



# Modélisation et conception préliminaire d'un séchoir solaire pour bois de pin avec stockage d'énergie

David Luna Sanchez

## ► To cite this version:

David Luna Sanchez. Modélisation et conception préliminaire d'un séchoir solaire pour bois de pin avec stockage d'énergie. Sciences de l'ingénieur [physics]. Arts et Métiers ParisTech, 2008. Français. NNT : 2008ENAM0017 . pastel-00005205

**HAL Id: pastel-00005205**

**<https://pastel.hal.science/pastel-00005205>**

Submitted on 23 Jul 2009

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Ecole doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur

# THÈSE

pour obtenir le grade de

**Docteur**

de

**l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

**Spécialité "Conception"**

*présentée et soutenue publiquement  
par*

**David LUNA-SANCHEZ**

le 10 juillet 2008

**MODELISATION ET CONCEPTION PRELIMINAIRE D'UN  
SECHOIR SOLAIRE POUR BOIS DE PIN AVEC STOCKAGE  
D'ENERGIE**

*Directeur de thèse : Jean-Pierre NADEAU*

*Co-encadrement de la thèse : Yves JANNOT*

Jury :

|                                                                                 |            |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>M. Wahbi JOMAA</b> , Professeur, TREFLE, Université Bordeaux 1 .....         | Président  |
| <b>M. Antoine COLLIGNAN</b> , Professeur, IRC, Montpellier SupAgro.....         | Rapporteur |
| <b>M. Abdelaziz MIMET</b> , Professeur, Université Tétouan Maroc .....          | Rapporteur |
| <b>Mme. Gabriela ALVAREZ</b> , Professeur, CENIDET, Cuernavaca, Mexique .....   | Examineur  |
| <b>M. Jean-Pierre NADEAU</b> , Professeur, TREFLE, ENSAM, Bordeaux Talence .... | Examineur  |

**Laboratoire TREFLE UMR 8508**  
*ENSAM, CER de Bordeaux Talence*



# Remerciements

Tout d'abord, j'adresse mes remerciements au laboratoire **TREFLE** pour l'accueil reçu lors du déroulement de mes travaux de thèse, notamment au directeur actuel, **Eric ARQUIS**, ainsi qu'à l'ancien directeur **Jean-Rodolphe PUIGGALI**.

Je remercie de manière très spéciale mon directeur de thèse, **Jean-Pierre NADEAU** pour sa disponibilité, sa patience et sa compréhension, ses conseils et pour la direction de ce travail. De même, j'adresse un merci reconnaissant à **Yves JANNOT** qui m'a appris à affronter et dépasser les différents obstacles trouvés lors du déroulement de ce travail.

Au professeur **Antoine COLLIGNAN** de SupAgro Montpellier et au professeur **Abdelaziz MIMET** de l'Université de Tétouan, Maroc, merci pour vos judicieux commentaires et pour l'enrichissement que vous avez apporté à mon travail. Je remercie également le professeur **Wahbi JOMAA** du TREFLE pour avoir présidé le jury et le docteur **Gabriela GARCIA ALVAREZ** du CENIDET, à Cuernavaca au Mexique, pour avoir traversé l'atlantique pour participer au jugement de ma thèse.

J'ai eu la chance d'appartenir à l'équipe « **Systèmes Energétiques et Conception** » du laboratoire TREFLE et d'apprendre à utiliser les outils de conception et innovation de systèmes techniques. Je précise une attention particulière à **Jérôme PAILHES** et à **Patrick SEBASTIAN** pour leur soutien.

J'adresse toute ma reconnaissance au personnel administratif du laboratoire TREFLE pour la disponibilité et l'amitié qui vous m'avez montré lors de mon séjour au sein du labo. De manière particulière, je remercie à **Sylviane BOYA** et **Muriel BORE** pour l'intérêt montré envers les mexicains et pour faciliter mon séjour au TREFLE. Merci à **Marian ANTOS** pour m'aider à résoudre toutes les contraintes informatiques retrouvées.

**GRACIAS AMIGOS** aux **doctorants** du TREFLE pour l'amitié et pour le soutien montré lors de mon passage par le labo.

Une attention particulière à la **famille NADEAU** pour leur accueil et pour l'intérêt montré envers les membres de ma famille.

A tous les amis membres de l'association **AFMA**, je vous dis un grand merci pour tout ce que vous avez fait pour nous.

Enfin, ce travail n'aurait pu aboutir sans le soutien de ma famille, mon épouse **Rocio VILLEDA**, ma fille **Abril LUNA-VILLEDA** et mon fils **Emiliano LUNA-VILLEDA**. Merci d'avoir été avec moi autant dans les moments difficiles que dans la joie. **Je vous dédie mes efforts.**



## TABLE DE MATIERES

|                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Introduction .....</b>                                                         | <b>1</b>  |
| <b>1 Séchoir solaire : besoin industriel et marché mexicain .....</b>             | <b>4</b>  |
| 1.1 Analyse du besoin .....                                                       | 4         |
| 1.1.1 Situations de vie du système .....                                          | 4         |
| 1.1.1.1 Situation de vie « fonctionnement jour » .....                            | 4         |
| 1.1.1.2 Situation de vie « fonctionnement nuit » .....                            | 5         |
| 1.2 Le marché du bois au Mexique .....                                            | 5         |
| 1.2.1 Analyse du Marché.....                                                      | 6         |
| 1.2.2 Les clients potentiels .....                                                | 6         |
| 1.2.3 Les concurrents possibles.....                                              | 7         |
| 1.2.4 Importance du séchage solaire .....                                         | 7         |
| 1.3 Fonction globale du système « Séchoir solaire » .....                         | 8         |
| 1.4 Critères d'appréciation « client » de la fonction globale .....               | 9         |
| 1.4.1 La Qualité, Q .....                                                         | 9         |
| 1.4.2 Le Temps de séchage, tS .....                                               | 11        |
| 1.4.3 Le coût de possession du séchoir .....                                      | 11        |
| 1.5 Cahier de charge Fonctionnel, CdCF .....                                      | 13        |
| 1.5.1 Approche fonctionnelle externe .....                                        | 13        |
| 1.5.2 Expression du Cahier de charge Fonctionnel, CdCF .....                      | 14        |
| <b>2 Séchoirs solaires à bois : Etat de l'art et évolutions prévisibles .....</b> | <b>17</b> |
| 2.1 Méthodologie d'analyse .....                                                  | 17        |
| 2.1.1 Approche Organique .....                                                    | 17        |
| 2.1.2 Lois d'évolution des systèmes techniques .....                              | 18        |
| 2.2 Etat de l'art du système « Séchoir solaire » .....                            | 20        |
| 2.2.1 Approche Organique .....                                                    | 20        |
| 2.2.2 Analyse globale de l'état de l'art.....                                     | 21        |
| 2.2.2.1 Séchoir solaire avec capteur intégré (Agencement 1).....                  | 23        |
| 2.2.2.2 Séchoir solaire avec capteur latéral semi-intégré (Agencement 2) .....    | 23        |
| 2.2.2.3 Séchoir solaire avec stockage (Agencement 3).....                         | 24        |
| 2.2.3 Tendances d'évolution des séchoirs solaires pour bois.....                  | 25        |
| 2.3 Etat d'évolution de l'unité de chauffage .....                                | 27        |
| 2.3.1 Approche Organique .....                                                    | 27        |
| 2.3.2 Analyse globale .....                                                       | 29        |
| 2.3.2.1 Evolution de l'unité sélective.....                                       | 29        |
| 2.3.2.2 Evolution de l'absorbeur .....                                            | 30        |
| 2.3.2.2.1 <i>Transformation de l'énergie</i> .....                                | 30        |
| 2.3.2.2.2 <i>Transmission de l'énergie</i> .....                                  | 31        |
| 2.3.2.2.3 <i>Transfert de l'énergie au fluide caloporteur</i> .....               | 31        |
| 2.3.2.3 Evolution de l'unité d'isolation.....                                     | 32        |
| 2.3.3 Tendances d'évolution .....                                                 | 33        |
| 2.4 Etat d'évolution de l'unité de stockage .....                                 | 34        |
| 2.4.1 Approche Organique .....                                                    | 34        |
| 2.4.2 Analyse globale .....                                                       | 38        |
| 2.4.2.1 Evolution des unités d'accumulation et de transfert .....                 | 38        |
| 2.4.2.1.1 <i>Systèmes à réservoir d'eau simple (directs)</i> .....                | 38        |
| 2.4.2.1.2 <i>Systèmes à réservoir d'eau à échangeur (indirect)</i> .....          | 39        |
| 2.4.2.1.3 <i>Systèmes à chaleur latente</i> .....                                 | 39        |

