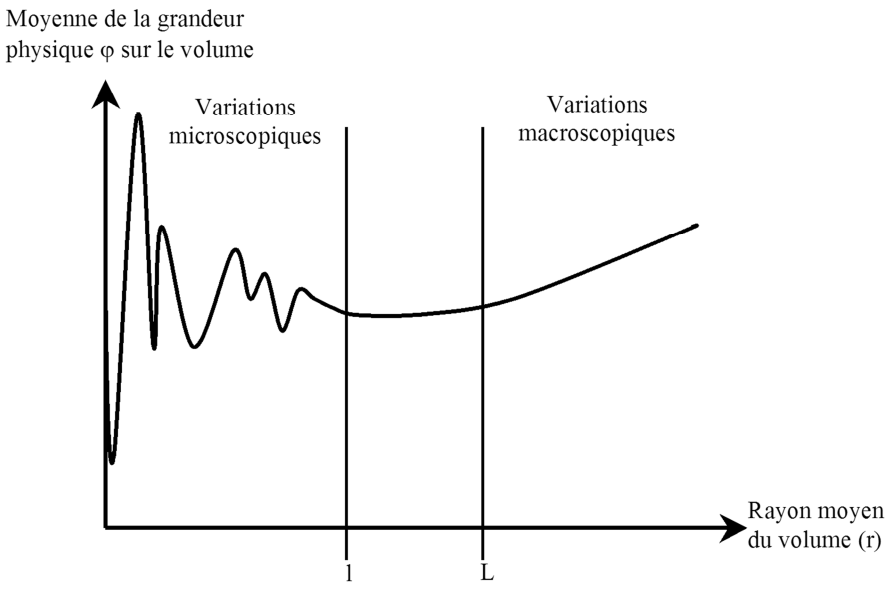


Figure 125 : Condition d'existence du volume élémentaire représentatif : L>r>l (d'après Jodin, 1994)

Le VER doit être grand par rapport aux pores, et par conséquent grand par rapport aux variations microscopiques, mais aussi petit par rapport aux variations macroscopiques (Figure 125).

Les équations de conservation et de dégradation sont moyennées et sommées sur le VER, ce qui permet de passer d'un milieu poreux réel à un milieu continu fictif. La résolution s'effectue donc à l'échelle de cette particule mésoscopique.

Résolution numérique

La simulation repose sur la résolution numérique des équations de conservation et de dégradation précédemment établies. Pour ce faire, ces équations sont discrétisées dans le temps et l'espace.

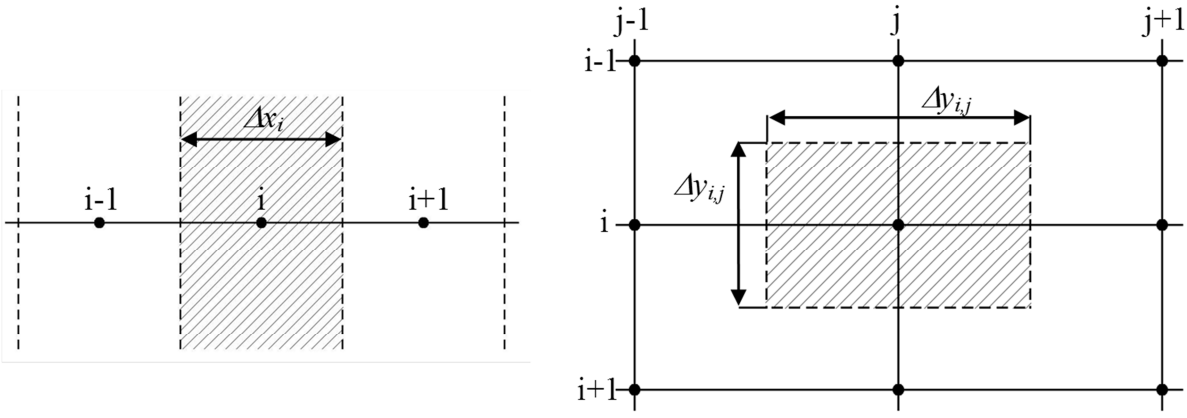


Figure 126 : Caractéristique du volume de contrôle utilisé dans la résolution numérique 1-D et 2-D

A partir de la géométrie définie par l'utilisateur, l'échantillon est "divisé" en un nombre prédéfini de volumes de contrôle centrés sur des nœuds répartis régulièrement ou non sur une ligne (*TransPore* 1-D),une surface (*TransPore* 2-D) ou un volume (*TransPore* 3-D) (Figure 126). Il s'agit de la méthode des volumes finis préconisée par Pantakar (Patankar, 1980). Les équations de conservation de masse et de chaleur peuvent être résolues sur ces volumes de contrôle.

Plusieurs hypothèses sont effectuées afin de permettre la résolution :

- en un point, l'état du système et les flux restent constant entre les instants t et $t+\Delta t$ et sont calculés un instant $t+\Delta t$ (schéma implicite en temps),
- les flux sont évalués sur les surfaces des volumes de contrôle en supposant leurs variations linéaires entre deux nœuds,
- les gradients des variables sont supposés constants entre deux nœuds,
- etc.

Un grand nombre de paramètres physiques utilisés dans les équations dépendent directement du matériau traité. Des études de caractérisation du bois ont permis l'alimentation du code en valeurs numériques pour ces paramètres (Siau, 1984 ; Agoua, 2001 ; Kouchadé, 2004 ; Houngan *et al.*, 2006). Certaines sont fixes car éprouvées et stables pour un spectre donné d'essences ; d'autres sont libres car susceptibles d'être modifiés par l'utilisateur en fonction du bois étudié (densité, porosité, perméabilité gazeuse et liquide, résistance à la diffusion et enthalpies des réactions). De plus, en raison du caractère anisotrope du bois, ces paramètres dépendent de la direction étudiée.

L'utilisateur indique l'état initial de l'échantillon (température et humidité) et indique l'évolution au cours du traitement des paramètres de consigne de l'atmosphère (température, pression, température de rosée et coefficients de transferts externes de chaleur et de masse).

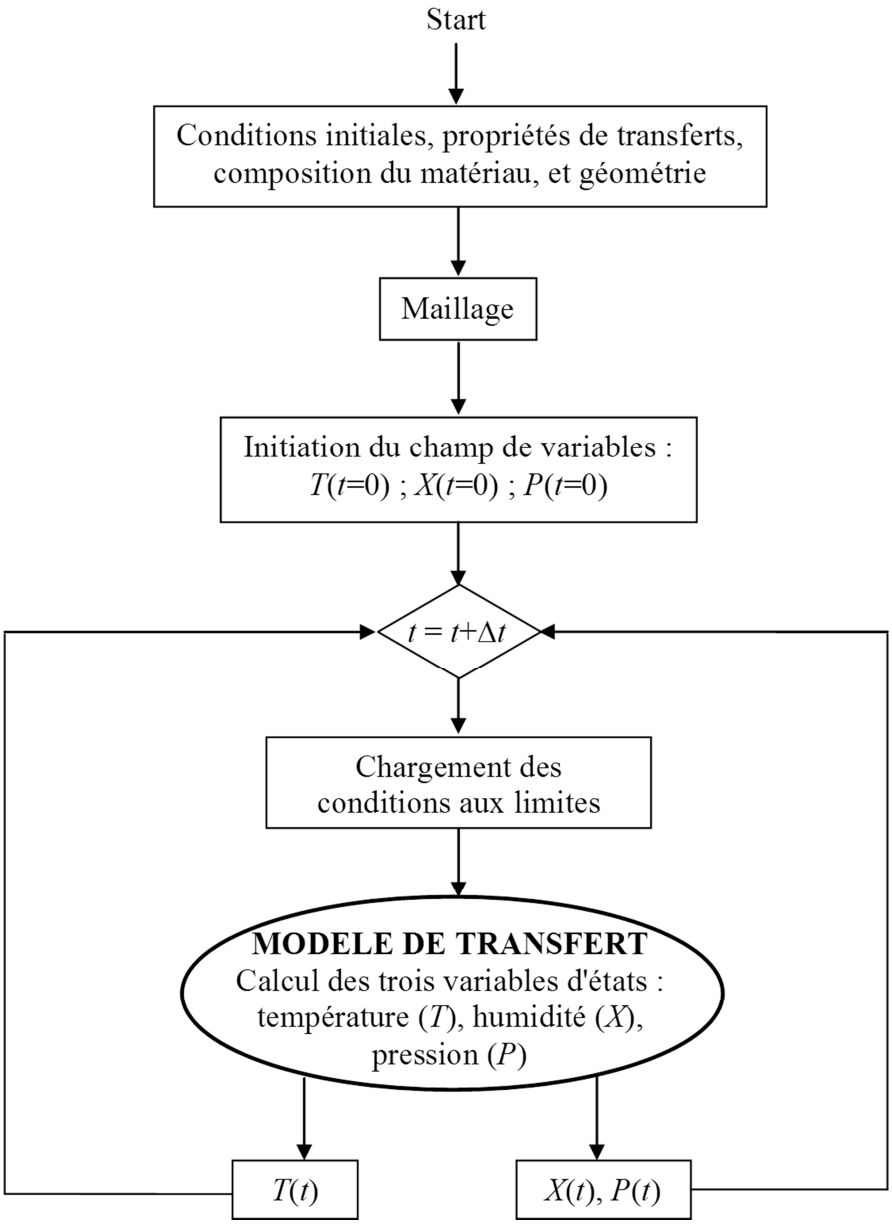


Figure 127 : Diagramme de résolution des équations de *TransPore*

TransPore peut alors simuler le séchage et donne l'évolution temporelle du champ spatial des variables d'état du bois : température, teneur en eau et pression de la phase gazeuse (Figure 127).

Annexe II Conservation de la chaleur à l'échelle de la particule

Les enthalpies de référence (valeurs nulles) sont définies pour la matière lignocellulosique sèche et de l'eau liquide à 0 °C. De même, L_v^0 est l'enthalpie de changement de phase à 0°C.

Nous raisonnons sur un système à masse constante. À l'instant *t*, le système est composé d'une masse m_0 de matière lignocellulosique sèche et d'une masse $m_l(t)$ d'eau liquide, le tout à une température moyenne $\overline{T}(t)$. À l'instant *t+dt*, le système est composé d'une masse m_0 de matière lignocellulosique sèche et d'une masse $m_l(t+dt)$ d'eau liquide, ces deux composants à une température moyenne $\overline{T}(t+dt)$ et une masse $m_v(t+dt)$ de vapeur d'eau à la température $T^{surf}(t+dt)$.

$$m_l = m_0 \times \overline{X} \tag{II.1}$$

$$m_v(t+dt) = m_l(t) - m_l(t+dt) = m_0 \times \left(\overline{X}(t) - \overline{X}(t+dt)\right) \tag{II.2}$$

$$\mathrm{H}(t) = m_0 \times \left(c_{P,b} + \overline{X}(t) \times c_{P,l}\right) \times \overline{T}(t) \tag{II.3}$$

$$\begin{aligned}\mathrm{H}(t+dt) = {} & m_0 \times \left(c_{P,b} + \overline{X}(t+dt) \times c_{P,l}\right) \times \overline{T}(t+dt) \\ & + m_0 \times \left(\overline{X}(t) - \overline{X}(t+dt)\right) \times \left(c_{P,v} \times T^{surf}(t+dt) + L_v^0\right)\end{aligned} \tag{II.4}$$

Entre les instants *t* et *t+dt*, la particule de bois reçoit une quantité d'énergie Q_c qui modifie son enthalpie :

$$\mathrm{H}(t+dt) = \mathrm{H}(t) + Q_c \tag{II.5}$$

avec $Q_c = h_c \times \left(T_{db}^{\infty} - T^{surf}(t+dt)\right) \times Surf_{part} \times dt$ (II.6)

D'après les quatre dernières équations, on en déduit :

$$\begin{aligned}h_c \times \left(T_{db}^{\infty} - T^{surf}(t+dt)\right) \times Surf_{part} \times dt = {} & m_0 \times \left(c_{P,b} + \overline{X}(t+dt) \times c_{P,l}\right) \times \overline{T}(t+dt) \\ & + m_0 \times \left(\overline{X}(t) - \overline{X}(t+dt)\right) \times \left(c_{P,v} \times T^{surf}(t+dt) + L_v^0\right) \\ & - m_0 \times \left(c_{P,b} + \overline{X}(t) \times c_{P,l}\right) \times \overline{T}(t)\end{aligned} \tag{II.7}$$

$$\begin{aligned}h_c \times \left(T_{db}^{\infty} - T^{surf}(t+dt)\right) \times Surf_{part} = {} & m_0 \times \left(c_{P,b} + \overline{X}(t) \times c_{P,l}\right) \times \frac{\overline{T}(t+dt) - \overline{T}(t)}{dt} \\ & - m_0 \times \frac{\overline{X}(t+dt) - \overline{X}(t)}{dt} \times \left(c_{P,v} \times T^{surf}(t+dt) + L_v^0 - c_{P,l} \times \overline{T}(t+dt)\right)\end{aligned} \tag{II.8}$$