|          |                                                                                      |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4.3    | Tendances d'évolution .....                                                          | 40        |
| 2.5      | Déduction des évolutions du séchoir solaire .....                                    | 41        |
| 2.6      | Notre choix .....                                                                    | 42        |
| 2.6.1    | Le choix des composants du séchoir .....                                             | 43        |
| 2.6.1.1  | L'unité de séchage .....                                                             | 43        |
| 2.6.1.2  | L'unité de chauffage .....                                                           | 44        |
| 2.6.1.3  | L'unité de stockage .....                                                            | 44        |
| 2.6.1.4  | L'unité de chauffage (capteur à eau) .....                                           | 45        |
| 2.6.1.5  | Le Séchoir solaire .....                                                             | 45        |
| <b>3</b> | <b>Structuration du problème de conception .....</b>                                 | <b>47</b> |
| 3.1      | Définition des variables pertinentes .....                                           | 47        |
| 3.1.1    | Les différentes variables .....                                                      | 47        |
| 3.1.2    | Les Critères .....                                                                   | 47        |
| 3.1.3    | Les variables de conception .....                                                    | 47        |
| 3.1.4    | Les variables de pilotage .....                                                      | 48        |
| 3.2      | Définition des unités et variables de conception .....                               | 48        |
| 3.2.1    | Unité de chauffage : capteur à air .....                                             | 48        |
| 3.2.2    | Unité de séchage .....                                                               | 49        |
| 3.2.3    | Unité de stockage : échangeur stockeur .....                                         | 49        |
| 3.3      | Séchoir solaire et variables de pilotage .....                                       | 50        |
| 3.3.1    | Agencement des unités .....                                                          | 50        |
| 3.3.2    | Flux d'interaction .....                                                             | 50        |
| 3.3.3    | Variables d'état pertinentes .....                                                   | 52        |
| 3.3.3.1  | La température de l'air .....                                                        | 53        |
| 3.3.3.2  | La pression .....                                                                    | 53        |
| 3.3.3.3  | L'humidité de l'air .....                                                            | 53        |
| 3.3.4    | Composants d'interaction et VPi associées .....                                      | 54        |
| 3.4      | Expression des critères .....                                                        | 54        |
| 3.4.1    | Les critères d'optimisation .....                                                    | 54        |
| 3.4.2    | Les critères concepteur pour l'aide à la décision .....                              | 55        |
| 3.5      | Besoins de modélisation .....                                                        | 56        |
| 3.5.1    | Expression du critère $tS=f(W_f)$ .....                                              | 56        |
| 3.5.2    | Entités pertinentes .....                                                            | 57        |
| 3.5.3    | Travaux de modélisation .....                                                        | 57        |
|          | Milieu extérieur « météorologie » .....                                              | 57        |
| 3.5.3.1  | Milieu extérieur « planche de bois » .....                                           | 57        |
| 3.5.3.2  | Unité de séchage .....                                                               | 57        |
| 3.5.3.3  | Unité de chauffage .....                                                             | 58        |
| 3.5.3.4  | Unité de stockage .....                                                              | 58        |
| 3.6      | Qualification des modèles, PEPS .....                                                | 58        |
| 3.6.1    | Estimation de la Parcimonie .....                                                    | 59        |
| 3.6.2    | Estimation de l'Exactitude .....                                                     | 59        |
| 3.6.3    | Estimation de la Précision .....                                                     | 60        |
| 3.6.4    | Estimation du niveau de Spécialisation .....                                         | 61        |
| 3.6.5    | Qualification des modèles .....                                                      | 61        |
| 3.7      | Conclusion .....                                                                     | 62        |
| <b>4</b> | <b>Modélisation des unités .....</b>                                                 | <b>63</b> |
| 4.1      | Modèle du milieu extérieur « météorologie » .....                                    | 64        |
| 4.1.1    | Estimation de la température T et de l'humidité relative HR journalières<br>horaires | 66        |

|           |                                                                                        |     |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1.2     | Calcul de la densité de flux solaire global $G^*$ .....                                | 67  |
| 4.1.2.1   | Durée du jour.....                                                                     | 68  |
| 4.1.2.2   | Durée de l'ensoleillement.....                                                         | 70  |
| 4.1.2.3   | Rayonnement solaire au sol.....                                                        | 70  |
| 4.1.2.4   | Rayonnement solaire sur un plan quelconque.....                                        | 72  |
| 4.1.2.5   | Conclusion sur le modèle de milieu extérieur « météorologie ».....                     | 73  |
| 4.2       | Modèle de l'Unité de Séchage et modèle du milieu extérieur « bois ».....               | 74  |
| 4.2.1     | Modèle de milieu extérieur « bois ».....                                               | 74  |
| 4.2.1.1   | Etat de l'art des modèles du milieu extérieur « bois ».....                            | 74  |
| 4.2.1.2   | Modèle de la CCS.....                                                                  | 76  |
| 4.2.1.3   | Isothermes de sorption et teneur en eau réduite $W^*$ .....                            | 77  |
| 4.2.1.4   | Définition de la vitesse de séchage réduite.....                                       | 78  |
| 4.2.1.5   | Cinétique de séchage.....                                                              | 79  |
| 4.2.1.5.1 | <b>Description des essais</b> .....                                                    | 79  |
| 4.2.1.5.2 | <b>Identification de la CCS</b> .....                                                  | 81  |
| 4.2.1.6   | Modèle de milieu extérieur bois pour une planche d'épaisseur 27 mm.....                | 84  |
| 4.2.2     | Modèle de l'unité de séchage.....                                                      | 85  |
| 4.2.2.1   | Objectifs.....                                                                         | 85  |
| 4.2.2.2   | Bilans globaux d'énergie : hypothèses et couplages.....                                | 85  |
| 4.2.2.3   | Conservation de la masse sur le bois.....                                              | 86  |
| 4.2.2.4   | Conservation de la masse sur l'air.....                                                | 87  |
| 4.2.2.5   | Conservation de l'énergie sur le bois.....                                             | 87  |
| 4.2.2.6   | Conservation de l'énergie sur l'air.....                                               | 87  |
| 4.2.3     | Qualification du modèle extérieur « bois » dans le contexte de l'unité de séchage..... | 88  |
| 4.2.3.1   | Evaluation de la Parcimonie.....                                                       | 88  |
| 4.2.3.2   | Evaluation de l'Exactitude.....                                                        | 88  |
| 4.2.3.3   | Evaluation de la Précision.....                                                        | 89  |
| 4.2.3.4   | Evaluation du niveau de Spécialisation.....                                            | 90  |
| 4.2.3.5   | Conclusion sur le modèle de milieu extérieur « bois ».....                             | 91  |
| 4.3       | Modèle de l'Unité de Chauffage.....                                                    | 92  |
| 4.3.1     | Etat de l'art de la modélisation.....                                                  | 92  |
| 4.3.2     | Modélisation de l'unité de chauffage : le capteur solaire.....                         | 94  |
| 4.3.3     | Bilans globaux d'énergie : hypothèses.....                                             | 95  |
| 4.3.3.1   | Conservation de l'énergie pour la couverture transparente.....                         | 95  |
| 4.3.3.2   | Conservation de l'énergie pour l'Absorbeur.....                                        | 95  |
| 4.3.3.3   | Conservation de l'énergie pour le fond du capteur.....                                 | 96  |
| 4.3.3.4   | Conservation de l'énergie sur l'air.....                                               | 96  |
| 4.3.4     | Notion d'efficacité.....                                                               | 97  |
| 4.3.4.1   | Expression de l'efficacité selon la température de l'absorbeur.....                    | 98  |
| 4.3.4.2   | Expression de l'efficacité selon la température d'entrée du fluide caloporteur.....    | 100 |
| 4.3.4.3   | Critique.....                                                                          | 102 |
| 4.3.5     | Modèle parcimonieux de l'unité de chauffage.....                                       | 102 |
| 4.3.5.1   | Variables pertinentes.....                                                             | 102 |
| 4.3.5.2   | Premier dépouillement.....                                                             | 104 |
| 4.3.5.3   | Second dépouillement.....                                                              | 105 |
| 4.3.6     | Qualification du modèle « Capteur Solaire ».....                                       | 105 |
| 4.3.6.1   | Evaluation de la Parcimonie.....                                                       | 105 |
| 4.3.6.2   | Evaluation de l'Exactitude.....                                                        | 106 |



|           |                                                                           |            |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.3.6.3   | Evaluation de la Précision .....                                          | 107        |
| 4.3.6.4   | Evaluation du niveau de Spécialisation.....                               | 108        |
| 4.3.6.5   | Conclusion.....                                                           | 108        |
| 4.3.6.6   | Choix du modèle .....                                                     | 109        |
| 4.4       | Modélisation de l'Unité de Stockage d'énergie .....                       | 109        |
| 4.4.1     | Description de l'Unité de Stockage d'énergie.....                         | 109        |
| 4.4.1.1   | Description du capteur solaire à eau .....                                | 109        |
| 4.4.1.2   | Description du stockeur-échangeur .....                                   | 110        |
| 4.4.1.3   | Caractéristiques géométriques de l'échangeur .....                        | 110        |
| 4.4.1.3.2 | <b>Caractéristiques géométriques liées au déstockage par air</b> .....    | 111        |
| 4.4.2     | Etat de l'art sur la modélisation du stockage et du déstockage.....       | 111        |
| 4.4.3     | Modèle de l'unité de stockage.....                                        | 113        |
| 4.4.3.1   | Conservation de l'énergie pour le stockeur.....                           | 113        |
| 4.4.4     | Modèle de l'unité de stockage au déstockage .....                         | 113        |
| 4.4.4.1   | Transferts thermiques .....                                               | 113        |
| 4.4.4.2   | Conservation de l'énergie dans le stockeur.....                           | 114        |
| 4.4.4.3   | Modèle du échangeur-stockeur au déstockage.....                           | 114        |
| 4.4.5     | Qualification du modèle .....                                             | 115        |
| 4.5       | Construction du modèle global et méthode de résolution .....              | 116        |
| <b>5</b>  | <b>Simulations et optimisation du séchoir solaire .....</b>               | <b>117</b> |
| 5.1       | Séchage solaire sans stockage .....                                       | 117        |
| 5.1.1     | Modèle.....                                                               | 117        |
| 5.1.2     | Hypothèses de fonctionnement .....                                        | 117        |
| 5.1.3     | Description des simulations .....                                         | 118        |
| 5.1.3.1   | Critique de la courbe de séchage.....                                     | 121        |
| 5.1.4     | Influence des paramètres sur le temps de séchage .....                    | 123        |
| 5.1.4.1   | Influence saisonnière.....                                                | 123        |
| 5.1.4.2   | Influence de la vitesse de l'air dans la pile de bois ( $U_{a-pb}$ )..... | 124        |
| 5.1.4.3   | Influence du taux de renouvellement d'air ( $\tau_r$ ) .....              | 125        |
| 5.2       | Séchage solaire avec stockage.....                                        | 126        |
| 5.2.1     | Modèles .....                                                             | 126        |
| 5.2.2     | Hypothèses de fonctionnement .....                                        | 126        |
| 5.2.3     | Description des simulations .....                                         | 127        |
| 5.3       | Conduite optimisée du séchoir .....                                       | 134        |
| 5.3.1     | Séchoir de référence .....                                                | 134        |
| 5.3.2     | Qualité de séchage.....                                                   | 134        |
| 5.3.2.1   | Notion de Point de Saturation des Fibres, PSF .....                       | 134        |
| 5.3.2.2   | Relation air de séchage et qualité .....                                  | 135        |
| 5.3.2.2.1 | <b>Température de l'air de séchage</b> .....                              | 135        |
| 5.3.2.3   | Relation conduite de séchage et qualité du bois.....                      | 136        |
| 5.3.3     | Optimisation de la qualité de séchage solaire .....                       | 137        |
| 5.3.3.1   | Logique de conduite du séchoir .....                                      | 137        |
| 5.3.3.2   | Conduite pour un séchage de qualité en Avril et Août .....                | 137        |
| 5.3.3.3   | Tables de conduite de séchoir pour la qualité .....                       | 139        |
| 5.3.4     | Optimisation du temps de séchage .....                                    | 140        |
| 5.3.5     | Optimisation des coûts de possession du séchoir solaire .....             | 142        |
| 5.3.5.1   | Temps moyen de séchage et volume annuel séché .....                       | 142        |
| 5.3.5.2   | Rentabilité de la qualité.....                                            | 142        |
| 5.3.5.3   | Durée de récupération des investissements.....                            | 142        |
| 5.3.5.4   | Conclusion sur la rentabilité.....                                        | 145        |