En faisans l'hypothèse de l'homogénéité de la température au sein de la particule, on obtient :

$$h_c \times \left(T_{db}^{\infty} - \overline{T}\left(t+dt\right)\right) \times Surf_{part} = m_0 \times \left(c_{P,b} + \overline{X}\left(t\right) \times c_{P,l}\right) \times \frac{\overline{T}\left(t+dt\right) - \overline{T}\left(t\right)}{dt} - m_0 \times \frac{\overline{X}\left(t+dt\right) - \overline{X}\left(t\right)}{dt} \times \underbrace{\left(c_{P,v} \times \overline{T}\left(t+dt\right) + L_v^0 - c_{P,l} \times \overline{T}\left(t+dt\right)\right)}_{=L_v\left(\overline{T}\left(t+dt\right)\right)} \quad \text{(II.9)}$$

Enfin, à partir de l'Equation II.9, on retrouve l'expression de l'équation de conservation de chaleur (Equation 2.16) si *dt* tend vers 0 :

$$h_c \times \left(T_{db}^{\infty} - \overline{T}\right) \times Surf_{part} = m_0 \times \left(c_{P,b} + \overline{X} \times c_{P,l}\right) \times \dot{\overline{T}} - m_0 \times \dot{\overline{X}} \times L_v\left(\overline{T}\right) \quad \text{(II.10)}$$

Annexe III Evaluation de la différence entre les températures moyenne et de surface de la particule

Le choix d'un modèle semi-analytique s'accompagne d'hypothèses fortes, par exemple l'homogénéité des champs de température et de teneur en eau au sein d'une pièce de bois.

$$\begin{cases} \dot{\overline{X}} \times m_0 = -h_m \times C \times M_v \times Surf_{part} \times \ln \dfrac{P_{atm} - P_v^{\infty}}{P_{atm} - a(\phi, HR) \times P_{vs}\left(\overline{T}\right)} \\ h_c \times \left(T_{db}^{\infty} - \overline{T}\right) \times Surf_{part} = m_0 \times \left(c_{P,b} + \overline{X} \times c_{P,l}\right) \times \dot{\overline{T}} - m_0 \times \dot{\overline{X}} \times L_v\left(\overline{T}\right) \end{cases} \quad \text{(III.1 et III.2)}$$

Cette hypothèse est acceptable pour des pièces de bois de faible dimension pour lesquelles la résistance aux transferts internes (thermique et massique) entre le cœur et la surface est faible devant la résistance aux transferts externes (cas des corps minces, tels que les plaquettes forestières). Cependant, cette hypothèse n'est plus valable pour des pièces de bois de plus fortes épaisseurs, de type billons de bois par exemple. Ainsi, nous tentons dans ce travail différencier :

- la température moyenne, $\overline{T}$,
- la température de surface, T^{surf}.

L'équation de conservation de chaleur devient donc la suivante :

$$\begin{cases} \dot{\overline{X}} \times m_0 = -h_m \times C \times M_v \times Surf_{part} \times \ln \dfrac{P_{atm} - P_v^{\infty}}{P_{atm} - a(\phi, HR) \times P_{vs}\left(T^{surf}\right)} \\ h_c \times \left(T_{db}^{\infty} - T^{surf}\right) \times Surf_{part} = m_0 \times \left(c_{P,b} + \overline{X} \times c_{P,l}\right) \times \dot{\overline{T}} - m_0 \times \dot{\overline{X}} \times L_v\left(T^{surf}\right) \end{cases} \quad \text{(III.3 et III.4)}$$

Il est maintenant impératif d'estimer la différence entre ces deux températures. L'estimation du champ de température au sein du matériau s'obtient en résolvant l'équation de conservation de l'énergie en tout point du matériau. La solution analytique de l'équation de la chaleur (thermique pure) est connue pour des géométries simples de particule (cylindre, plaque, sphère) et avec des conditions initiales et aux limites simplifiées. Mais dans le cas présent, la géométrie des particules peut être complexe et le champ de température résulte des transferts couplés masse/chaleur au sein du matériau. Pour rester dans l'esprit des courbes caractéristiques, nous avons traité ce problème de transport de chaleur de la même façon que la viscoélasticité est abordé en rhéologie, par un modèle analogique correspondant à l'élément de Kelvin (assemblage en parallèle d'un ressort et d'un amortisseur).

En effet, dans le cas présent, la température moyenne du matériau suit une évolution qui pourrait ressembler à celle du fluage viscoélastique. Avant d'être placée dans le séchoir, le champ de température d'une pièce de bois dont la teneur en eau est élevée (supérieure à la teneur en eau critique) peut être considérée homogène. La température en tout point de la pièce de bois est égale à la température du bulbe humide de l'air à l'extérieur du séchoir car nous sommes en première phase de séchage : $T^{surf} = \overline{T} = T_h^{ext}$. Lorsque cette pièce de bois est placée dans le séchoir, la température de surface évolue très rapidement pour atteindre la température du bulbe humide à l'intérieur du séchoir $T^{surf} = T_h^{int}$. Faisons l'hypothèse que cette évolution de la température de surface est quasi instantanée. La température moyenne tend également vers cette valeur mais de façon différée avec la

température de surface. Un comportement similaire est observé lorsque la pièce de bois est retirée du séchoir (Figure 128).

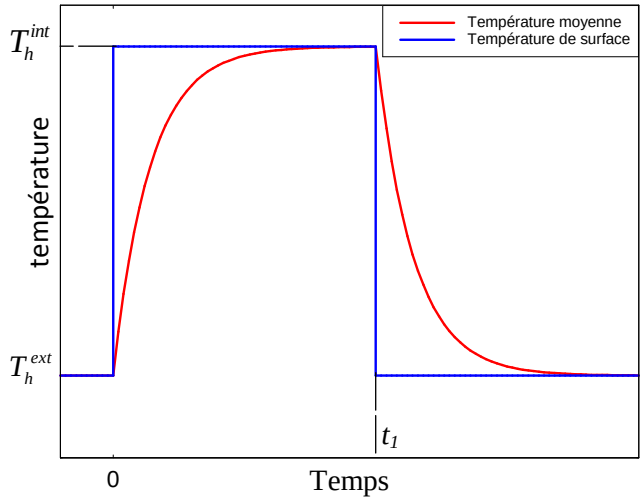


Figure 128 : Comportement thermique d'une pièce de bois soumise à un créneau de température

Compte tenu de cette similitude, nous décrivons dans un premier temps le comportement rhéologique de l'élément de Kelvin. Ceci nous permet ensuite d'estimer par analogie l'écart entre la température de surface et la température moyenne de la particule de bois:

Elément de Kelvin soumis à un échelon de contrainte

L'élément de Kelvin est constitué d'un ressort (module d'élasticité : E) et d'un amortisseur (facteur d'amortissement : η) en parallèle (Figure 129).

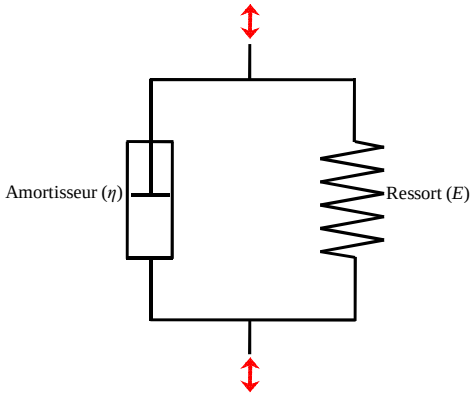


Figure 129 : Elément de Kelvin

Dans un solide déformable, contrainte et déformation peuvent être reliées par la fonction de fluage :

$$\varepsilon(t) = \sigma(0) \times f(t) \qquad \text{(III.5)}$$

Dans le cas de l'élément de Kelvin, la fonction de fluage est la suivante :

$$f(t)=\frac{1-e^{-\frac{t\times E}{\eta}}}{E} \qquad \text{(III.6)}$$

La relation entre déformation et contrainte devient :

$$\varepsilon(t)=\frac{\sigma(0)}{E}\times\left(1-e^{-\frac{t\times E}{\eta}}\right) \qquad \text{(III.7)}$$

et l'intensité de la déformation tend vers la valeur $\frac{\sigma(0)}{E}$.

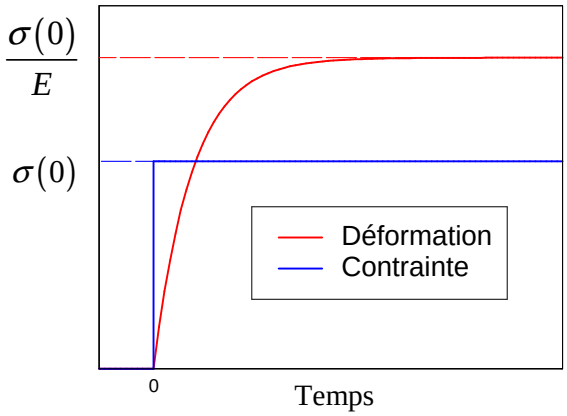


Figure 130 : Réponse de l'élément de Kelvin à une contrainte constante

Si maintenant la contrainte est annulée à un temps t_1, le matériau se relaxe et la déformation tend à redevenir nulle. En appliquant le principe de superposition de Boltzmann, nous obtenons la relation suivante :

$$\varepsilon(t)=H(t)\times\frac{\sigma(0)}{E}\times\left(1-e^{-\frac{t\times E}{\eta}}\right)-H(t-t_1)\times\frac{\sigma(0)}{E}\times\left(1-e^{-\frac{(t-t_1)\times E}{\eta}}\right) \qquad \text{(III.8)}$$

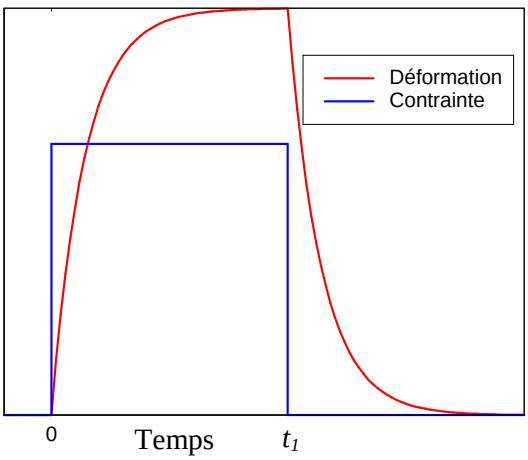


Figure 131 : Réponse d'un élément de Kelvin à une contrainte en créneau

Formulation de l'analogie dans cas d'un échelon de température d'air

Selon l'hypothèse de l'analogie, nous décrivons ci-après la correspondance entre les deux phénomènes thermique/mécanique afin d'estimer l'écart entre la température de surface et la température moyenne de la particule de bois :

- la contrainte correspond à la perturbation de la température de surface :
  - $\sigma \Leftrightarrow \Delta T^{surf} = T^{surf} - T_{init}^{surf}$ (III.9)
- la déformation correspond à la perturbation de la température moyenne :
- $\varepsilon \Leftrightarrow \Delta \overline{T} = \overline{T} - \overline{T}_{init}$ (III.10)
- le module d'élasticité et le facteur d'amortissement correspondent à deux paramètres du modèle, K_1 et K_2.

Lorsqu'une perturbation provoque une variation brutale de la température de surface, la température moyenne évolue ainsi :

$$\Delta \overline{T}(t) = \frac{\Delta T^{surf}(0)}{K_1} \times \left(1 - e^{-\frac{t \times K_1}{K_2}}\right) \quad \text{(III.11)}$$

Ceci résulte de l'analogie avec l'élément de Kelvin soumis à une charge constante (Equation III.7). Il faut remarquer que $T_{init}^{surf} = \overline{T}_{init}$ car initialement la température est homogène dans la pièce de bois. Par ailleurs, $\overline{T}$ tend vers T^{surf} : K_1 a donc pour valeur 1.

$$\Delta \overline{T}(t) = \Delta T^{surf}(0) \times \left(1 - e^{-\frac{t}{K_2}}\right) \quad \text{(III.12)}$$

L'utilisation de la fonction Heaviside permet par exemple d'estimer l'évolution de la température moyenne à la suite de l'introduction de la particule dans le séchoir puis de sa sortie :

$$\Delta \overline{T}(t) = H(t) \times \Delta T^{surf}(0) \times \left(1 - e^{-\frac{t}{K_2}}\right) - H(t - t_1) \times \Delta T^{surf}(0) \times \left(1 - e^{-\frac{t - t_1}{K_2}}\right) \quad \text{(III.13)}$$

La description de l'évolution de la température moyenne présentée jusqu'alors n'est valable que pour un échelon de température extérieure. Ceci est une configuration simplifiée de la réalité et n'est pas suffisante pour estimer l'écart entre les températures de surface et moyenne de la pièce de bois au cours du séchage. Afin généraliser l'expression précédente à une température de surface non constante, un produit de convolution sera utilisé par analogie au principe de superposition de Boltzmann utilisé en rhéologie.