|          |                                        |            |
|----------|----------------------------------------|------------|
| 5.4      | Conclusion.....                        | 145        |
| <b>6</b> | <b>Conclusion Générale .....</b>       | <b>147</b> |
| 6.1      | La démarche de conception.....         | 147        |
| 6.2      | La modélisation et les résultats ..... | 148        |
| 6.3      | Perspectives du projet.....            | 150        |
|          | <b>Nomenclature.....</b>               | <b>151</b> |
|          | <b>Bibliographie.....</b>              | <b>155</b> |
|          | <b>ANNEXES.....</b>                    | <b>165</b> |

## TABLE DE FIGURES

|              |                                                                                       |    |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1.1.  | Localisation de l'industrie forestière de sciages au Mexique.....                     | 5  |
| Figure 1.2.  | Entités minimales d'un séchoir solaire.....                                           | 8  |
| Figure 1.3.  | Organigramme technique (OTé) du séchoir solaire.....                                  | 9  |
| Figure 1.4.  | Le défaut de collapse.....                                                            | 10 |
| Figure 1.5.  | Les fentes internes et externes.....                                                  | 10 |
| Figure 1.6.  | Déformation des avivés de bois.....                                                   | 11 |
| Figure 2.1   | Entités présentes dans un système selon la loi d'intégralité de parties (loi 1).....  | 19 |
| Figure 2.2.  | Organigramme technique (OTé) du séchoir et composants d'interaction.....              | 21 |
| Figure 2.3.  | Classement des séchoirs solaires selon l'agencement des unités principales .....      | 22 |
| Figure 2.4.  | Séchoirs solaires avec capteur intégré (agencement 1) .....                           | 23 |
| Figure 2.5.  | Séchoirs solaires avec capteur semi intégré (agencement 2).....                       | 24 |
| Figure 2.6.  | Séchoir solaire avec stockage (agencement 3).....                                     | 25 |
| Figure 2.7.  | Intégralité des parties appliquée au séchoir solaire .....                            | 26 |
| Figure 2.8.  | Organigramme technique étendu du capteur solaire plat (OTé) .....                     | 27 |
| Figure 2.9.  | Loi d'intégralité de parties appliquée aux capteurs solaires .....                    | 29 |
| Figure 2.10. | Classement des capteurs solaires existants.....                                       | 29 |
| Figure 2.11. | Les premiers types d'absorbeur solaire.....                                           | 30 |
| Figure 2.12. | Evolution du groupe I, ordre d'évolution .....                                        | 30 |
| Figure 2.13. | Evolution de l'unité de transfert (capteur à eau, A et capteur à air, B).....         | 31 |
| Figure 2.14. | Augmentation de la surface d'échange (absorbeur/fluide) .....                         | 31 |
| Figure 2.15. | Isolation sous vide (tube à flux direct, A, caloduc, B).....                          | 33 |
| Figure 2.16. | Organigramme technique étendu du système de stockage (OTé).....                       | 35 |
| Figure 2.17. | Classement des systèmes de stockage selon les composants d'interaction [Jofs/d].....  | 36 |
| Figure 2.18. | Classement des systèmes de stockage selon le milieu de stockage [Jofs/d, Can05] ..... | 37 |
| Figure 2.19. | Loi d'intégralité de parties appliquée à l'unité de stockage (SV : Stockage).....     | 37 |
| Figure 2.20. | Loi d'intégralité de parties appliquée à l'unité de stockage (SV : Déstockage).....   | 37 |
| Figure 2.21. | Classement des unités d'accumulation et de transfert existantes.....                  | 38 |
| Figure 2.22. | Evolution du réservoir de stockage simple .....                                       | 39 |
| Figure 2.23. | Evolution du réservoir de stockage à échangeur.....                                   | 39 |
| Figure 2.24. | Evolution du réservoir de stockage à chaleur latente.....                             | 40 |
| Figure 2.25. | Radar d'aide à l'analyse des évolutions futures et nouvel agencement proposé. ....    | 42 |
| Figure 2.26. | Séchoir solaire avec stockage d'énergie .....                                         | 43 |
| Figure 2.27. | Choix de l'unité de séchage, détail de construction, Catia V5 .....                   | 44 |
| Figure 2.28. | Choix de l'unité de chauffage, détail de construction, Catia V5.....                  | 44 |
| Figure 2.29. | Choix de l'unité de stockage, détail de construction, Catia V5.....                   | 45 |
| Figure 2.30. | Choix de l'unité de chauffage (stockage), détail de construction, Catia V5.....       | 45 |
| Figure 2.31. | Schéma global du séchoir solaire Catia V5.....                                        | 46 |
| Figure 3.1   | Les VCo de l'unité de chauffage .....                                                 | 48 |
| Figure 3.2.  | Les VCo de l'unité de séchage.....                                                    | 49 |
| Figure 3.3.  | Les VCo de l'unité de stockage.....                                                   | 49 |

|                                                                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 3.4. Schéma du modèle global du séchoir solaire à concevoir.....                                                                                                                              | 50  |
| Figure 3.5. Organigramme technique étendu de niveau 3 du séchoir solaire, OTé N3.....                                                                                                                | 51  |
| Figure 3.6. BDF du séchoir, situation de vie « fonctionnement jour ».....                                                                                                                            | 51  |
| Figure 3.7. BDF du séchoir, situation de vie « fonctionnement nuit ».....                                                                                                                            | 52  |
| Figure 3.8. Schéma de représentation du PEPS d'un modèle de conception architecturale idéal [Ver04].                                                                                                 | 61  |
| Figure 4.1 Organigramme technique de niveau 3 du système « séchoir solaire ».....                                                                                                                    | 63  |
| Figure 4.2. Entrées/sorties du modèle de milieu extérieur.....                                                                                                                                       | 64  |
| Figure 4.3. Localisation de la station météorologique « Aéroport de Mexico » ( $l = 19,4^\circ$ , $L = 99,1$ W et altitude de 2238 m).....                                                           | 65  |
| Figure 4.4. Variation de T et HR réelle et calculée. ....                                                                                                                                            | 67  |
| Figure 4.5. Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.....                                                                                                                               | 69  |
| Figure 4.6. Variation de l'ensoleillement de l'aéroport de Mexico, (15/05/2006).....                                                                                                                 | 73  |
| Figure 4.7 Entrées/sorties du modèle de l'unité de séchage .....                                                                                                                                     | 74  |
| Figure 4.8. Isothermes de sorption pour le pin maritime .....                                                                                                                                        | 78  |
| Figure 4.9 Veine de séchage (planche épaisseur 27mm) .....                                                                                                                                           | 80  |
| Figure 4.10. Vitesse de séchage expérimentale réduite (planche épaisseur 27mm) .....                                                                                                                 | 81  |
| Figure 4.11. Ecart observé entre les courbes expérimentales et simulées.....                                                                                                                         | 83  |
| Figure 4.12. Ecart dus à l'hétérogénéité du bois .....                                                                                                                                               | 84  |
| Figure 4.13. Empilement des planches .....                                                                                                                                                           | 85  |
| Figure 4.14. Schéma de principe du calcul itératif : paramètres connus et paramètres à déterminer en gras .....                                                                                      | 86  |
| Figure 4.15. Variation de la teneur en eau réduite par rapport au temps, comparaison entre deux expériences et le modèle CCS.....                                                                    | 89  |
| Figure 4.16. Variation de la teneur en eau réduite en fonction du temps, identification des intervalles de variation de $W^*$ en considérant une incertitude de $U_a \pm 0,1 \text{ m.s}^{-1}$ ..... | 90  |
| Figure 4.17. Représentation du PEPS du modèle, cinétique de séchage à partir de la CCS. ....                                                                                                         | 91  |
| Figure 4.18. Entrées/sorties du modèle de l'unité de chauffage .....                                                                                                                                 | 94  |
| Figure 4.19. Echanges thermiques dans le Capteur solaire à air .....                                                                                                                                 | 95  |
| Figure 4.0.19. Volume de contrôle du capteur solaire.....                                                                                                                                            | 96  |
| Figure 4.21. Bilan optique du capteur .....                                                                                                                                                          | 98  |
| Figure 4.22. Droite de l'efficacité d'un capteur solaire.....                                                                                                                                        | 100 |
| Figure 4.23. Efficacité instantanée d'un capteur solaire en fonction de $T^* = \frac{T_{a\text{-cap0}} - T_{\text{ext}}}{G^*}$ [Ade02] .....                                                         | 102 |
| Figure 4.24 Variation des paramètres B et K en fonction des dimensions L et l ainsi que de la vitesse de l'air $U_a$ dans le capteur .....                                                           | 104 |
| Figure 4.25. Représentation de l'exactitude du modèle « capteur solaire à air » ( $U_a = 2,78 \pm 0,1 \text{ m.s}^{-1}$ ) .....                                                                      | 106 |
| Figure 4.26. Représentation de l'efficacité du capteur solaire à air, ( $U_a = 1,39 \pm 0,1 \text{ m.s}^{-1}$ ) .....                                                                                | 107 |
| Figure 4.27. Représentation du PEPS du modèle physique du capteur solaire à air [Ver04]......                                                                                                        | 109 |
| Figure 4.28. Schéma du capteur solaire à eau et son branchement à l'unité de stockage .....                                                                                                          | 110 |
| Figure 4.29. Schématisation du stockeur-échangeur.....                                                                                                                                               | 110 |
| Figure 4.30. Variables entrées/sorties du modèle du stockeur - échangeur .....                                                                                                                       | 113 |
| Figure 4.31. Schéma du modèle global du séchoir solaire .....                                                                                                                                        | 116 |
| Figure 5.1 . Schéma du couplage capteur solaire à air – séchoir.....                                                                                                                                 | 118 |
| Figure 5.2. Cinétique de séchage d'une pile de bois de pin (mois, le plus humide, août) .....                                                                                                        | 119 |
| Figure 5.3. Variation de la température de l'air au cours du séchage (mois, le plus humide, août).....                                                                                               | 120 |
| Figure 5.4. Variation de l'humidité relative de l'air au cours du séchage (mois, le plus humide, août) .....                                                                                         | 120 |
| Figure 5.5. Variation de HR considérant un $\tau_r N = 5\%$ , séchage sans stockage.....                                                                                                             | 121 |
| Figure 5.6. Cinétique de séchage d'une pile de bois (mois, le plus humide, août) .....                                                                                                               | 122 |
| Figure 5.7. Fin du séchage, teneur en eau finale $W_f$ .....                                                                                                                                         | 122 |
| Figure 5.8. Variation saisonnière du temps de séchage d'une pile de bois.....                                                                                                                        | 123 |
| Figure 5.9. Influence de la vitesse de l'air dans la pile sur le temps de séchage (mois d'août).....                                                                                                 | 124 |
| Figure 5.10. Influence du $\square_r$ sur le temps de séchage (mois d'août) .....                                                                                                                    | 125 |
| Figure 5.11 . Schéma du couplage échangeur stockeur – séchoir.....                                                                                                                                   | 127 |