Généralisation aux conditions variables

En effet, rappelons dans un premier temps l'évolution de la déformation d'un élément de Kelvin soumis à une contrainte non constante. Nous pouvons appliquer le principe de superposition de Boltzmann dans le cas où la contrainte et la fonction de fluage sont dérivables :

$$\varepsilon(t) = \sigma(0) \times f(t) + \int_0^t f(t - \tau) \times \sigma'(\tau) \times d\tau \quad \text{(III.14)}$$

Généralement, nous n'avons pas d'information sur la dérivée de la contrainte. Ainsi nous intégrons par partie l'Equation III.14 et nous obtenons :

$$\varepsilon(t) = \sigma(t) \times f(0) + \int_0^t f'(t-\tau) \times \sigma(\tau) \times d\tau \tag{III.15}$$

D'après l'Equation III.6 nous obtenons les deux informations suivantes dans le cas de l'élément de Kelvin :

$$f(0) = 1 - e^{-\frac{0 \times E}{\eta}} = 0 \tag{III.16}$$

$$f'(t) = \frac{e^{-\frac{t \times E}{\eta}}}{\eta} \tag{III.17}$$

Nous obtenons donc la fonction *déformation* suivante :

$$\varepsilon(t) = \int_0^t \frac{e^{-\frac{(t-\tau) \times E}{\eta}}}{\eta} \times \sigma(\tau) \times d\tau = \frac{e^{-\frac{t \times E}{\eta}}}{\eta} \times \int_0^t e^{\frac{\tau \times E}{\eta}} \times \sigma(\tau) \times d\tau \tag{III.18}$$

Par analogie, nous pouvons déduire la relation entre température moyenne et température de surface quand celle-ci est variable :

$$\Delta\overline{T}(t) = \frac{e^{-\frac{t}{K_2}}}{K_2} \times \int_0^t e^{\frac{\tau}{K_2}} \times \Delta T^{surf}(\tau) \times d\tau \tag{III.19}$$

Lors de la résolution numérique des équations de conservation il est indispensable de limiter la masse de donnée à traiter. Il est donc préférable de déterminer $\Delta\overline{T}(t+\Delta t)$ en fonction de $\Delta\overline{T}(t)$. En effet l'intégration entre 0 et *t* nécessite de conserver en mémoire toute l'histoire de la pièce de bois, ce qui consomme de la mémoire vive de l'ordinateur. L'intégrale de l'Equation III.19 est décomposée pour obtenir la forme suivante :

$$\begin{aligned}
\Delta\overline{T}(t+\Delta t) &= \frac{e^{-\frac{t+\Delta t}{K_2}}}{K_2} \times \int_0^{t+\Delta t} e^{\frac{\tau}{K_2}} \times \Delta T^{surf}(\tau) \times d\tau \\
&= e^{-\frac{\Delta t}{K_2}} \times \frac{e^{-\frac{t}{K_2}}}{K_2} \times \left(\int_0^t e^{\frac{\tau}{K_2}} \times \Delta T^{surf}(\tau) \times d\tau + \int_t^{t+\Delta t} e^{\frac{\tau}{K_2}} \times \Delta T^{surf}(\tau) \times d\tau \right) \\
&= e^{-\frac{\Delta t}{K_2}} \times \left(\frac{e^{-\frac{t}{K_2}}}{K_2} \times \int_0^t e^{\frac{\tau}{K_2}} \times \Delta T^{surf}(\tau) \times d\tau \right) + \frac{e^{-\frac{t+\Delta t}{K_2}}}{K_2} \times \int_t^{t+\Delta t} e^{\frac{\tau}{K_2}} \times \Delta T^{surf}(\tau) \times d\tau \\
&= e^{-\frac{\Delta t}{K_2}} \times \Delta\overline{T}(t) + \frac{e^{-\frac{t+\Delta t}{K_2}}}{K_2} \times \int_t^{t+\Delta t} e^{\frac{\tau}{K_2}} \times \Delta T^{surf}(\tau) \times d\tau
\end{aligned} \tag{III.20}$$

Dans le cas où le pas de temps Δt est suffisamment faible, la fonction intégrée peut-être supposée constante sur l'intervalle *t* et $t+\Delta t$, selon un schéma explicite :

$$\int_t^{t+\Delta t} e^{\frac{\tau}{K_2}} \times \Delta T^{surf}(\tau) \times d\tau \approx e^{\frac{t}{K_2}} \times \Delta T^{surf}(t) \times \Delta t \qquad \text{(III.21)}$$

Ainsi nous obtenons une forme simple de $\Delta\overline{T}(t+\Delta t)$:

$$\Delta\overline{T}(t+\Delta t) = e^{-\frac{\Delta t}{K_2}} \times \left(\Delta\overline{T}(t) + \Delta T^{surf}(t) \times \frac{\Delta t}{K_2} \right) \qquad \text{(III.22)}$$

Pour introduire cette équation dans le modèle il faut préalablement identifier K_2 (homogène à un temps), valable pour des paramètres de particule (géométrie, teneur en eau, etc.) et d'air données. Pour ce faire, il faut soumettre la particule étudiée, initialement homogène en température, à un changement brutal de température d'air et enregistrer le profil interne de température (pour déduire la température moyenne) et la température de surface. Par ailleurs, il est nécessaire d'annuler tout transfert de masse, interne et externe, afin de découpler les effets de ce créneau de température.

Expérimentalement, cela consiste en une instrumentation à maillage fin de l'échantillon. Or cette l'instrumentation nécessaire pour l'accès à la température interne est souvent intrusive (mise en place de thermocouples) et perturbe significativement les transferts de chaleur. De plus, pour annuler les transferts de masse il faut soit se munir d'un échantillon anhydre et le traiter sous air sec soit se munir d'un échantillon dont la teneur en eau est homogène et supérieure au psf et le traiter sous air saturé.

D'une part, ce type d'expérience doit être répété un grand nombre de fois en raison de la sensibilité de K_2 aux paramètres de la particule et de l'air et, d'autre part, il est difficile d'obtenir ces conditions expérimentales. C'est pourquoi, il est préférable de privilégier l'utilisation de codes de simulation tels que *TransPore* afin d'obtenir en routine les cinétiques de séchage pour différentes géométries de particules et températures d'air tout en annulant numériquement les transferts de masse (de telle sorte que la particule soit à l'équilibre hygroscopique en tout point et tout instant).

Faute de temps, l'adaptation du maillage de *TransPore* à la géométrie cylindrique des billons et l'identification de K_2 n'ont pas été effectués lors de ce doctorat.

Annexe IV Cinétiques expérimentales recueillies par séchage de planchettes de hêtre

Effet de la teneur en eau initiale

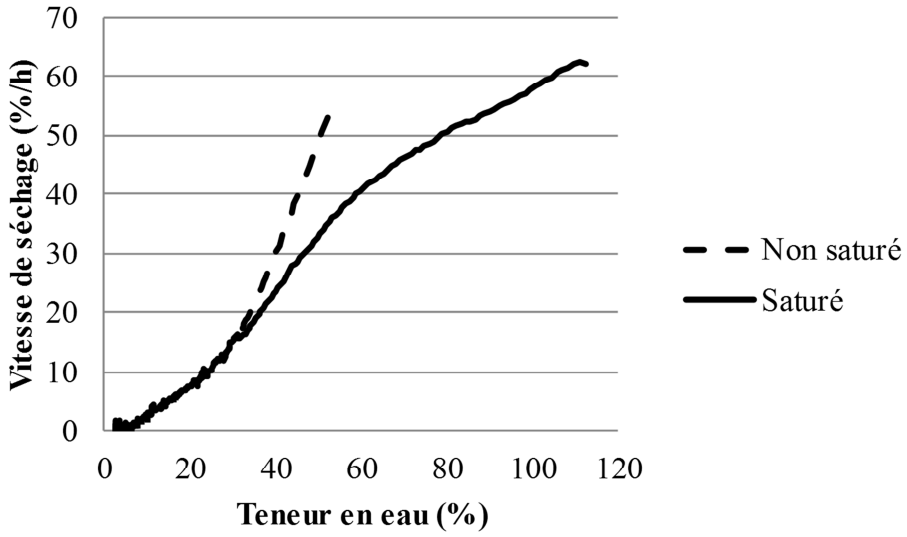


Figure 132 : Influence de la teneur en eau initiale sur la cinétique de séchage à 60°C (longueur des échantillons = 80 mm ; épaisseur des échantillons = 5 mm)

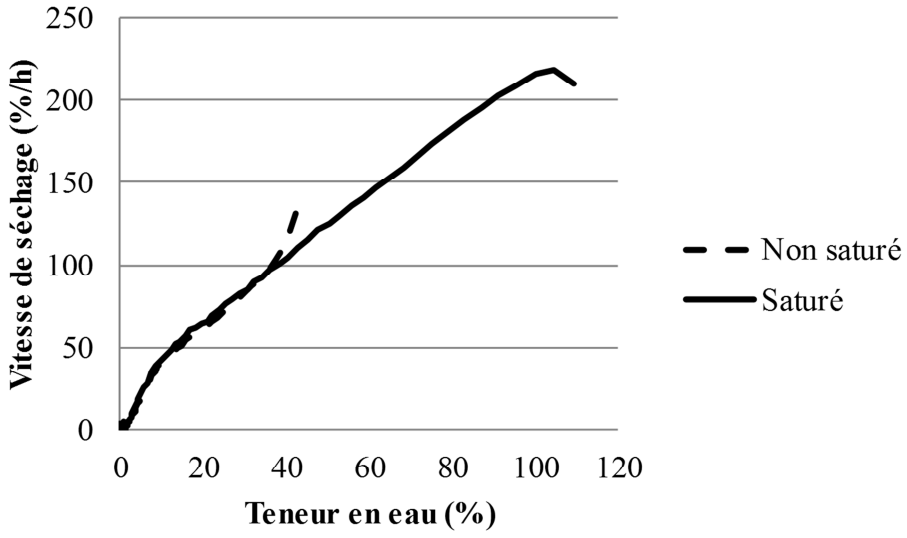


Figure 133 : Influence de la teneur en eau initiale sur la cinétique de séchage à 120°C (longueur des échantillons = 80 mm ; épaisseur des échantillons = 5 mm)

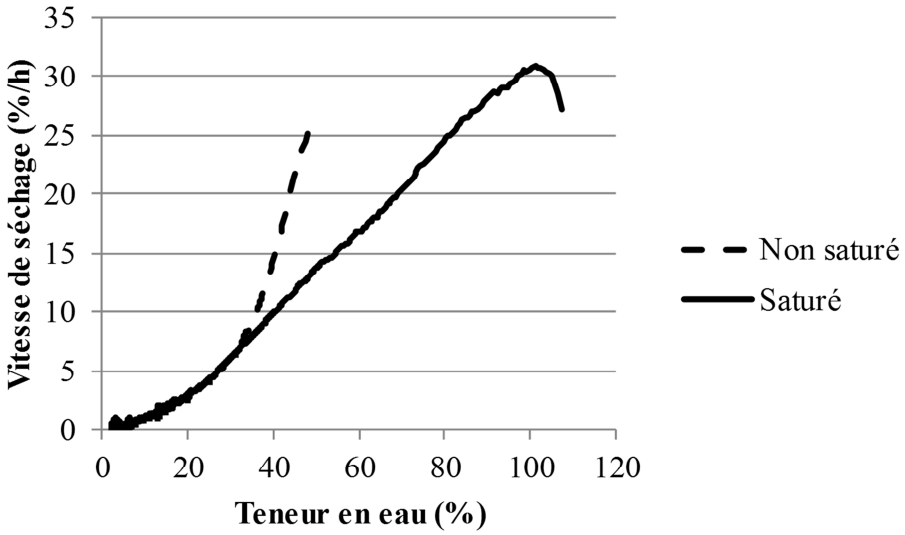


Figure 134 : Influence de la teneur en eau initiale sur la cinétique de séchage à 60°C (longueur des échantillons = 80 mm ; épaisseur des échantillons = 10 mm)

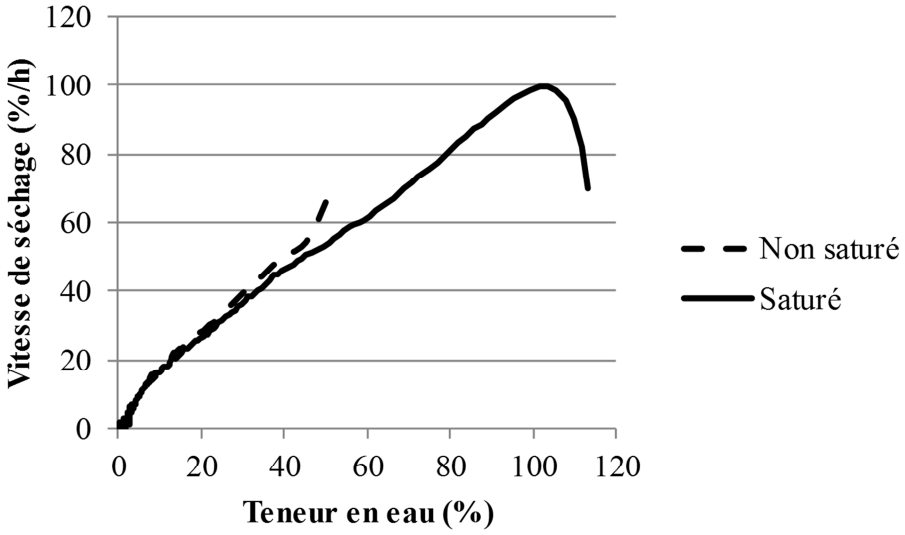


Figure 135 : Influence de la teneur en eau initiale sur la cinétique de séchage à 120°C (longueur des échantillons = 80 mm ; épaisseur des échantillons = 10 mm)