|                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 5.12. Cinétique et vitesse de séchage, fonctionnement séchoir avec stockage (août) .....                                     | 128 |
| Figure 5.13. Variation de la température de l'air au cours du séchage + stockage (août).....                                        | 129 |
| Figure 5.14. Variation de l'humidité relative de l'air au cours du séchage + stockage (août) .....                                  | 130 |
| Figure 5.15 Influence du stockage d'énergie sur le temps de séchage (mois d'août) .....                                             | 131 |
| Figure 5.16. Cinétique de séchage d'une pile de bois, fonctionnement avec stockage, (août).....                                     | 131 |
| Figure 5.17. Variation saisonnière du temps de séchage d'une pile de bois (avec stockage).....                                      | 132 |
| Figure 5.18. Influence de la masse d'eau de stockage sur $T_{a-E1}$ .....                                                           | 133 |
| Figure 5.19. Simulation du séchage solaire, prise en compte de la qualité de séchage, ( $\tau_r$ var + stk,N) ...                   | 138 |
| Figure 5.20. Simulation du séchage solaire, prise en compte de la qualité de séchage, ( $\tau_r$ var + $\tau_r$ N + stk j, N) ..... | 139 |
| Figure 5.21. Optimisation du temps de séchage, mois d'août.....                                                                     | 141 |
| Figure 5.22. Rentabilité du séchoir et temps de séchage, $\tau_r$ var + $\tau_r$ N var + stk N .....                                | 143 |
| Figure 5.23. Rentabilité du séchoir et temps de séchage, $\tau_r$ var + $\tau_r$ N var + stk N,j .....                              | 144 |
| Figure 5.24. Durée de récupération des investissements du échangeur-stockeur.....                                                   | 145 |
| Figure 6.1. Conception détaillée du séchoir solaire.....                                                                            | 147 |
| Figure 6.2. Conception détaillée du système « glissière » .....                                                                     | 148 |

## LISTE DE TABLEAUX

|                                                                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tableau 1.1. Avantages et inconvénients du séchage solaire et du séchage à l'air libre .....                                                                                                   | 8   |
| Tableau 1.2. Résultats nets de l'exploitation, [Ale02] .....                                                                                                                                   | 12  |
| Tableau 1.3. Classification des charges selon sa nature.....                                                                                                                                   | 13  |
| Tableau 1.4. Caractéristiques structurantes retenues lors de l'approche fonctionnelle externe, situation de vie « fonctionnement jour », [Sca04]. .....                                        | 15  |
| Tableau 1.5. Caractéristiques structurantes retenues lors de l'approche fonctionnelle externe, situation de vie « fonctionnement nuit », [Sca04].....                                          | 15  |
| Tableau 1.6. Caractéristiques structurantes retenues lors de l'approche fonctionnelle externe, situation de vie « conception », [Sca04]. .....                                                 | 15  |
| Tableau 3.1. Bilan des flux d'interaction.....                                                                                                                                                 | 52  |
| Tableau 3.2. Composants d'interaction du séchoir solaire et VPi associées .....                                                                                                                | 54  |
| Tableau 3.3. Variables de modélisation et critères structurants associés à chaque unité du système, vision concepteur. ....                                                                    | 56  |
| Tableau 4.1. L'année type retenue .....                                                                                                                                                        | 65  |
| Tableau 4.2. Notation utilisée pour l'irradiation et l'éclairement solaire .....                                                                                                               | 71  |
| Tableau 4.3. Coordonnées géographiques de l'aéroport de Mexico .....                                                                                                                           | 73  |
| Tableau 4.4. Conditions de séchage et résultats des expériences.....                                                                                                                           | 80  |
| Tableau 4.5. Identification des variables de conception dans le modèle extérieur bois.....                                                                                                     | 88  |
| Tableau 4.6. Ecriture des modèles de comportement des capteurs solaires.....                                                                                                                   | 93  |
| Tableau 4.7. Identification des variables de conception de l'unité de chauffage (Capteur solaire à air) ....                                                                                   | 106 |
| Tableau 4.8. Valeurs de l'efficacité du capteur calculées avec le modèle parcimonieux pour, $U_a = 2,78 \pm 0,1$ m.s <sup>-1</sup> . ....                                                      | 107 |
| Tableau 4.9. Caractéristiques géométriques de l'échangeur - stockeur .....                                                                                                                     | 111 |
| Tableau 5.1. Conditions météorologiques des mois considérés.....                                                                                                                               | 119 |
| Tableau 5.2. Conditions de séchage.....                                                                                                                                                        | 119 |
| Tableau 5.3. Conditions de séchage.....                                                                                                                                                        | 123 |
| Tableau 5.4. Résultat des conduites de séchage « variation saisonnière » en accord avec le critère d'appréciation temps de séchage $t_S = f(W_f)$ pour 3 mois de l'année type, (fig. 5.7)..... | 124 |
| Tableau 5.5. Résultat des conduites de séchage « variation de $U_a$ » en accord au critère d'appréciation temps de séchage $t_S = f(W_f)$ pour le mois d'août, (fig. 5.9). ....                | 125 |
| Tableau 5.6. Résultat des conduites de séchage « influence de $\tau_r$ » en accord au critère d'appréciation temps de séchage $t_S = f(W_f)$ pour le mois d'août, (fig. 5.10). ....            | 126 |
| Tableau 5.7. Temps de séchage selon la saison de l'année. ....                                                                                                                                 | 133 |
| Tableau 5.8. Temps de séchage moyen pour différentes conduites du séchoir solaire.....                                                                                                         | 141 |

|                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tableau 5.9. Temps de séchage moyen et volume annuel séché .....                                | 142 |
| Tableau 5.10. Résumé des temps de séchage globaux et les variables économiques considérées..... | 144 |
| Tableau A.1.1. Valeurs du coefficient d'échange thermique .....                                 | 166 |
| Tableau A3.1. Variables de conception de l'échangeur – stockeur (Inox : 304L).....              | 172 |

## Introduction Générale

Le séchage est une activité très importante lors du processus de transformation du matériau bois. D'un point de vue économique, cette activité induit une réduction des coûts de transport et une augmentation de la valeur de vente du produit sec. Concernant les caractéristiques du matériau, le séchage donne au bois une meilleure stabilité dimensionnelle et une protection naturelle contre l'attaque d'insectes et des champignons.

Il existe plusieurs méthodes pour enlever l'excès d'eau du bois, parmi les plus utilisées nous pouvons mentionner : le séchage industriel à l'air chaud, le séchage sous vide et le séchage à l'air libre. Les deux premiers représentent des investissements initiaux très importants ainsi que des coûts de possession non négligeables (amortissement, maintenance). Le séchage à l'air libre est caractérisé par de longues périodes de séchage et par l'utilisation de surfaces importantes de terrain.

Au Mexique, le volume de bois séché par ces méthodes reste faible car il existe peu d'entreprises qui puissent supporter ces dépenses. En outre, la majorité de l'industrie du bois est constituée par des associations communautaires qui n'ont pas les moyens de réaliser des investissements importants pour sécher le bois mais qui manifestent le besoin de sécher leurs produits. Le **séchage solaire** est une alternative pour sécher le bois aux teneurs eau finales souhaitées avec des investissements peu importants et en assurant une bonne qualité du produit final.

En ce qui concerne l'utilisation de l'énergie solaire, Almanza, [Alm03] mentionne qu'un peu plus de la moitié du Mexique reçoit une irradiation journalière globale de 5 kWh.m<sup>-2</sup> par jour ce qui représente une source d'énergie importante et renouvelable. L'utilisation des énergies appelées fossiles (pétrole, charbon, gaz,...) représente 92 % de la consommation des ressources énergétiques mexicains [ANES07]. Dans cette logique, on envisage de réduire la consommation des énergies non renouvelables en utilisant l'énergie solaire pour les procédés industriels qui demandent beaucoup d'énergie tels que le séchage de bois.

Actuellement, l'utilisation de l'énergie solaire au Mexique est consacrée au chauffage de l'eau sanitaire, à la génération d'énergie électrique, à la réfrigération et au **séchage solaire**. Ce dernier, concerne la déshydratation des produits agroalimentaires, il existe quelques séchoirs solaires à bois au stade expérimental mais ils sont mal isolés et sont peu performants.