Effet des dimensions de l'échantillon

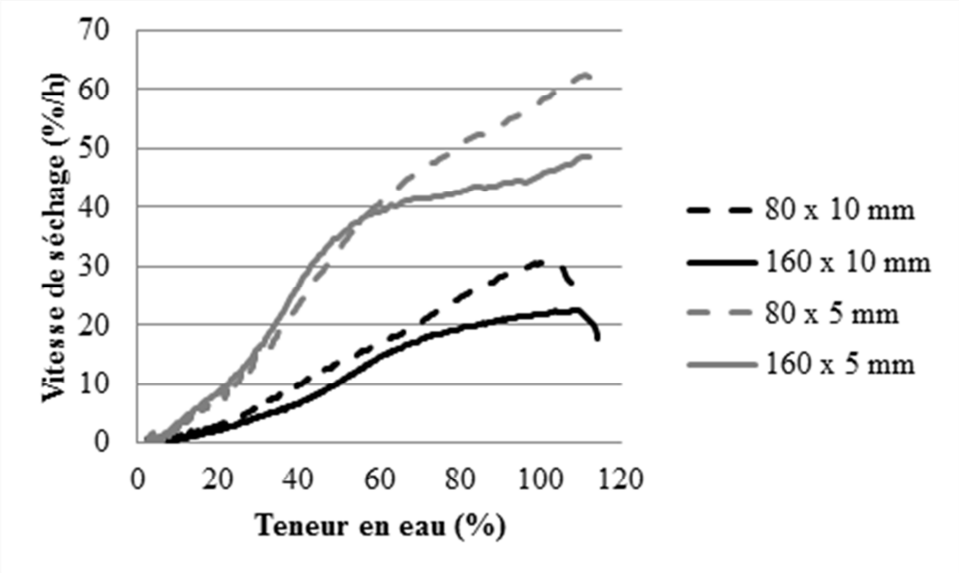


Figure 136 : Influence des dimensions d'échantillons initialement saturés sur la cinétique de séchage à 60°C

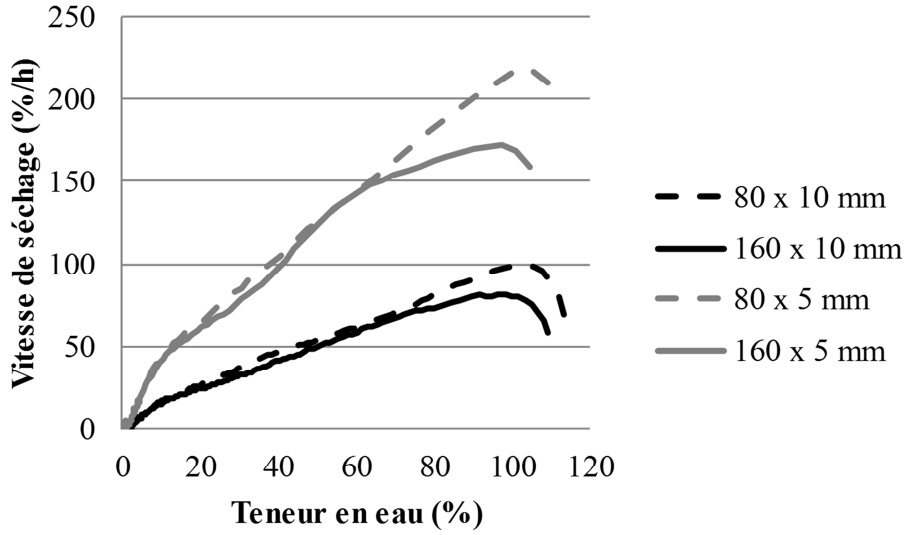


Figure 137 : Influence des dimensions d'échantillons initialement saturés sur la cinétique de séchage à 120°C

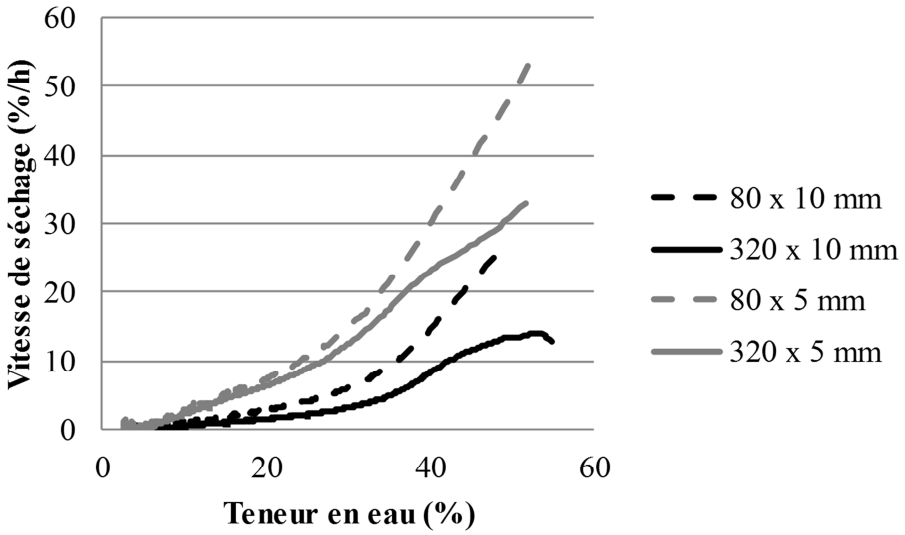


Figure 138 : Influence des dimensions d'échantillons initialement non saturés sur la cinétique de séchage à 60°C

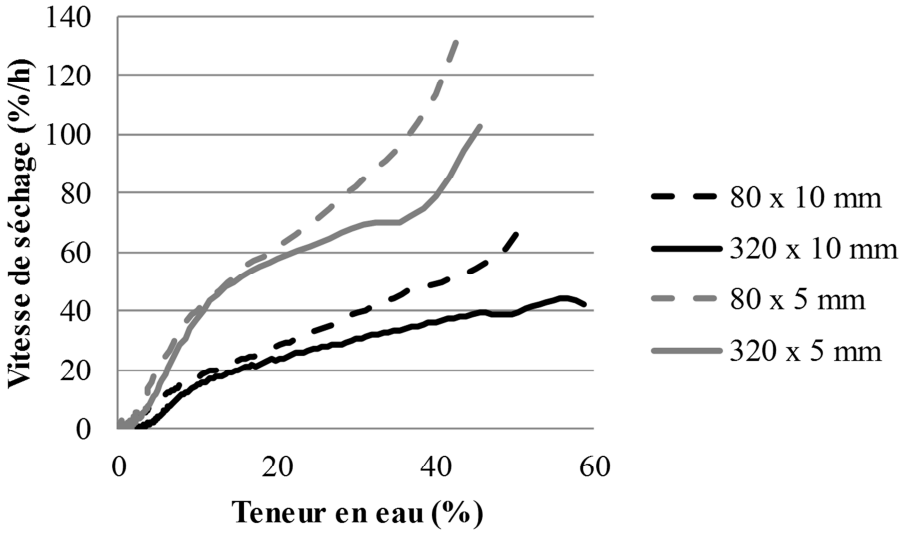


Figure 139 : Influence des dimensions d'échantillons initialement non saturés sur la cinétique de séchage à 120°C

Effet de la température de séchage

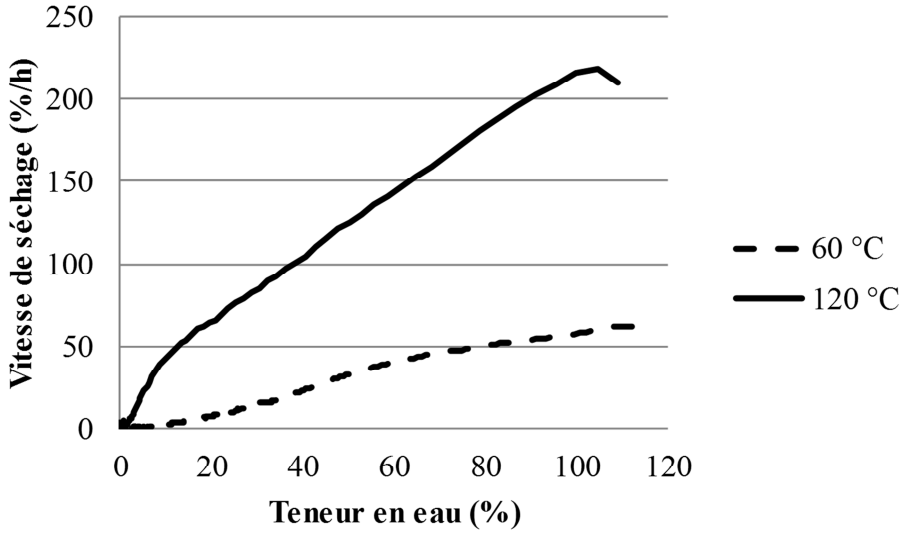


Figure 140 : Influence de la température sur la cinétique de séchage d'échantillons initialement saturés (longueur des échantillons = 80 mm ; épaisseur des échantillons = 5 mm)

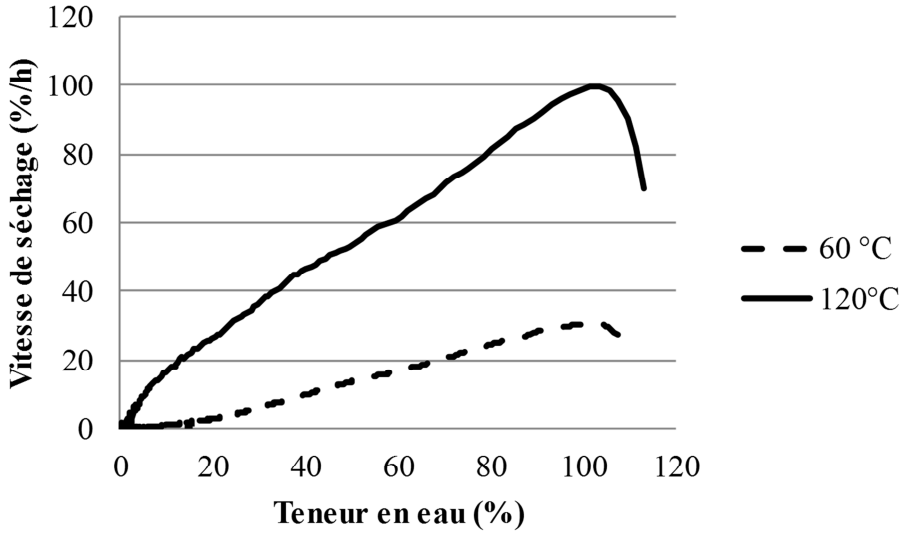


Figure 141 : Influence de la température sur la cinétique de séchage d'échantillons initialement saturés (longueur des échantillons = 80 mm ; épaisseur des échantillons = 10 mm)

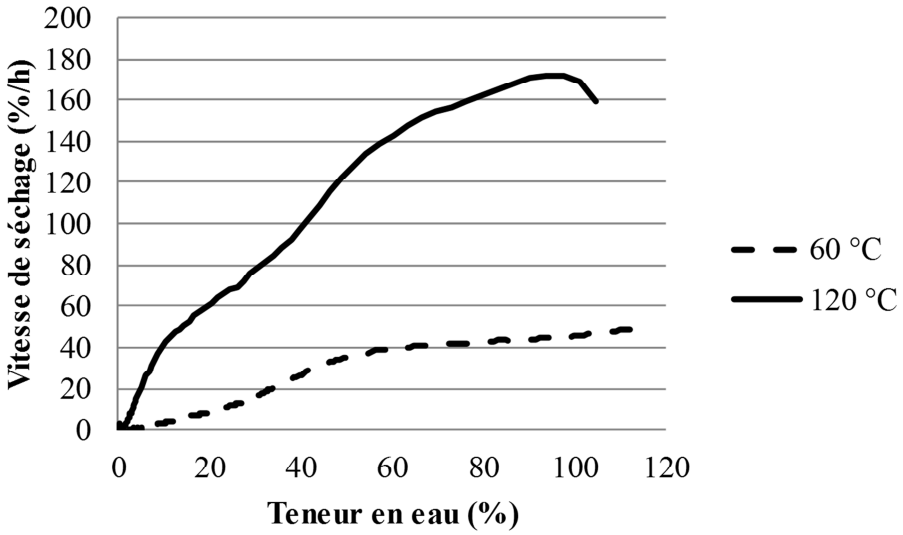


Figure 142 : Influence de la température sur la cinétique de séchage d'échantillons initialement saturés (longueur des échantillons = 160 mm ; épaisseur des échantillons = 5 mm)

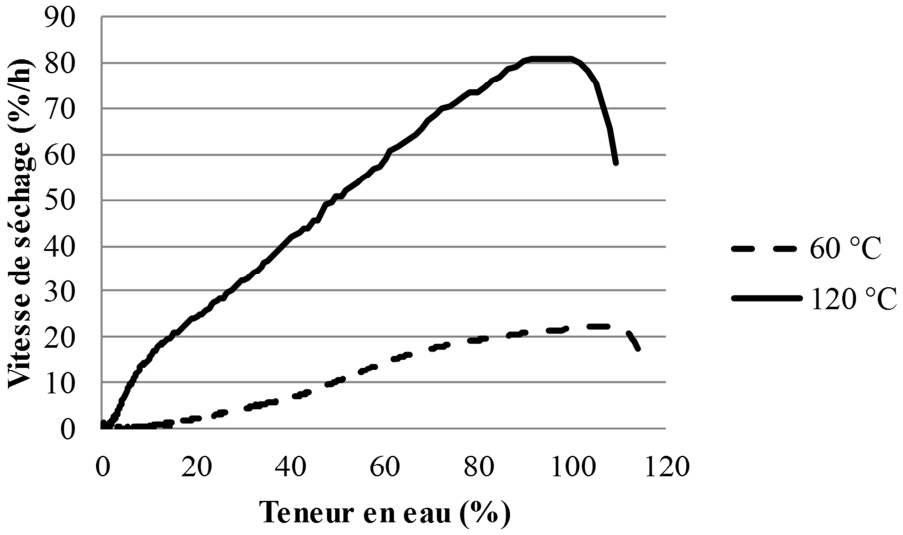


Figure 143 : Influence de la température sur la cinétique de séchage d'échantillons initialement saturés (longueur des échantillons = 160 mm ; épaisseur des échantillons = 10 mm)

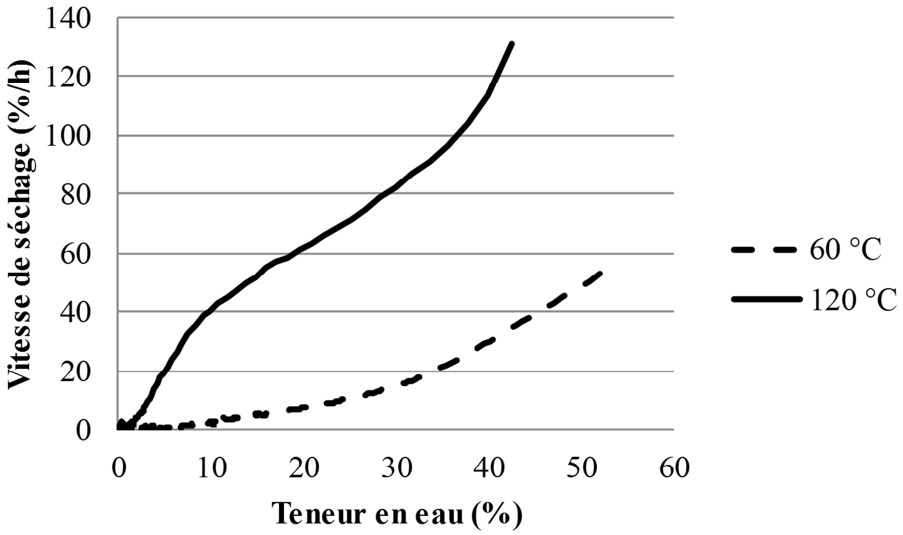


Figure 144 : Influence de la température sur la cinétique de séchage d'échantillons initialement non saturés (longueur des échantillons = 80 mm ; épaisseur des échantillons = 5 mm)

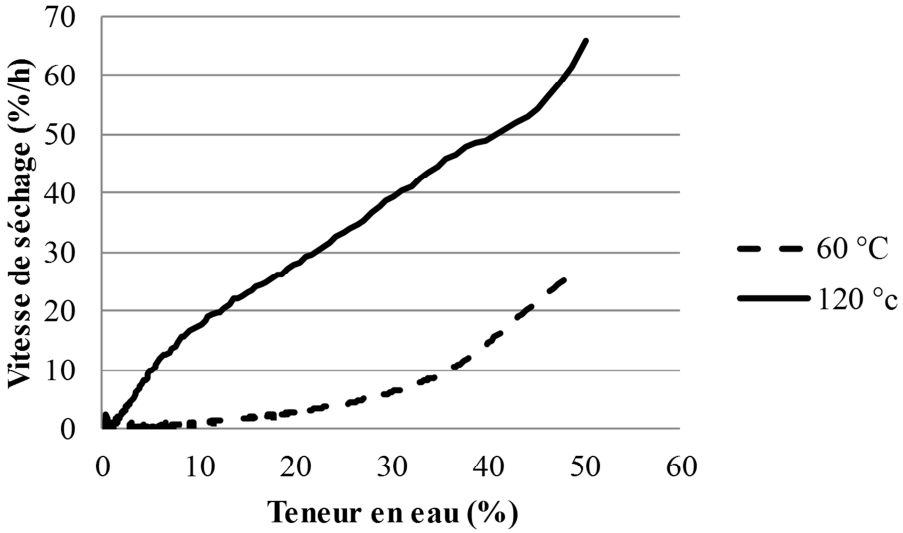


Figure 145 : Influence de la température sur la cinétique de séchage d'échantillons initialement non saturés (longueur des échantillons = 80 mm ; épaisseur des échantillons = 10 mm)

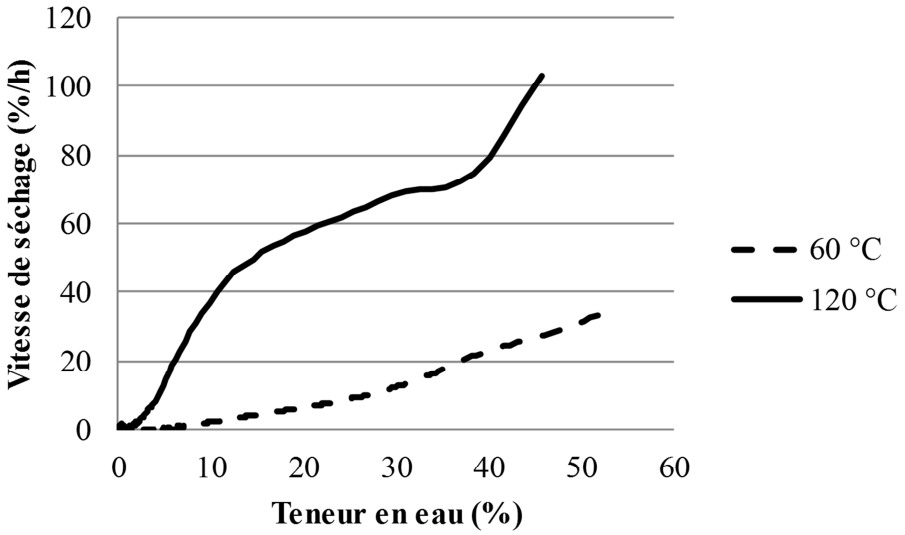


Figure 146 : Influence de la température sur la cinétique de séchage d'échantillons initialement non saturés (longueur des échantillons = 320 mm ; épaisseur des échantillons = 5 mm)

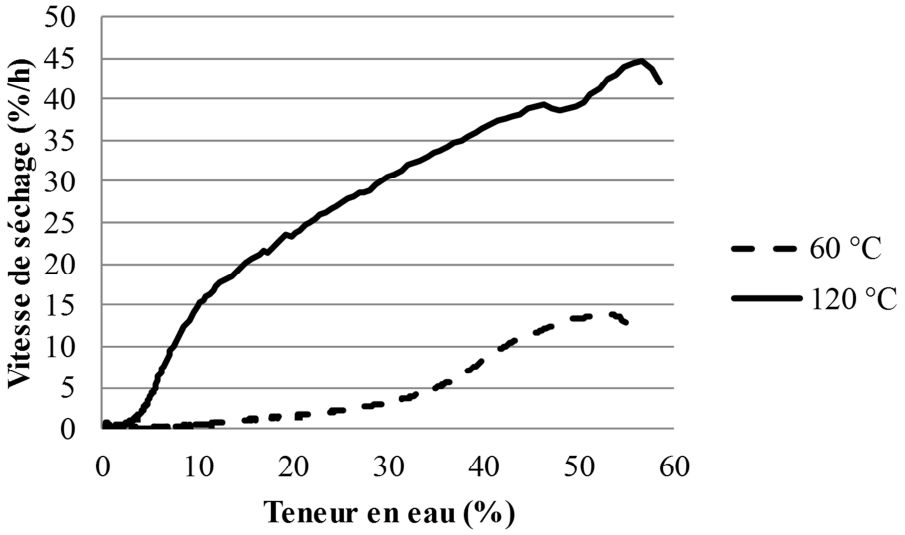


Figure 147 : Influence de la température sur la cinétique de séchage d'échantillons initialement non saturés (longueur des échantillons = 320 mm ; épaisseur des échantillons = 10 mm)

Annexe V Cinétiques expérimentales recueillies par séchage de billons d'eucalyptus

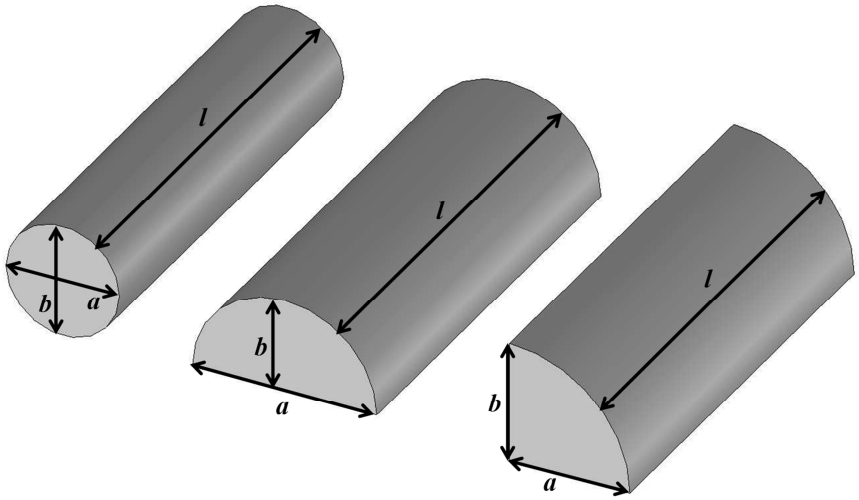


Figure 148 : Géométries d'échantillons utilisés pour l'étude du séchage de billons isolés d'eucalyptus

Les résultats présentés dans cette annexe sont obtenus par séchage de billons isolés d'eucalyptus fendus (en deux ou en quatre) ou non (Figure 148). Les dimensions des échantillons utilisés sont présentées dans le tableau suivant :

Numéro	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Type	entier	entier	demi	demi	demi	demi	quart	quart
Température (°C)	110	160	110	160	110	160	110	160
***a* (mm)**	75	80	150	143	147	132	94	92
***b* (mm)**	74	75	69	75	65	59	91	88
***l* (mm)**	270	270	270	270	270	268	272	272

Tableau 32 : Dimensions des billons d'eucalyptus séchés

Les résultats présentés ci-après sont obtenus pour quatre couples d'échantillons issus deux à deux de la même génératrice. L'un des échantillons jumeaux est séché à 110 °C tandis que l'autre est séché à 160 °C.

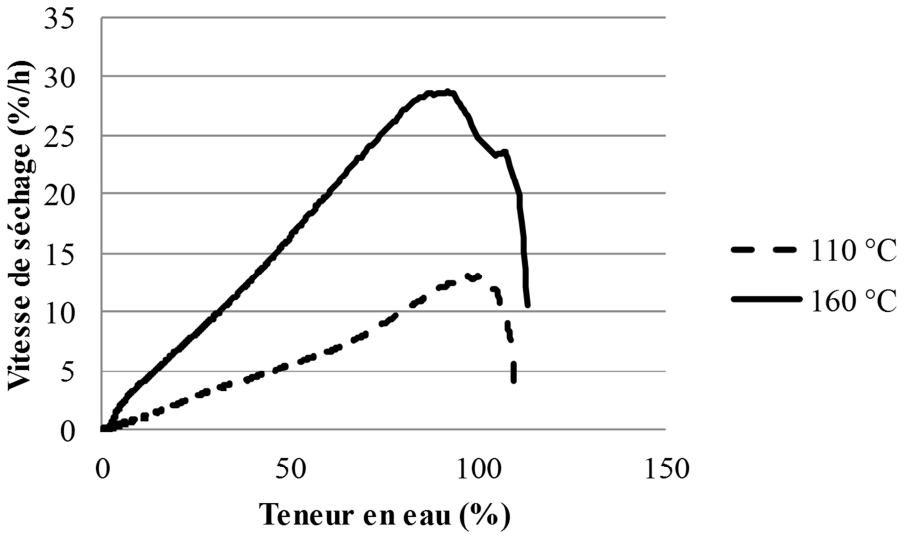


Figure 149 : Cinétiques expérimentales de séchage obtenues pour les billons entiers n°1 et 2

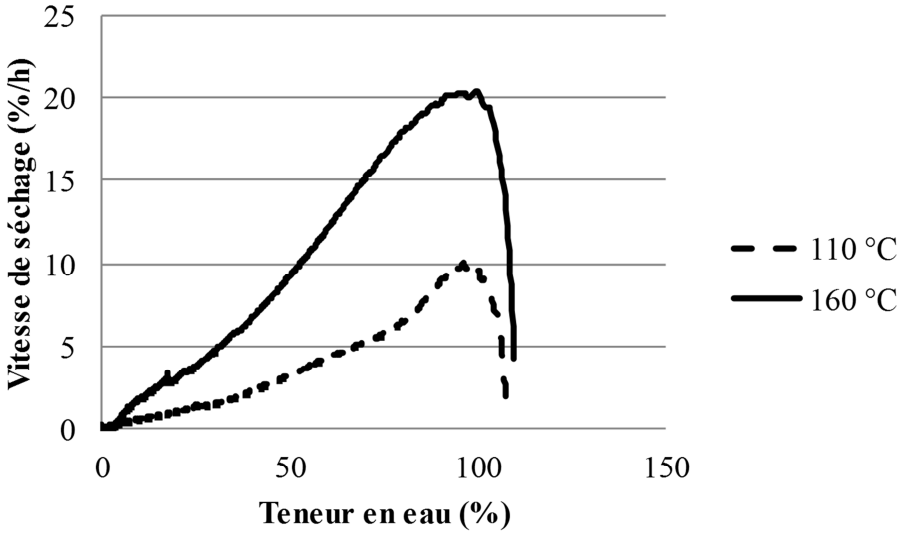


Figure 150 : Cinétiques expérimentales de séchage obtenues pour les demis billons n°3 et 4