Le premier chapitre de cette thèse concerne l'analyse du besoin pour la conception d'un système de séchage solaire pour le bois de pin dans une vision client et concepteur. On traduit l'expression du besoin dans une vision fonctionnelle qui va structurer tout le document. Dans un premier temps, nous exprimons le besoin « sécher le bois avec de l'énergie solaire ». Puis, nous définissons le système à l'aide de l'outil de conception l'organigramme technique étendu, OTé. Les critères d'appréciation sont exprimés et vont initier les travaux de modélisation selon les méthodes développées au TREFLE.

Nous recensons ensuite, dans le chapitre 2, les séchoirs solaires existants dans le domaine de séchage du bois, puis nous les analysons à l'aide des lois d'évolution des systèmes techniques dans le but d'identifier les améliorations possibles. Le résultat est la proposition d'une solution de conception qui regroupe les innovations pertinentes à mettre en place. La solution proposée comporte : une unité de séchage, une unité de chauffage, une unité de stockage d'énergie et une unité de commande. Les relations entre les unités et le milieu extérieur sont assurées par les composants d'interaction (ventilateurs, pompes, conduites et trappes de renouvellement d'air).

Dans le troisième chapitre, le concept ainsi obtenu est validé par le biais de la modélisation à partir des équations de conservation de la masse et de l'énergie faisant intervenir les variables de conception (VCo) de chaque unité et par les simulations de leur fonctionnement qui en découle. La capacité intrinsèque d'aide à la décision des modèles est qualifiée à l'aide de la méthode PEPS (Parcimonie, Exactitude, Précision et Spécialisation). On aboutit ainsi à un modèle global qui intègre les modèles individuels des unités ainsi que leurs relations avec les milieux environnants (météorologie et planche de bois). Les modèles de milieux extérieurs sont représentés par des expressions horaires de variables d'état (T et HR), un sous-programme pour le calcul de l'ensoleillement  $G^*$  dans le cas du milieu extérieur « météorologie » et un modèle empirique de la cinétique de séchage (courbe caractéristique de séchage, CCS) pour le milieu extérieur « planche de bois ». Le système global est résolu à l'aide d'une méthode itérative. Lors de la modélisation, on identifie des variables de pilotage (**VPI**), qui permettent la gestion des conduites de séchage lors de la simulation du fonctionnement du séchoir. Des scénarios de séchage ont été ainsi établis pour des mois de l'année représentatifs.

Les résultats de simulation, regroupés dans le chapitre 4, permettent de valider et d'optimiser la conception proposée. Une première partie permet de justifier l'utilisation de l'unité de stockage et la seconde partie optimise le séchoir selon les critères d'appréciation

qualité, temps de séchage et coûts de possession du séchoir. On considère des prix de matériaux et de surface de terrain au Mexique pour le calcul de l'investissement initial. Puis, pour évaluer la rentabilité du système, nous nous appuyons sur deux indicateurs économiques à savoir la durée de récupération des investissements, **DRI** et le seuil de rentabilité du séchoir, **SR**. On aboutit à un système rentable qui permet un séchage de qualité avec des temps de séchage optimisés. Le séchoir solaire résultant représente une option très intéressante pour la petite et moyenne industrie mexicaine de sciage.





# 1 Séchoir solaire : besoin industriel et marché mexicain

## 1.1 Analyse du besoin

L'analyse du besoin permet de traduire le besoin exprimé par les utilisateurs d'un système et de le qualifier en terme de critères appelés les critères de qualification. Ces critères permettront d'identifier les fonctions objectifs du système dans le but de trouver les solutions adaptées à la satisfaction du besoin, [[Sca04](#)].

Dans notre cas, il s'agit d'un *système de séchage solaire* dans lequel, on identifie la fonction globale attendue : **«Sécher le bois par énergie solaire au prix le plus bas, au temps le plus court et en obtenant une bonne qualité du produit sec»**.

Les objectifs visés sur la conception et la fabrication du système ne seront pas les mêmes pour le fabricant que pour un producteur ou un intermédiaire du bois. D'un côté, l'intérêt du fabricant sera de vendre le système « séchoir solaire », il envisagera alors, toutes les situations de vie pertinentes (cycle de vie). Celles-ci ne correspondront pas au choix d'un producteur du bois, qui s'intéresse principalement au fonctionnement global du système. Même si l'objectif est commun (sécher le bois), le producteur n'est pas intéressé par la conception et/ou recyclage du système alors que le concepteur considère le cycle de vie en entier.

### 1.1.1 Situations de vie du système

On identifie deux situations de vie (SdV) pertinentes, correspondant au fonctionnement classique d'un séchoir solaire. La situation de vie « fonctionnement jour » et la situation de vie « fonctionnement nuit ».

#### 1.1.1.1 Situation de vie « fonctionnement jour »

L'air de séchage est réchauffé par un capteur solaire à air branché directement ou bien indirectement à la chambre de séchage. Dans le deuxième cas, on est obligé de mettre en place un échangeur de chaleur afin de récupérer l'énergie fournie par le capteur. Au cours du séchage du bois, l'excès d'humidité est évacué par des trappes placées de manière stratégique, afin de ne pas créer des pertes de charge importantes.

### 1.1.1.2 Situation de vie « fonctionnement nuit »

L'indisponibilité de source d'énergie pendant cette période oblige les utilisateurs des séchoirs solaires à arrêter le fonctionnement du séchoir. Dans le cas du séchage de bois, Welwa, [Wel04], propose le fonctionnement du séchoir à trappes ouvertes, cette opération permet de libérer les contraintes de séchage générées pendant la journée. Néanmoins, cela prolonge les temps de séchage car le bois se refroidit, ce qui rend le système peu rentable. Afin d'éviter ce refroidissement, certains séchoirs, a contrario, la nuit, empêchent le passage de l'air dans le capteur (by pass) [Sim84] et isolent thermiquement les parois.

## 1.2 Le marché du bois au Mexique

La production de bois de pin représente 76,2% de la production totale de bois au Mexique, (volume annuel 6,7 millions de m<sup>3</sup>), [SEM04]. Néanmoins, le manque d'efficacité des industries de transformation génère un marché insatisfait par rapport à la production de planches de bois de qualité.

L'industrie des sciages de bois de pin, concerne la principale activité de transformation du bois au Mexique (81,5 % de la production de bois nationale, [SEM04]). Actuellement, ces usines sont concentrées dans la région nord du pays concernant les états de : Durango, Chihuahua, Michoacan et Jalisco, figure 1.1, (69,9% de l'industrie de bois, [SEM04]).



Figure 1.1. Localisation de l'industrie forestière de sciages au Mexique

Afin de situer notre projet d'étude dans le contexte de la consommation de bois sec au Mexique, dans la suite, nous réalisons une brève analyse du marché potentiel pour les séchoirs à bois à l'échelle nationale.

### **1.2.1 Analyse du Marché**

L'industrie des scieries est considérée comme la plus importante dans le domaine de l'usinage du bois au Mexique. La transformation du bois par sciage, représente 72,4% de la production nationale, [SEM04]. Néanmoins, les procédés de transformation n'incluent pas le séchage artificiel et les industriels vendent leurs produits sans les sécher ce qui provoque un fort impact sur les coûts de production et de transport.

Actuellement, l'industrie des sciages de bois est bien localisée dans la partie nord du pays, il est donc évident que les besoins de séchage sont aussi dans cette région là. Ce besoin est rempli par l'utilisation des séchoirs conventionnels à l'air chaud même si les coûts de production sont élevés. La taille de ces entreprises les rend capables de maîtriser leurs procédés et par conséquence leurs coûts.

Les 30,1% de la production restante, sont très dispersés dans les états de : Campeche, Chiapas, Guanajuato, Nayarit, Nuevo León, Puebla, Querétaro, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sonora, Tabasco, Tamaulipas, Tlaxcala et Veracruz, [SEM04]. Ces régions représentent un marché potentiel pour le commerce des séchoirs solaires. En effet, ces petites industries forestières appartiennent généralement à des organisations communautaires qui n'ont pas les moyens économiques pour acheter un séchoir conventionnel.

La méthode de séchage solaire offre alors une opportunité pour ajouter de la valeur aux bois sciés et en particulier au bois de pin qui représente 76,7%, de la production de bois au Mexique avec plus de 30 essences potentiellement commerciales, [SEM04].

On trouve aussi des essences avec des besoins particuliers de séchage tels que les bois précieux. Ils nécessitent des conditions de séchage douces afin de ne pas nuire à leur qualité. Ces conditions sont l'apanage des séchoirs solaires. Le marché potentiel des bois précieux est localisé dans les états de : Veracruz (36,3%), Quintana Roo (26,3%), Tabasco (14,8%), Chiapas (11,1%), et Puebla (5%), [SEM04].

### **1.2.2 Les clients potentiels**

Etant donné que le volume de bois séché par rapport à la production totale des sciages est peu important, notre projet « conception d'un séchoir solaire à bois » présente un intérêt au Mexique. Actuellement, la majorité du volume de bois est séché par des méthodes simples (séchage à l'air libre), ce séchage devient onéreux à cause de la surface au sol occupée et des

longues périodes de séchage. En outre, les séchoirs à air chaud conventionnels imposent un investissement initial très élevé.

Les séchoirs solaires représentent des investissements initiaux peu importants par rapport au séchage conventionnel et des temps de séchage plus courts par rapport au séchage à l'air libre. Dans cette logique, nous considérons comme marché potentiel :

- Les petites et moyennes scieries
- Les usines productrices de meubles
- Les entreprises d'emballages de bois
- Les fabricants des moulures de bois
- Les producteurs d'artisanats

### ***1.2.3 Les concurrents possibles***

Comme on vient de l'évoquer, il existe diverses méthodes de séchage de bois au Mexique, les plus connues sont : le séchage conventionnel, le séchage sous vide et le séchage à l'air libre. Les deux premières méthodes, sont plutôt utilisés dans les grandes usines du nord du pays, ces types de séchoirs représentent des coûts d'investissement et de possession importants. Malgré cela, il s'agit des méthodes très efficaces. L'autre méthode concerne le séchage à l'air libre. Cette pratique de séchage n'est pas tout à fait efficace, à cause de sa mauvaise utilisation, son grand encombrement au sol et ses coûts élevés. Néanmoins, elle représente une concurrence potentielle au séchage solaire.