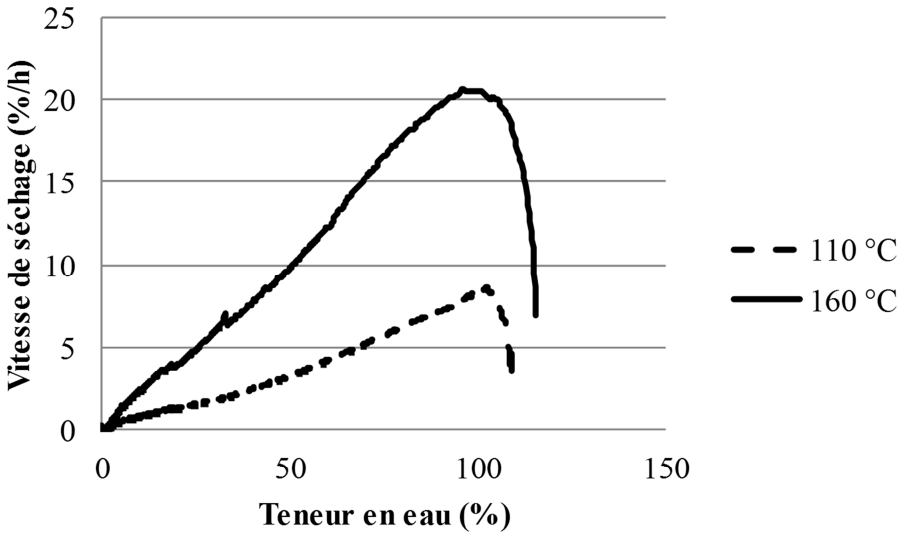


Figure 151 : Cinétiques expérimentales de séchage obtenues pour les demis billons n°5 et 6

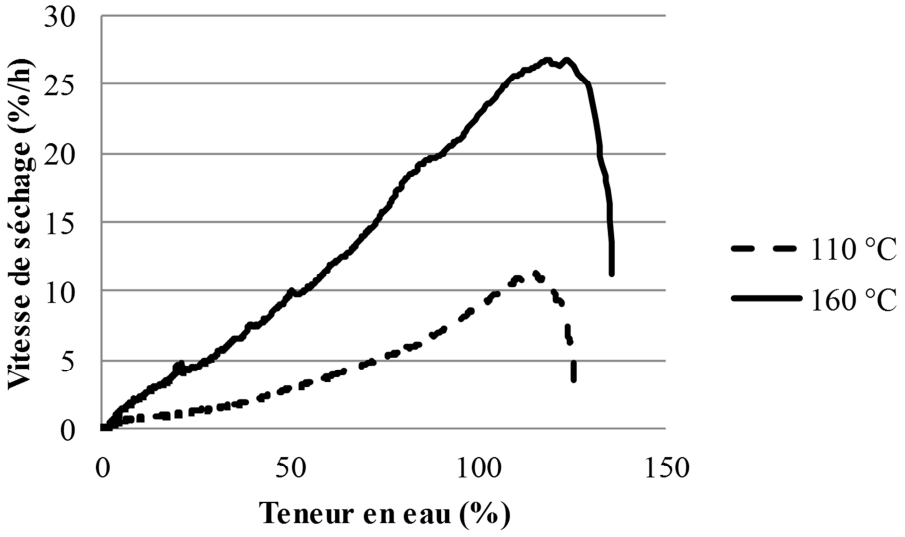


Figure 152 : Cinétiques expérimentales de séchage obtenues pour les quarts de billons n°7 et 8

Nous pouvons remarquer qu'au sein de chaque couple, l'humidité initiale de l'échantillon séché à 160 °C est plus élevée que celle de l'échantillon séché à 110 °C. Autrement dit la perte de masse, par rapport à l'état initial, est la plus importante à 160 °C (Tableau 33).

Numéro	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Température (°C)	110	160	110	160	110	160	110	160
Perte de masse (%)	52,4	**53,2**	51,8	**52,3**	52,2	**53,7**	55,7	**57,7**

Tableau 33 : Perte de masse, par rapport à l'état initial, des échantillons d'eucalyptus

Or, pour le calcul de la teneur en eau du bois, nous considérons que la masse anhydre correspond à la masse de l'échantillon en fin d'essai. Il n'est pas, *a priori*, déraisonnable d'estimer que toute l'eau a pu être évaporée après plusieurs jours à 110 °C ou 160 °C. En revanche, pour les hautes températures de séchage, il est délicat d'estimer que la perte de masse est uniquement imputable à l'évaporation d'eau.

En effet, la matière lignocellulosique peut être dégradée, ce qui engendre une perte de masse additionnelle.



Figure 153 : Aspect des échantillons d'eucalyptus en fin de séchage à 110 °C (devant) et à 160 °C (derrière)

Cette hypothèse est corroborée par l'aspect des échantillons en fin de séchage (Figure 153) : le bois noircit à haute température.

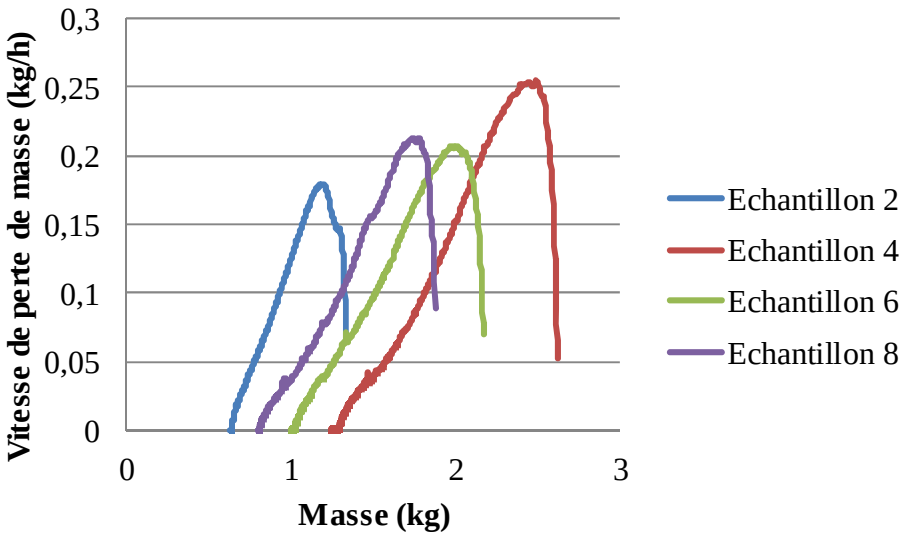


Figure 154 : Vitesse de perte de masse en fonction de la masse pour les échantillons séchés à 160 °C

Pour les essais à 160 °C, il est donc plus prudent de présenter la vitesse de perte de masse en fonction de la masse (Figure 154).

Le modèle local ne prend pas en compte, à l'heure actuelle, les réactions de pyrolyse du bois responsables d'une dégradation de la matière lignocellulosique au cours du séchage à haute température. De ce fait, nous sommes incapables de différencier la perte de masse due à l'évaporation de l'eau et celle due à ces dégradations thermiques de bois. En effet, nous ne considérons ni l'énergie consommée ou libérée par ces dégradations ni les gaz formés à partir de la matière lignocellulosique. Il serait souhaitable d'ajouter une équation conservation supplémentaire au système pour améliorer la concordance entre les cinétiques expérimentales et simulées. À ce titre, une étude comparative peut être menée entre notre modèle semi-analytique et un modèle numérique de séchage combiné à un module de réactions chimiques de pyrolyse (Peters et Bruch, 2003 ; Rousset *et al.*, 2006).

Annexe VI Mise en œuvre du modèle original de Van Meel

Nous décrivons ici la méthode d'identification des paramètres du modèle original de Van Meel et la discrétisation de l'Equation 2.1.

Identification de la courbe caractéristique de séchage

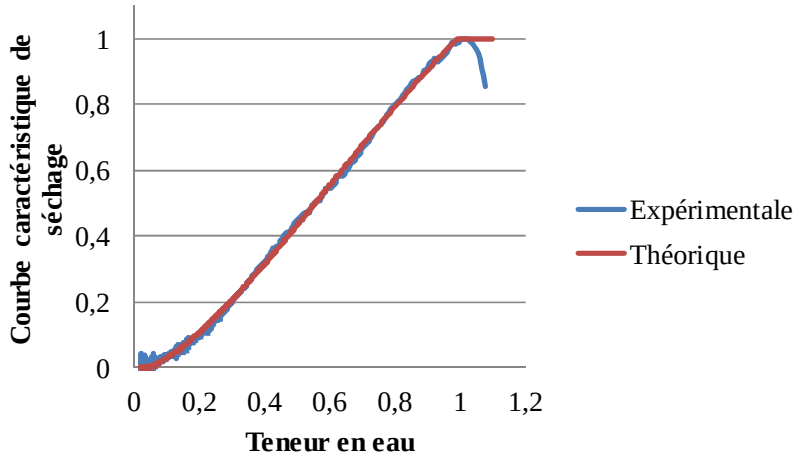


Figure 155 : Identification de la courbe caractéristique de séchage pour une planchette de hêtre (80×10×100 mm) à 60 °C

La méthode d'identification de la courbe caractéristique de séchage (g) est identique à celle utilisée dans le Chapitre 2 pour identifier l'activité adimensionnelle. Nous calculons dans un premier temps les valeurs expérimentales de g (Figure 155) en divisant la vitesse instantanée de séchage par la valeur maximale enregistrée (Equation 2.1). Puis, on définit l'expression de la fonction g théorique. Nous retenons ici la combinaison de fonctions de type puissance suivante :

$$g(\phi) = \frac{A' \times \phi^{B'} + C' \times \phi^{D'}}{A' + D'} \qquad \text{(VI.1)}$$

Enfin, nous optimisons les valeurs des paramètres A', B', C', D' et X_{cr} (Tableau 34) au moyen du Solver de *Microsoft Excel* en minimisant la fonction χ (Equation 2.32).

Paramètre	60 °C	120 °C
X_{cr} (%)	99,3	100,4
A'	2,97	$7{,}61\times10^{-1}$
B'	1,51	9,80
C'	-1,18	4,04
D'	2,41	$7{,}90\times10^{-1}$

Tableau 34 : Valeurs des paramètres de la courbe caractéristique de séchage pour une planchette de hêtre (80×10×100 mm)

La Figure 155 montre une excellente superposition des courbes expérimentale et théorique lors de la première et seconde phase de séchage. En revanche, la phase de mise en régime est exclue, par la formulation, du modèle original de Van Meel. Ceci explique une telle différence entre les courbes expérimentale et théorique au cours de cette période. On doit donc s'attendre à une faible concordance entre la cinétique expérimentale et celle simulée par ce modèle original de Van Meel au début du séchage.

Discrétisation du modèle

Comme pour le modèle étendu, l'Equation 2.1 est discrétisée dans le temps via un schéma totalement explicite (Equation VI.2). L'état du système et les flux sont supposés constants entre les instants *t* (inclus) et *t+⊿t* (exclus).

$$\frac{\overline{X}(t+\Delta t)-\overline{X}(t)}{\Delta t}=\overset{\bullet}{X}_{\max}\times g\left(\phi(t)\right)\Leftrightarrow \overline{X}(t+\Delta t)=\overline{X}(t)+\overset{\bullet}{X}_{\max}\times g\left(\phi(t)\right)\times\Delta t \qquad \text{(VI.2)}$$

Pour simuler le séchage, cette équation est incrémentée pas à pas au moyen de *Microsoft Excel 2007*.

Annexe VII Estimation des pertes de charges à travers un milieu granulaire par l'équation d'Ergun

Formulation

En connaissant les caractéristique d'un milieu granulaire placé dans une conduite et du gaz qui le travers, nous souhaitons estimer la perte de charge dans ce milieu. Pour ce faire, nous utilisons l'équation suivante (Ergun, 1952) :

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150 \times \bar{v}_{g,conduit\,vide} \times \mu_g}{\left(\Psi \times D_{shpère\,corespondante}\right)^2} \times \frac{\left(1-\Phi\right)^2}{\Phi^3} + 1,75 \times \frac{\rho_g \times \left(\bar{v}_{g,conduit\,vide}\right)^2}{\Psi \times D_{shpère\,corespondante}} \times \frac{1-\Phi}{\Phi^3} \quad \text{(VII.1)}$$

Avec : μ_g, la viscosité dynamique de l'air ($2,10\times10^{-5}$ kg.m^{-1}.s^{-1} à 350 K)

Φ, la porosité macroscopique du milieu granulaire (0,60 dans notre cas)

Ψ, la sphéricité des particules du milieu (0,63 dans notre cas) :

$$\Psi = \frac{\pi^{1/3} \times \left(6 \times V_{part}\right)^{2/3}}{Surf_p} \quad \text{(VII.2)}$$

$D_{sphère\ correspondante}$, le diamètre de la sphère ayant le même volume que les particules du milieu ($16,1\times10^{-5}$ m dans notre cas) :

$$D_{shpère\,corespondante} = \left(\frac{6 \times V_p}{\pi}\right)^{1/3} \quad \text{(VII.3)}$$

L, la longueur de milieu granulaire traversé (0,72 m dans notre cas).

Dimensionnement du ventilateur

On souhaite avoir une vitesse de 1 m.s^{-1} dans le lit fixe de plaquette :

$$\bar{v}_{g,conduit\,vide} = \bar{v}_{g,tas} \times \Phi \quad \text{(VII.4)}$$

La vitesse dans le conduit vide est de 0,6 m.s^{-1}. Compte tenu du diamètre de 400 mm du tube, ceci correspond à un débit volumique de 271 m^3.h^{-1}. À partir de l'Equation VII.1, nous en déduisons une perte de charge de 93,2 Pa.