### ***1.2.4 Importance du séchage solaire***

Afin de montrer l'importance de la méthode de séchage proposé dans ce document, nous réalisons une comparaison des avantages et des inconvénients des deux méthodes de séchage concurrentes (tableau 1.1).

Tableau 1.1. Avantages et inconvénients du séchage solaire et du séchage à l'air libre

| Séchage Solaire                                                                                                                                                                                                                                          | Séchage à l'air libre, [Ale02]                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Avantages</b><br>Maîtrise de la teneur en eau finale désirée<br>Obtention de bois de qualité (moins de pertes)<br>Source d'énergie « gratuite »<br>Permet la gestion de la conduite de séchage<br>Pas de risque d'attaque par insectes ou champignons | <b>Avantages</b><br>Séchage doux, grâce à l'alternance jour/nuit<br>Pas de personnel qualifié<br>Faible gradient d'humidité dans l'épaisseur<br>Peu de changement de couleur<br>Pas de dépenses d'énergie<br>Source d'énergie « gratuite »                             |
| <b>Inconvénients</b><br>Investissement initial<br>Consommation électrique (si ventilateur)<br>Conduite du séchoir                                                                                                                                        | <b>Inconvénients</b><br>Séchage lent, (temps de réponse au marché pénalisant)<br>Pertes importantes dues aux défauts de séchage<br>Surface occupée importante<br>Risque d'attaque (insectes et champignons)<br>Il est difficile d'atteindre la teneur en eau souhaitée |

### 1.3 Fonction globale du système « Séchoir solaire »

Il s'agit de « sécher le bois » en utilisant comme source thermique l'énergie solaire. Pour que cette énergie solaire soit utilisée, il est nécessaire qu'elle soit transformée et transmise. Le système à concevoir doit réunir les entités qui satisferont le besoin exprimé. Une des lois d'évolution des systèmes techniques (Chapitre 2) permet de visualiser les entités indispensables, (figure 1.2).

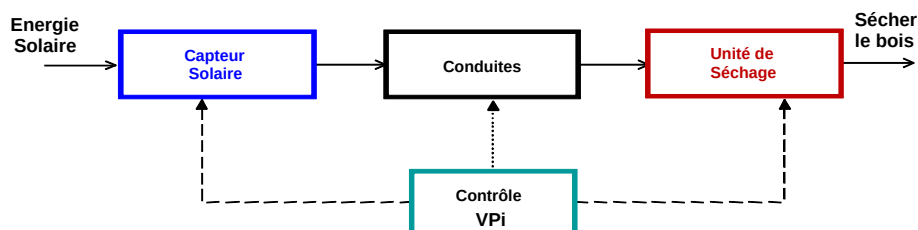


Figure 1.2. Entités minimales d'un séchoir solaire

Les entités indispensables sont des capteurs solaires (unité de chauffage) et une chambre de séchage (unité de séchage) reliés par des conduites. Au moins une des entités doit être contrôlable, c'est le rôle de l'unité de contrôle/commande. Dans les séchoirs solaires, l'entité de contrôle est souvent absente.

Une fois la fonction globale définie, nous pouvons proposer une première approche du système à concevoir. Pour cela, nous utilisons un outil issu de l'analyse fonctionnelle appelée

l'organigramme technique, **OT**. L'**OT** permet une description organique du système à concevoir par unités fonctionnelles, [Sca05a]. Afin de prendre en compte les influences de l'environnement du système, on étend l'OT aux milieux extérieurs, on définit ainsi l'**Organigramme Technique étendu (OTé)** [Nad06a]. Les milieux extérieurs sont ici : la météorologie qui définit les conditions extérieures (ensoleillement, température, humidité), la planche de bois séché et l'énergie électrique qui permet le fonctionnement des ventilateurs. Les unités sont reliées entre elles par les composants d'interaction, ces composants transmettent des flux d'énergie, des flux de matière et des flux d'information. La figure 1.3 montre une première vision organique minimale du séchoir solaire à concevoir.

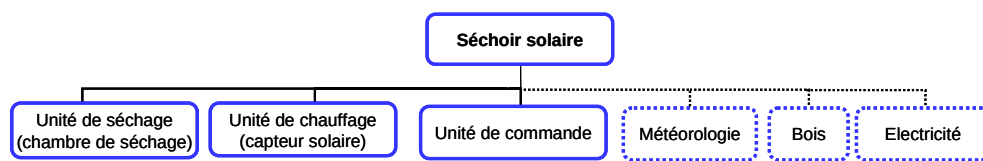


Figure 1.3. Organigramme technique (OTé) du séchoir solaire

Cet outil de représentation, servira de base à l'élaboration de modèles des unités du système et de ses interactions avec les milieux extérieurs (bois, météorologie). Les *modèles d'interaction* traduisent les interactions entre les blocs fonctionnels de l'OTé. C'est-à-dire les flux de matière, d'énergie ou d'information échangés lors du fonctionnement du système.

## 1.4 Critères d'appréciation « client » de la fonction globale

Dans notre cas, nous retiendrons trois critères pertinents. Il s'agit de la qualité de séchage, le temps de séchage et les coûts de possession du séchoir.

### 1.4.1 La Qualité, Q

La **qualité de séchage** peut être considérée comme, l'absence des fentes (internes et externes) et déformations (tillage, flèche, gauchissement, etc.) sur le bois après son séchage. Nous réalisons une description de chacun des défauts qui apparaissent lors du séchage de bois.

Le **collapse** (figure 1.4), est l'effondrement des parois cellulaires [Ale02]. On peut l'identifier par des ondulations des faces des planches. Si le collapse est important, il peut entraîner des fentes internes. Il n'apparaît qu'en présence de l'eau libre, c'est-à-dire en première phase de séchage.

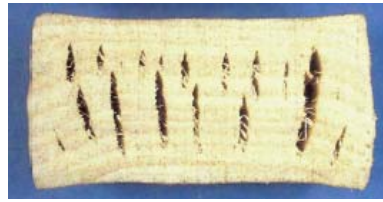


Figure 1.4. Le défaut de collapse

La **cémentation** est un autre défaut qui peut se manifester pendant cette période. Elle apparaît lorsque il y a un dessèchement important dans les zones périphériques des planches formant, une barrière à la circulation de l'humidité des zones internes vers la surface, [Ale02].

A une teneur en eau plus réduite, nous trouvons les **contraintes de séchage**, elles sont la conséquence de la rétractibilité du bois. Ces contraintes imposent des comportements spécifiques sur deux parties des planches (zones périphériques et zones internes). Si les zones périphériques sont soumises à des contraintes de traction alors que les internes sont en compression, et si les contraintes de traction sont supérieures à la résistance à la traction du bois, il se produira la formation des **fentes en surface**, (figure 1.5). Par contre, si les zones internes sont soumises à des contraintes de traction, les zones internes sont alors à des contraintes de compression et, si les contraintes de traction sont supérieures à la résistance à la traction de bois, il se produit des **fentes internes**, [Ale02].



Figure 1.5. Les fentes internes et externes

Enfin, les déformations des pièces de bois sont le résultat de l'anisotropie du matériau selon la localisation de la découpe des planches. Nous savons que la déformation est de 1,5 à 2,5 fois plus importante dans la direction tangentielle par rapport à la radiale [Ale02]. Le résultat est la présence de tuilage, de gauchissement, de flèche de face et la flèche de chant. Ces défauts sont montrés sur la figure 1.6.



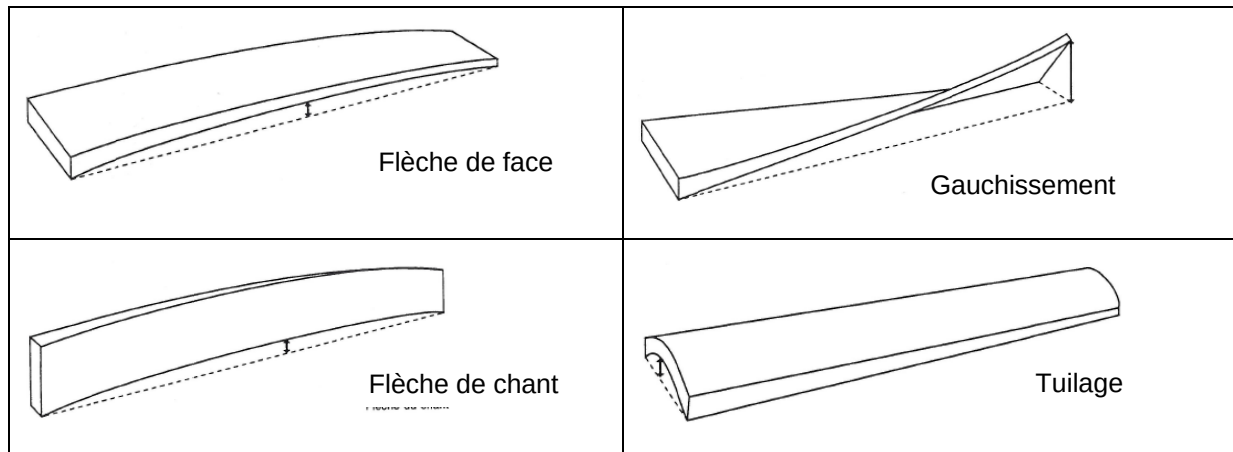


Figure 1.6. Déformation des avivés de bois

La qualité des planches de bois est liée à une maîtrise du séchage durant la période où la planche est la plus vulnérable, c'est-à-dire lorsque la teneur en eau est proche de la teneur en eau de saturation des fibres. Il s'agira de ralentir le séchage durant cette période. A cette fin, il est nécessaire de réaliser un modèle de fonctionnement du séchoir et de définir des variables de pilotage du système. La qualité des planches est un critère d'appréciation, elle se mesurera par un taux de planches hors qualité.

#### 1.4.2 Le Temps de séchage, $t_S$

Le critère temps de séchage concerne la période au bout de laquelle, le bois atteindra la teneur en eau moyenne souhaitée. Les bois séchés de manière artificielle sont généralement utilisés à l'intérieur des bâtiments. Cette requête impose des teneurs en eau finales comprises entre 0,10 et 0,12  $\text{kg}_w/\text{kg}_{bs}$  dépendant la région d'usage [Ale02].

L'optimisation du critère temps de séchage peut amener à une conduite de séchage la plus rapide pouvant induire une dégradation de la qualité du produit. Le système à concevoir doit permettre de jouer sur des variables qui accélèrent la vitesse de séchage.

La rapidité de séchage des planches de bois sera atteinte en optimisant les cinétiques de séchage selon les possibilités météorologiques. A cette fin, il est nécessaire de réaliser un modèle de fonctionnement du séchoir et de définir des variables de pilotage du système. Le temps de séchage est un critère d'appréciation.

#### 1.4.3 Le coût de possession du séchoir

Le coût de possession et la somme des coûts de fonctionnement, de maintenance et d'amortissement des investissements.

Les premières approches concernant l'investissement initial ( $I_{ini}$ ) du système à concevoir permettent de discriminer des solutions possibles afin d'aboutir à un concept rentable et performant. Le calcul des coûts du système va être réalisé à partir des coûts des matériaux au Mexique (pesos). À partir de l'OTé représenté sur la figure 1.2, nous calculons les coûts de chaque unité du séchoir. Puis, nous déterminons le coût global.

L'investissement initial regroupe donc, les coûts de construction de la chambre de séchage complète, CC (fondations, détails, capteur, ventilateurs, portes, etc.), les coûts de main d'œuvre CMO (égal à CC), les prestations diverses, Cd (transport, montage, mise en route, 10% de CC), l'administration, Ca (10% de CC) et les coûts de terrain CT, [Cha91].

Le système choisi devra permettre la simulation du processus de séchage dans le but de connaître le volume séché par an. La connaissance de l'investissement initial ainsi que le volume de bois séché au bout d'une certaine période, permettront d'estimer deux indicateurs économiques à savoir ; la durée de récupération des investissements (**DRI**) et le seuil de rentabilité (**SR**). La **DRI** est définie comme la période au bout de laquelle la somme cumulée des capacités d'autofinancement est égale à l'investissement initial [Ale02]. La capacité d'autofinancement correspond à la somme du résultat net d'exploitation et de la dotation aux amortissements, (tableau 1.2), [Cha91].

Tableau 1.2. Résultats nets de l'exploitation, [Ale02]

|                             |                   |
|-----------------------------|-------------------|
| Chiffre d'affaires          | a                 |
| Charges variables           | b                 |
| Marge brute (MB)            | $A = a - b$       |
| Charges fixes (CF)          | c                 |
| Marge nette                 | $B = A - c$       |
| Impôts sur le bénéfice      | $\hat{I}$         |
| Résultat de l'exploitation  | $C = B - \hat{I}$ |
| Dotation aux amortissements | d                 |
| Capacité d'autofinancement  | $D = C + d$       |

$$DRI = D1 + D2 + \dots + Dn = I_{ini} \quad (1.1)$$

Où : D représente la capacité d'autofinancement correspondant à une période de fonctionnement et n la période requise pour atteindre l'investissement initial,  $I_{ini}$ .

Lors du fonctionnement du séchoir solaire différents types de charges apparaissent, elles sont classées dans le tableau 1.3

Tableau 1.3. Classification des charges selon sa nature

| Nature des charges                               | Montant annuel |
|--------------------------------------------------|----------------|
| Frais de personnel                               | \$             |
| Frais d'électricité                              | \$             |
| Frais d'utilisation des chariots                 | \$             |
| Frais d'entretien                                | \$             |
| <b>Total charges variables</b>                   | <b>\$</b>      |
| Frais de structure et taxes diverses             | \$             |
| Amortissements (amortissement technique)         | \$             |
| Frais d'amortissements (amortissement financier) | \$             |
| <b>Total charges fixes</b>                       | <b>\$</b>      |
| <b>Total général de charges</b>                  | <b>\$</b>      |

Le **seuil de rentabilité, SR** représente le chiffre d'affaires pour lequel une entreprise ne fait ni perte ni bénéfice après un certain volume d'activité. Nous l'exprimons en termes de mois d'activité selon la relation 1.2.

$$SR = \frac{CF \times N}{MB} \quad (1.2)$$

où :

CF : charges fixes annuelles,

N : nombre de mois de fonctionnement par an et

MB : marge brute

La connaissance de l'investissement initial demande la définition des variables de conception permettant de définir, au stade préliminaire, chaque unité. Ces variables seront évaluées à partir de l'expression des modèles de fonctionnement de chaque entité

Ces deux indicateurs permettront de qualifier la rentabilité du projet envisagé et de surcroît, ils nous aideront aux choix de conception, ils constituent des critères d'appréciation.

## 1.5 Cahier de charge Fonctionnel, CdCF

### 1.5.1 Approche fonctionnelle externe

Cette approche permet d'analyser notre système afin de traduire les besoins exprimés par des fonctions. Il s'agit de l'approche fonctionnelle externe. Cette analyse permet de visualiser les fonctions service (FS) que le système réalisera ainsi que les fonctions contraintes (FC) imposées par les milieux extérieurs pour chaque situation de vie (SdV). La

FS traduit l'action attendue du système durant la situation de vie considérée alors que les FC concernent les contraintes imposées au système par chaque milieu extérieur.

### **1.5.2 Expression du Cahier de charge Fonctionnel, CdCF**

Ce cahier des charges comprend les fonctions structurantes garantes de la bonne conception du séchoir [Sca05] et les critères d'appréciation de réalisation de ces fonctions. Certain de ces critères sont des critères admis de concert par le concepteur et son client, d'autres concernent des critères de bonne conception, ils sont donc exclusivement émis par le concepteur [Sca04]. On doit donc trouver les critères d'appréciation client dans le CdCF. Les critères qualité et temps de séchage (lié à la teneur en eau finale) vont concerner les situations de vie fonctionnement et le critère coût de possession concernent les situations de vie conception (investissement) et fonctionnement (coût de fonctionnement)

Partant des situations de vie retenues comme structurantes pour le séchoir solaire (fonctionnement jour et fonctionnement nuit), nous identifions la fonction service du système nommée, « sécher le bois ». Cette fonction devra nécessairement être accomplie et la qualification de sa réalisation se fera par un seuil de teneur en eau à respecter afin d'obtenir un produit satisfaisant en termes d'humidité. Ce seuil constitue le critère « performances attendues » du système, et nous associons une variable de référence à savoir, la teneur en eau d'usage du bois,  $W_f$ . Ce critère impose d'arrêter le séchage lorsque le bois atteint une teneur en eau correspondant à  $0,12 \text{ kg}_w/\text{kg}_{bs}$ , [Ale02]. Cette borne constitue le niveau du critère d'appréciation.

Lors du fonctionnement du système les milieux extérieurs imposent des contraintes. Ces fonctions provoquent la conception d'un système de séchage résistant aux agressions des milieux environnants (soleil, eau, intempérie). Pour un fonctionnement maîtrisé, l'utilisation de ventilateurs impose la présence de l'énergie électrique. Le fonctionnement doit permettre la maîtrise de la qualité du produit final. Dans cette logique, nous imposons le critère d'appréciation « qualité du bois sec ». A la fin du processus de séchage, nous accepterons un taux de bois de mauvaise qualité de 5%. Au-delà de ce seuil, le séchage sera considéré comme de mauvaise qualité. Les tableaux 1.4, 1.5 et 1.6 regroupent les critères concernant la satisfaction de la fonction service et des fonctions contraintes lors des deux situations de vie structurantes.

Tableau 1.4. Caractéristiques structurantes retenues lors de l'approche fonctionnelle externe, situation de vie « fonctionnement jour », [Sca04].

| Fonction                                    | Critère                 | Variable concernée                  | Niveau du critère                               |
|---------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|
| FS1 : Sécher le bois                        | Performances attendues  | Teneur en eau, $W_f$                | $0,10 < W_f < 0,12 \text{ kg}_w/\text{kg}_{bs}$ |
| FC1 : Relier à l'énergie électrique         | Coût de possession      | Consommation énergétique            | $C_{cEI} < 12 \text{ kWh}$                      |
| FC2 : Résistance aux agressions du soleil   | Durée de vie minimale   | MTTF : mean time to (first) failure | $MTTF > 10 \text{ ans}$                         |
| FC3 : Résistance à l'environnement          | Durée de vie minimale   | MTTF : mean time to (first) failure | $MTTF > 10 \text{ ans}$                         |
| FC4 : Maîtriser la qualité du bois          | Performances attendues  | Pourcentage de bois endommagé, $bX$ | $0 < bX < 5\%$                                  |
| FC5 : Maîtriser les coûts de fonctionnement | Coûts de fonctionnement | SR                                  | $SR < 6 \text{ mois}$                           |

Tableau 1.5. Caractéristiques structurantes retenues lors de l'approche fonctionnelle externe, situation de vie « fonctionnement nuit », [Sca04].

| Fonction                                    | Critère                   | Variable concernée                  | Niveau du critère                               |
|---------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|
| FS1 : Sécher le bois                        | Performances attendues    | Teneur en eau, $W_f$                | $0,10 < W_f < 0,12 \text{ kg}_w/\text{kg}_{bs}$ |
| FC1 : Relier à l'énergie électrique         | <b>Coût</b> de possession | Consommation énergétique            | $C_{cEI} < 12 \text{ kWh}$                      |
| FC3 : Résistance à l'environnement          | Durée de vie minimale     | MTTF : mean time to (first) failure | $MTTF > 10 \text{ ans}$                         |
| FC4 : Maîtriser la <b>qualité</b> du bois   | Performances attendues    | Pourcentage de bois endommagé, $bX$ | $0 < bX < 5\%$                                  |
| FC5 : Maîtriser les coûts de fonctionnement | Coûts de fonctionnement   | SR                                  | $SR < 6 \text{ mois}$                           |

Tableau 1.6. Caractéristiques structurantes retenues lors de l'approche fonctionnelle externe, situation de vie « conception », [Sca04].

| Fonction                           | Critère        | Variable concernée                        | Niveau du critère         |
|------------------------------------|----------------|-------------------------------------------|---------------------------|
| FC1 : Réaliser un séchoir vendable | Investissement | Durée de récupération des investissements | $3 < DRI < 4 \text{ ans}$ |

Les situations de vie fonctionnement jour, nuit et la situation de vie conception (tableau 1.6) permettent de définir les critères liés au coût de possession et permettre ainsi de hiérarchiser les différents séchoirs conçus.