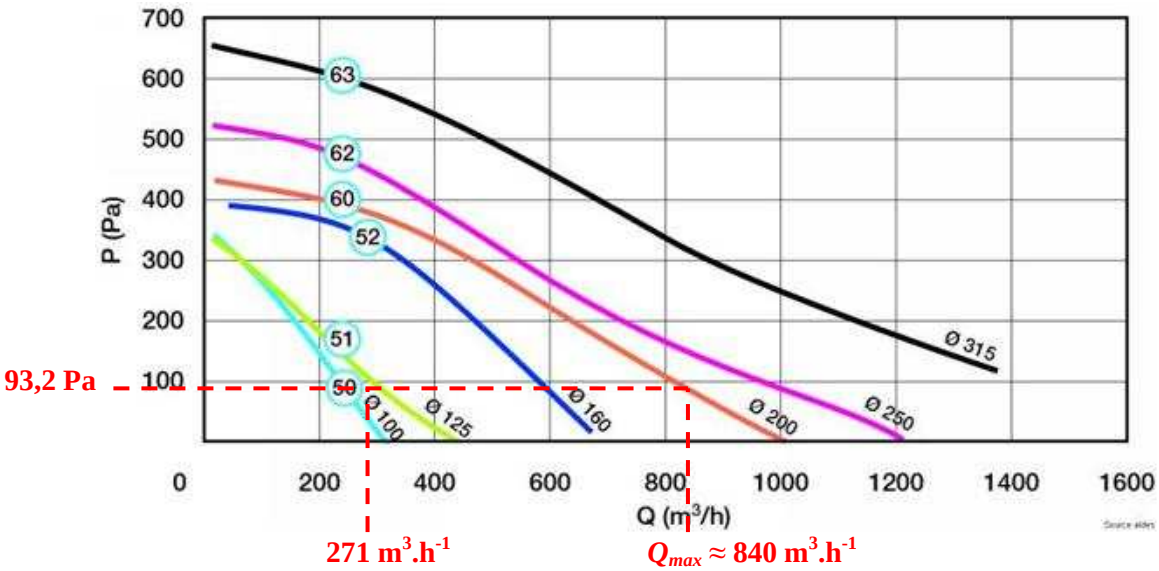


Figure 156 : Courbes aérauliques établies selon la norme NF-E 51.705 (Source Aldes)

D'après la Figure 156, le ventilateur choisi permet largement d'atteindre le débit choisi.

Bibliographie

ABRAF (2010). *Statistical year book*, 127 p.

ADEME (2005). *La récolte raisonnée des rémanents en forêt, guide pratique*, 35 p.

Agoua, E. (2001). *Diffusivité et perméabilité du bois : validation de méthodologies expérimentales et prise en compte de paramètres morphologiques simples pour la modélisation phyique*, Thèse de doctorat, ENGREF, 173 p.

Almeida, G., Brito, J.O. et Perré, P. (2009). *Changes in wood-water relationship due to heat treatment assessed on micro-samples of three Eucalyptus species*, Holzforschung, Volume 63 (1), pp. 80-88

Almeida, G., Brito, J.O. et Perré, P. (2010). *Alterations in energy properties of eucalyptus wood and bark subjected to torrefaction: the potential of mass loss as a synthetic indicator*, Bioresource Technology, Volume 101 (24), pp. 9778-9784

Arlabosse, P. (2008). *Séchage industriel - Aspects pratiques*, Techniques de l'ingénieur, 24 p.

Ast, J. (2009). *Étude de l'évolution des caractéristiques physico-chimiques des plaquettes forestières en fonction des modalités de stockage et de séchage*, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy 1, 209 p.

BaltCarbon. *Introduction to the method of Lambiotte Pyrolysis*, (http://www.baltcarbon.lv/?mode=techn&lang=en)

Basilico, C. (1985). *Le séchage convectif à haute température du bois massif : étude des mécanismes de transfert de chaleur et de masse*, Thèse de doctorat, INPL, 222 p.

Basirat-Tabrizi, H., Saffar-Avval, M. et Assarie, M.R. (2002). *Two dimensional mathematical model of a packed bed dryer and expérimentation*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Volume 216 (2), pp. 161-168

Ben Nasrallah, S. et Perré, P. (1988). *Detailed study of a model of heat and mass transfer during convective drying of porous media*, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 31 (5), pp. 957-967

Bergman, P.C.A., Boersma, A.R., Kiel, J.H.A., Prins, M.J., Ptasinski, K.J. et Janssen, F.J.J.G. (2005). *Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass*, 50 p.

Berner, E.K. et Berner, R.A. (1996). *Global environment: Water, air and geochemical cycles*, Prentice Hall, 376 p.

Bird, R.B., Stewart, W.E. et Lightfoot, E.N. (2002). *Transport Phenomena*, 2ème édition, John Wiley & Sons, 912 p.

Bourque, P.A. (2010). *Planète Terre*, Consulté le 03/02/2010 (http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html)

BP (2010). *Statistical review of world energy*, 45 p.

Broust, F., Girard, P. et Van de Steene, L. (2008). *Biocarburants de seconde génération*, Techniques de l'ingénieur, 13 p.

Broust, F., Mauviel, G., Quignard, A., Boissonnet, G., Bensakhria, A., Bellot, C., Bourgogne, M., Martin, G. et Bridgwater, A.V. (2010). *Preconditioning of biomass through fast pyrolysis for different biofuels applications: outcomes of the project PRECOND*, Proceedings of the 18th European Biomass Conference and Exhibition, pp. 14-19

Bryden, M.K. et Hagge, M.J. (2003). *Modeling the combined impact of moisture and char shrinkage on the pyrolysis of a biomass particle*, Fuel, Volume 82 (13), pp. 1633-1644

Chen, S. et Whitaker, S. (1986). *Moisture distribution during the constant rate drying period for unconsolidated porous media: failure of the diffusion theory*, Proceedings of the 5th International Drying Symposium, pp. 39-48

Chen, X.D. (2005). *A discussion on a generalized correlation for drying rate modeling*, Drying Technology, Volume 23 (3), pp. 415-426

Chiaramonti, D., Oasmaa, A. et Solantausta, Y. (2007). *Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 11 (6), pp. 1056-1086

CIRAD (2006). *Torréfaction et conditionnement de la biomasse en vue de l'injection dans un réacteur de gazéification sous pression*, Consulté le 13/02/2011 (http://www.cirad.fr/ur/biomasse_energie/projets/projets/torbigap)

Colin, J., Rémond, R. et Perré, P. (2008). *Mise au point d'un four de traitement thermique et étude de la pyrolyse ménagée du bois*, Séminaire RP2E, Nancy - France, 9 p.

Commissariat général du développement durable (2010). *Chiffres clés de l'énergie*, 38 p.

Czernik, S. et Bridgwater, A.V. (2004). *Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil*, Energy & Fuels, Volume 18, pp. 590-598

Deglise, X. et Donnot, A. (2004). *Bois énergie*, Techniques de l'ingénieur, 21 p.

Demirbas, A. (1997). *Calculation of higher heating values of biomass fuels*, Fuel, Volume 76 (5), pp. 431-434

Dias De Oliveira, M.E., Vaughan, B.E. et Rykiel Jr., E.J. (2005). *Ethanol as fuel: energy, carbon dioxide balances, and ecological footprint*, Bioscience, Volume 55 (7), pp. 593-602

EIA (2010). *International energy statistics*, (http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject)

Ergun, S. (1952). *Fluid Flow Through Packed Columns*, Chemical Engineering Progress, Volume 48, pp. 89-94

FAO (1985). *Industrial charcoal making*, Consulté le 10/02/2011 (http://www.fao.org/docrep/x5555e/x5555e00.htm)

FAO (1987). *Simple technologies for charcoal making*, Consulté le 10/02/2011 (http://www.fao.org/docrep/x5328e/x5328e00.htm)

FAO (1997). *Renewable biological systems for alternative sustainable energy production*, FAO Agricultural Services Bulletin, 128 p.

FAO (2006). *Normes internationales pour les mesures phytosanitaires NIMP n° 15 : directives pour la réglementation de matériaux d'emballages à base de bois dans le commerce international*, 11 p.

FAO (2011). *ForesSTATt 2009*, Consulté le 06/02/2011 (http://faostat.fao.org/site/626/default.aspx)

Field, C.B. (1998). *Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components*, Science, 281, pp.237-240

Fontaine, B. (2009). *Traduction de la liste des évaluations faites par le centre international sur le cancer sur les risques de cancérogénicité pour l'homme et commentaire sur l'utilisation des agents cités*, 33 p.

Guiatrd, D. (1987). *Mécanique du bois et composites*, Cépaduès, 238 p.

Guo, Y., Xu, J., Zhang, Y., Xu, H., Yuan, Z. et Li, D. (2010). *Medium optimization for ethanol production with Clostridium autoethanogenum with carbon monoxide as sole carbon source*, Bioresource Technology, Volume 101 (22), pp. 8784-8789

Hall, C.A.S., Balogh, S. et Murphy, D.J.R. (2009). *What is the minimum EROI that a sustainable society must have?*, Energies, Volume 2, pp. 25-47

Hamelinck, C.N., Suurs, R.A.A. et Faaij, A.P.C. (2005). *International bioenergy transport costs and energy balance*, Biomass and Bioenergy, Volume 29, pp. 114-134

Hammerschlag, R. (2006). *Ethanol's energy return on investment: a survey of the literature 1990-Present*, Environmental Science & Technology, Volume 40, pp.1744-1750

Houngan, A.C., Jacquin, P. et Perré, P. (2006). *Accurate determination of mass diffusivity in wood from absorption/desorption data obtained with a magnetic suspension balance*, Proceedings of the 15th International Drying Symposium, Volume A, pp. 107-113

IEA (2008). *Wolrd Energy Outlook*, 569 p.

IEA Bioenergy (2010). *Annual report 2010*, 136 p.

IFN (2009). *Cartographie des types forestiers departementaux IFN en Meurthe-et-Moselle*, Consulté le 24/11/2010 (http://www.ifn.fr/carto/carto/afficherCarto/54)

IFN (2010). *Données statistiques par essence dans les forêts de production de Meurthe-et-Moselle*, Consulté le 24/10/2010 (http://www.ifn.fr/spip/?rubrique17)

IFP (2008). *Charbon : ressources, réserves et production*, 9 p.

Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Brergman, T.L. et Lavine, A.S. (2007). *Fundamentals of heat and mass transfers*, 6ème édition, John Wiley & Sons, 997 p.

IPCC (2007). *Climate change, synthesis report*, 4th assessment, 104 p.

Jodin, P. (1994). *Le bois, matériau d'ingénierie*, A.R.BO.LOR., 433 p.

Joly, P. et More-Chevalier, F. (1980). *Théorie, pratique et économie du séchage des bois*, H. Vial, 203 p.

Keylwerth, R. (1969). *Praktische Untersuchungen zum Holzfeuchtigkeits-Gleichgewicht*, European Journal of Wood and Wood Products, Volume 27 (8), pp. 285-290

Kouchadé, A.C. (2004). *Détermination en routine de la diffusivité massique dans le bois par la méthode inverse à partir de la mesure électrique en régime transitoire*, Thèse de doctorat, ENGREF, 160 p.

Kump, L.R., Kasting, J.K. et Crane, R.G. (1999). *The Earth System*, Prentice Hall, 368 p.

Ledebur, A. (1895). *Manuel théorique et pratique de la métallurgie du fer, Tome 1*, Librairie polytechnique Baudry et Cie, 534 p.

Levy, C. (1996). *Les techniques de cogénération*, Les techniques de l'ingénieur, 25 p.

Li, X.R., Koseki, H. et Momota, M. (2005). *Evaluation of danger from fermentation-induced spontaneous ignition of wood chips*, Journal of Hazardous Materials, Volume 135 (1-3), pp. 15-20

Lide, D.R. (1993). *Handbook of chemistry and physics*, 74ème édition, CRC Press,

Mauget, B. et Perré, P. (1999). *A large displacement formulation for anisotropic constitutive laws*, European Journal of Mechanics. A. Solids, Volume 18 (5), pp. 859-877

McIlveen-Wright, D.R., Williams, B.C. et McMullan, J.T. (2001). *A re-appraisal of wood-fired combustion*, Bioresource Technology, Volume 76, pp. 183-190

McKendry, P. (2002a). *Energy production from biomass (part 1): overview of biomass*, Bioressource Technology, Volume 83 (1), pp. 37-46

McKendry, P. (2002b). *Energy production from biomass (part 2): conversion technologies*, Bioressource Technology, Volume 83 (1), pp. 47-54

McKendry, P. (2002c). *Energy production from biomass (part 3): gasification technologies*, Bioressource Technology, Volume 83 (1), pp. 55-63

MEDAD (2007). *Rapport du comité opérationnel n°10 du Grenelle de l'Environnement : plan de développement des énergies renouvelables à haute qualité environnementale*, 53 p.

MEEDDAT (2008). *Grenelle Environnement : réussir la transition énergétique, 50 mesures pour un développement des energies renouvelables à haute qualité environnementale*, 26 p.

Ministério de Minas e Energia (2010). *Balanço energético nacional*, 276 p.

Mohan, D., Pittman, C.U.J. et Steele, P.H. (2006). *Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review*, Energy & Fuels Volume 20, pp. 848-889

Moletta, R. (2008). *Méthanisation de la biomasse*, Techniques de l'ingénieur, 21 p.

Mujumdar, A.S. (2007). *Handbook of industrial drying*, 3ème édition, CRC Press, 1280 p.

Nganhou, J. (2004). *Heat and mass transfer trough a thick bed of cocoa beans during drying*, Heat and Mass Transfer, Volume 40, pp. 727-735

Núñez-Regueria, L., Rodríguez-Añon, J.A., Proupín-Castiñeiras, J., Vilanova-Diz, A. et Montero-Santoveña, N. (2001). *Determination of calorific values of forest waste biomass by static bomb calorimetric*, Thermochimica Acta, Volume 371 (1-2), pp. 23-31

Pakowski, Z. (1999). *Simulation of the process of convective drying: identification of generic computation routines and their implementation in a computer code dryPAK*, Computers and Chemical Engineering, Volume 23 (Supplement), pp. 719-722

Pang, S. (1996). *External heat and mass transfer coefficients for kiln drying of timber*, Drying Technology, Volume 14 (3-4), pp. 859-871

Pang, S. (2000). *Modelling of stress development during drying and relief during steaming in Pinus radiata lumber*, Drying Technology, Volume 18 (8), pp. 1677-1696

Pang, S. (2008). *Drying of woody biomass for bioenergy: drying technologies for an integrated bioenergy plant*, Proceedings of the 16th International Drying Symposium, Volume A, pp. 25-35

Pang, S., Xu, Q. et M.M., M. (2008). *Modelling and optimisation of packed moving bed drying of woody biomass for bioenergy*, Proceedings of the 16th International Drying Symposium, Volume B, pp. 1122-1129

Patankar, S.V. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow*, Hemisphere Series on Computational Methods in Mechanics and Thermal Science, Taylor & Francis, 214 p.

Perré, P. (1987). *Le séchage convectif de bois de résineux ; choix, validation et utilisation d'un modèle*, thèse de doctorat, Université Denis Diderot Paris VII, 245 p.

Perré, P. (2007a). *Fundamentals of wood drying*, A.R.BO.LOR., 366 p.

Perré, P. (2007b). *Multiscale aspects of heat and mass transfer during drying*, Transport in Porous Media, Volume 66 (1-2), pp. 59-76

Perré, P. et Degiovanni, A. (1990). *Simulation par volumes finis des transferts couplés en milieux poreux anisotropes: séchage du bois à basse et à haute température*, Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 33 (11), pp. 2463-2478

Perré, P. et Karimi, A. (2002). *Fluid migration in two species of beech (Fagus silvatica and Fagus orientalis): a percolation model able to account for macroscopic measurements and anatomical observations*, Maderas. Ciencia y tecnología, Volume 4 (1), pp. 50-68

Perré, P. et Passard, J. (1995). *A control-volume procedure compared with the finite-element method for calculating stress and strain during wood drying*, Drying Technology, Volume 13 (3), pp. 635-660

Perré, P. et Rémond, R. (2006). *A Dual scale computational model of kiln wood drying including single board and stack level simulation*, Drying Technology, Volume 4 (1-6), pp. 1069-1074

Perré, P. et Thiercelin, F. (2006). *Evidence of dual scale porous mechanism during fluid migration in hardwood species. (I) Using the attenuation of a polychromatic X-ray beam to determine the evolution of moisture content during imbibition of beech*, Chinese Journal of Chemical Engineering, Volume 12 (6), pp. 773-782

Perré, P. et Turner, I.W. (1999). *A 3-D version of TransPore: a comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media*, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 42 (24), pp. 4501-4521

Perry, R.H. et Chilton, C.H. (1973). *Chemical Engineer Handbook*, 5ème édition, McGraw Hill Book,

Peters, B. et Bruch, C. (2003). *Drying and pyrolysis of wood particles: experiment ans simulation*, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Volume 70 (2), pp.233-250

Pierre, F., Almeida, G., Brito, J.O. et Perre, P. (2010). *Grindability Behavior of Torrefied Biomass for Energy Purpose*, Proceedings of the 18th European Biomass Conference and Exhibition, pp. 375-378

Pierre, F., Almeida, G., Brito, J.O. et Perré, P. (2011). *Influence of torrefaction on some chemical and energy properties of maritime pine and pedunculate oak*, BioResources, Volume 6 (2), 1204-1218

Pimentel, D., Patzek, T. et Cecil, G. (2007). *Ethanol production: energy, economic, and environmental losses*, Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, Volume 189, pp. 25-41

Pimentel, D. et Patzek, T.W. (2005). *Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; Biodiesel production using soybean and sunflower*, Volume 14 (1), pp. 65-76

Prat, M. (1991). *2D modelling of drying of porous media: influence of edge effects at the interface*, Drying Technology, Volume 9 (5), pp. 1181-1208

Repellin, V., Govin, A., Rolland, M. et Guyonnet, R. (2010). *Energy requirement for fine grinding of torrefied wood*, Biomass and Bioenergy, 34 (7), pp. 923-930

Rogaume, Y. (2005a). *Production de chaleur à partir du bois : combustible et appareillage*, Techniques de l'ingénieur, 15 p.

Rogaume, Y. (2005b). *Production de chaleur à partir du bois : installations industrielles*, Techniques de l'ingénieur, 13 p.

Rousset, P., Turner, I., Donnot, A. et Perré, P. (2006). *Choix d'un modèle de pyrolyse ménagée du bois à l'échelle de la microparticule en vue de la modélisation macroscopique*, Annals of forest science, Volume 63 (2), pp. 213-229

Rowell, R.M., Han, J.S. et Rowell, J.S. (2000). *Characterization and factors effecting fiber properties*, Natural Polymers and Agrofibers Composites, pp. 115-134

Saastamoinen, J. et Impola, R. (1997). *Drying of biomass particles in fixed and moving beds*, Drying technology, Volume 15 (6-8), pp. 1919-1929

Saastamoinen, J.J., Taipale, R., Horttanainen, M. et Sarkomaa, P. (2000). *Propagation of the ignition front in beds of wood particles*, Combustion and Flame, Volume 123 (1-2), pp. 214-226

Salin, J.G. (1992). *Numerical prediction of checking during timber drying and a new mechano-sorptive creep model*, Holz als Roh-und Werkstoff, Volume 50 (5), pp. 195-200

Samolada, M.C., Baldaufb, W. et Vasalos, I.A. (1998). *Production of a bio-gasoline by upgrading biomass flash pyrolysis liquids via hydrogen processing and catalytic cracking*, Fuel, Volume 77 (14), pp. 1667-1675

Sander, A. (2007). *Thin layer drying of porous mate-rials: selection of the appropriate model and rela-tionships between thin-layer models parameters*, Chemical Engineering and Processing, Volume 46, pp. 1324-1331

Schweingruber, F.H. (1978). *Anatomie microscopique du bois*, Zürcher AG, 226 p.

Siau, J.F. (1984). *Transport processes in wood*, Springer-Verlag, 245 p.

Skaar, C. (1988). *Wood-water relations*, Springer-Verlag, 283 p.

Solomon, B.D. (2010). *Biofuels and sustainability*, Annals of the New York Academy of Science, Volume 1185, pp. 119-134

Ståhl, M., Granström, K., Berghel, J. et Renström, R. (2004). *Industrial processes for biomass drying and their effects on the quality properties of wood pellets*, Biomass and Bioenergy, Volume 27, pp. 621-628

Stevanovic, T. et Perrin, D. (2009). *Chimie du bois*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 242 p.

Tarmian, A. et Perré, P. (2009). *Air permeability in longitudinal and radial directions of compression wood of Picea abies L. and tension wood of Fagus sylvatica L.*, Holzforschung, Volume 63 (3), pp. 352-356

Tremblay, C., Cloutier, A. et Fortin, Y. (2000). *Experimental determination of the convective heat and mass transfer coefficients for wood drying*, Wood Science and Technology, Volume 34 (3), pp. 253-276

Turner, I.W. (1996). *A two-dimensional orthotropic model for simulating wood drying processes*, Applied Mathematical Modelling, Volume 20 (1), pp. 60-81

UN (1997a). *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, 20 p.

UN (1997b). *Kyoto Protocol to the United Nations framework convention on climate Change*, 20 p.

UN Statistic Division (2010). *Carbon dioxide emissions*, Consulté le 05/02/2011 (http://unstats.un.org/unsd/mdg/SeriesDetail.aspx?srid=749)

Van Meel, D.A. (1958). *Adiabatic convection batch drying with recirculation of air*, Chemical Engineering Science, Volume 9, pp. 36-44

Waldner, M.H. et Vogel, F. (2005). *Renewable production of methane from woody biomass by catalytic hydrothermal gasification*, Industrial & Engineering Chemistry Research, Volume 44, pp. 4543-4551

Whitaker, S. (1972). *Forced convection heat transfer correlations for flow in pipes, past flat plates, single cylinders, single spheres, and for flow in packed beds and tube bundles*, AIChE Journal, Volume 18 (2), pp. 361-371

Whitaker, S. (1977a). *Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media: a theory of drying*, Advances in Heat Transfer, Volume 13, pp.119-203

Whitaker, S. (1977b). *Toward a diffusion theory on drying*, , Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, Volume16 (4), pp.408-414

Wittel, F.K., Dill-Langer, G. et Kröplin, B.H. (2005). *Modeling of damage evolution in softwood perpendicular to grain by means of a discrete element approach*, Computational Materials Science, Volume 32 (3-4), pp. 594-603

Wittel, F.K., Kun, F., Kröplin, B.H. et Herrmann, H.J. (2003). *A study of transverse ply cracking using a discrete element method*, Computational Materials Science, Volume 28 (3-4), pp. 608-619

Wittel, F.K., Schulte-Fischedick, J., Kun, F., Kröplin, B.H. et Frieß, M. (2003). *Discrete element simulation of transverse cracking during the pyrolysis of carbon fibre reinforced*

plastics to carbon/carbon composites, Computational Materials Science, Volume 28 (1), pp. 1-15

World Energy Council (2007). *Survey of Energy Resources*, 586 p.

Younesi, H., Najafpour, G. et Mohamed, A.R. (2005). *Ethanol and acetate production from synthesis gas via fermentation processes using anaerobic bacterium, Clostridium ljungdahlii*, Biochemical Engineering Journal, Volume 27 (2), pp. 110-119

Zhang, S., Li, T. et Ren, Z. (2005). *Upgrading of liquid fuel from the pyrolysis of biomass*, Bioresource Technology, Volume 96 (5), pp. 545-550

Zhen-Xiang, G. et Mujumdar, A.S. (2008). *Software for design and analysis of drying systems*, Drying Technology, Volume 26 (7), pp. 884-894

SÉCHAGE EN CONTINU DU BOIS ÉNERGIE COMME MOYEN DE PRÉCONDITIONNEMENT EN VUE DE SA CONVERSION THERMOCHIMIQUE : APPROCHES EXPÉRIMENTALE ET NUMÉRIQUE

Les voies sèches de valorisation du bois énergie sont de plus en plus exigeantes vis-à-vis de la qualité de la matière première et notamment quant à sa teneur en eau. Ainsi, une étape intermédiaire de préconditionnement, sur site industriel, tend à se développer. La mise en œuvre de séchoirs en continu est alors séduisante de par son faible coût et sa parfaite intégration dans la ligne de production. Cependant, elle n'est pas sans écueil : la variabilité de la biomasse et l'hétérogénéité des conditions climatiques au sein du séchoir rendent fastidieux le dimensionnement du séchoir et de la source de chaleur associée d'une part et la maximisation du flux matière d'autre part.
Notre étude a pour ambition de développer un outil informatique d'aide à la conception et à l'optimisation de séchoirs en continu traversés par un lit condensé de particules de bois. Pour y parvenir, nous associons une approche expérimentale et une approche numérique du procédé. La démarche scientifique s'articule autour de deux échelles représentatives :

- A l'échelle de la particule de bois, le modèle de Van Meel, reposant sur le concept de courbe caractéristique de séchage, est étendu : le couplage entre transferts de chaleur et de masse est rendu explicite. Nous disposons dès lors d'un modèle réactif et prédictif en conditions climatiques variables. Parallèlement, un premier dispositif expérimental original est conçu et construit pour l'étude du séchage de particules de bois isolées. Les données recueillies sont alors analysées en vue d'alimenter en paramètres et de valider le modèle semi-analytique ;
- A l'échelle du séchoir, une modélisation double-échelle est adoptée pour tenir compte de l'évolution des conditions climatiques. Un soin particulier est apporté à la modélisation, se voulant être la plus proche possible des installations existantes : à ce titre, les transferts au niveau de la paroi du séchoir sont pris en compte, ainsi que la variabilité des particules de bois. Parallèlement, un second dispositif expérimental original est conçu et construit pour l'étude du séchage de particules disposées en lit. Les données recueillies sont alors confrontées aux simulations du modèle double-échelle.

La validation du modèle s'étant révélée probante tant à l'échelle de la particule qu'à celle du séchoir, une utilisation du code pour l'aide à la conception et à l'optimisation d'installations industrielles a pu être envisagée. Ainsi, ce travail s'achève-t-il par deux études de cas à travers lesquelles nous explorons le potentiel du modèle pour maximiser le flux matière tout en garantissant la qualité du produit et l'efficacité énergétique du séchoir.

Mots clefs : *biomasse, bois énergie, préconditionnement, séchage, transferts couplés de chaleur et de masse, particule, courbe caractéristique de séchage, modélisation multi-échelle, étude expérimentale.*