Le niveau de satisfaction des critères permet de hiérarchiser les différents séchoirs conçus et permet de prendre les décisions de conception. Pour exprimer les critères, il faut disposer des modèles de chaque unité composant le séchoir.



## 2 Séchoirs solaires à bois : Etat de l'art et évolutions prévisibles

Depuis les années 1960, plusieurs types de séchoirs solaires ont été étudiés et améliorés, ainsi, on trouve des systèmes très simples de petite capacité jusqu'à des séchoirs automatisés avec un système de stockage d'énergie intégré.

Beaucoup d'ouvrages classent les séchoirs solaires [Plu96], ils les divisent en séchoirs solaires du type serre agricole et en séchoirs solaires avec un capteur externe. L'aérodynamique du séchoir est à convection naturelle ou à convection forcée.

Nous proposons une classification des séchoirs à bois en prenant en compte un critère d'agencement des unités principales (capteur et pile de bois) », nous constituons ainsi trois groupes représentatifs.

Afin d'analyser les séchoirs, de qualifier les fonctionnalités respectives et d'en déduire les évolutions prévisibles, nous définissons une procédure méthodologique. Une approche organique met en évidence chacune des unités du système et montre leurs relations avec l'environnement. On trouve successivement une unité de séchage, une unité de chauffage, une unité de stockage et enfin une unité de commande. Les composants d'interaction relient les entités entre elles.

L'analyse des évolutions constatées a été réalisée à l'aide des 8 lois d'évolution des systèmes techniques issues de la théorie TRIZ [Sav00]. Cette analyse a été réalisée au niveau du système global mais aussi pour l'unité de chauffage (capteur solaire) et l'unité de stockage d'énergie (ballon d'eau). Finalement, nous proposons un nouveau concept qui réunit l'agencement le plus intéressant, l'unité de chauffage la plus efficace et la plus économique, l'intégration d'une unité de stockage d'énergie solaire innovante. Il inclut par ailleurs, les évolutions prévues afin d'améliorer la qualité du séchage. Ce séchoir a été conçu, modélisé, simulé et optimisé durant les travaux de thèse.

### 2.1 Méthodologie d'analyse

#### 2.1.1 Approche Organique

L'analyse du système « séchoir solaire à bois » consiste à explorer les différentes conceptions existantes autant dans le marché que dans la bibliographie disponible. Pour la description du système, nous allons nous appuyer sur une des approches utilisées



dans l'analyse de structuration d'un problème de conception, l'approche organique [Sav05].

L'approche organique permet la décomposition structurelle d'un système. Pour sa représentation, elle exploite un outil issu de l'analyse fonctionnelle, l'Organigramme Technique (OT) [Sca05], qui réalise une description technique du système à concevoir par unités fonctionnelles. Afin de prendre en compte les influences de l'environnement du système, on étend l'OT aux milieux extérieurs, on définit ainsi l'**Organigramme Technique étendu (OTé)** [Nad06]. Les unités vont être reliées entre elles par les composants d'interaction, ces composants transmettent des flux d'énergie, des flux de matière et des flux d'information. Ce sont des composants manufacturés (boulons, vis, rivets, conduites, câbles, fils électriques, connecteurs,...) ou des composants de liaison (soudure, colle,...). L'observation des systèmes techniques montre qu'ils se standardisent dans le temps (en descendant dans les niveaux systémiques de l'OT), que leur nombre diminue puis qu'ils disparaissent (les unités s'agrègent).

### ***2.1.2 Lois d'évolution des systèmes techniques***

Le degré de développement d'un système quelconque est analysé à partir de deux grandes lignes d'évolution, d'une part, l'évolution de l'environnement du produit (milieux extérieurs) et, d'autre part, l'évolution de ses composants.

Pour qualifier les constatations observées dans le cas des séchoirs solaires à bois, nous utilisons les 8 lois ou tendances d'évolution des systèmes techniques issues de la théorie TRIZ [Sav00]. Chaque séchoir est noté selon chaque loi par rapport à une grille d'analyse et ces informations sont représentées sur un radar qui détermine le degré d'évolution du système. Ces lois ont pour nom :

***Loi 1. Intégralité de parties***

***Loi 2. Conductivité énergétique***

***Loi 3. Coordination des rythmes***

***Loi 4. Augmentation du niveau de perfectionnement***

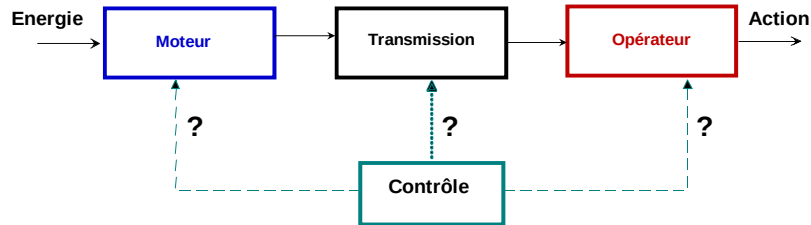
***Loi 5. Développement inégal des entités***

***Loi 6. Transition vers le super système***

***Loi 7. Transition d'un macro-niveau vers un micro-niveau***

***Loi 8. Augmentation du dynamisme et du niveau de contrôlabilité***

Pour réaliser l'action incriminée, une énergie doit être transformée, transmise et utilisée. La loi 1 définit l'existence de 4 entités dans le système (figure 2.1), chacune doit posséder une participation minimale lors de la réalisation de l'action.



**Figure 2.1 Entités présentes dans un système selon la loi d'intégralité de parties (loi 1)**

Il est quelquefois difficile d'exprimer cette loi, Nadeau, [Nad06] recommandent de suivre le flux fonctionnel lié à la réalisation de l'action et de s'appuyer sur un bloc diagramme fonctionnel, BDF, [Sca05]. Le BDF permet de mettre en évidence les relations entre les fonctions et les composants d'un système, [Sca05].

Selon la loi 2, le système doit permettre le libre passage de l'énergie entre toutes ses entités lors de la réalisation de l'action (l'énergie peut être transmise par contact ou sans contact). La transmission d'énergie doit être la plus efficace possible et il s'agit de contrôler au maximum de déperditions thermiques dans le système ainsi que l'utilisation correcte de l'énergie.

La troisième loi énonce que les fréquences, vibrations, périodicités doivent être cohérentes entre toutes les entités du système lors de la réalisation de l'action.

Nous analysons maintenant le niveau de perfectionnement du système. La loi 4 signale que tout système tend à évoluer, dans un premier temps, en augmentant sa complexité pour augmenter ses performances et accroître ses fonctionnalités. Puis, ensuite, il tend à se simplifier tout en conservant ses fonctionnalités et sa sûreté de fonctionnement.

Chaque entité possède sa propre évolution et une entité qui arrive à son déclin bloque l'évolution du système. La loi 5 concerne ce développement inégal entre les entités qui provoque la génération de contradictions techniques et physiques. Pour qu'un système puisse évoluer correctement on peut envisager deux solutions : l'élimination des contradictions et le développement homogène des entités.

Les lois 6 et 7 définissent les possibilités de saut vers les niveaux systémiques inférieur (micro-niveau) ou supérieur au sens de l'OTé (par association avec les milieux extérieurs). L'environnement du produit (les milieux extérieurs) influence les changements possibles. L'évolution des milieux extérieurs dépend de critères

fonctionnels, de verrous technologiques à faire sauter, de contraintes économiques, sociologiques voire même politiques.

La dernière loi (loi 8) concerne l'augmentation du dynamisme et du niveau de contrôlabilité : Les entités du système évoluent de comportements statiques à dynamiques pour accroître leur contrôlabilité ainsi, les entités non contrôlables deviennent contrôlables et compatibles entre elles.

## **2.2 Etat de l'art du système « Séchoir solaire »**

### **2.2.1 Approche Organique**

Simpson [Sim92] a étudié les séchoirs solaires à bois et propose une classification des séchoirs solaires selon le niveau de complexité de pilotage. Le plus simple correspond à un séchoir isolé de type serre agricole à circulation naturelle. Puis, il regroupe les serres agricoles destinées aux petites ou moyennes entreprises. Les séchoirs semi-automatiques pour l'amélioration du rendement thermique constituent le troisième groupe. Finalement, le quatrième groupe, le plus complexe, est celui des séchoirs solaires automatisés équipés des systèmes tels que des thermostats, des hygromètres, des registres pour gérer les débits d'air, des ventilateurs réversibles et une source d'énergie complémentaire. Ce dernier groupe impose des investissements importants.

Pour l'analyse de ces systèmes de séchage solaire, et en accord à la méthode décrite, nous identifions l'agencement des principaux composants d'un séchoir solaire sur l'organigramme technique étendu de niveau 1 (OTé) de la [figure 2.2](#).

Nous définissons un séchoir solaire comme un système composé de deux unités principales qui sont : une unité de séchage (chambre de séchage, b) et une unité de chauffage (capteur solaire, c). Il peut aussi exister, éventuellement, une unité de stockage d'énergie (stk) et une unité de commande. Lors du fonctionnement d'un système, des flux fonctionnels circulent entre les unités, ce sont des flux d'énergie, des flux de matière et des flux d'informations. Dans le cas d'un séchoir, il s'agit du flux d'air de séchage (énergie et matière). Le flux d'information est lié aux paramètres de commande du séchoir.

Afin d'assurer le transit du flux d'air de séchage, les unités sont en interaction. Ainsi des composants d'interaction sont identifiés ce sont des conduites (convection naturelle et forcée) et des ventilateurs (convection forcée). Le fonctionnement du système va être fortement influencé par les milieux environnants tels que : la position

du soleil, les variations de température et humidité relative de l'air extérieur (météorologie) ainsi que la disponibilité de l'énergie électrique pour le fonctionnement des ventilateurs.

Les positions respectives des unités vont définir les différents agencements possibles et la représentation du séchoir va utiliser les icônes proposés sur la [figure 2.2](#)

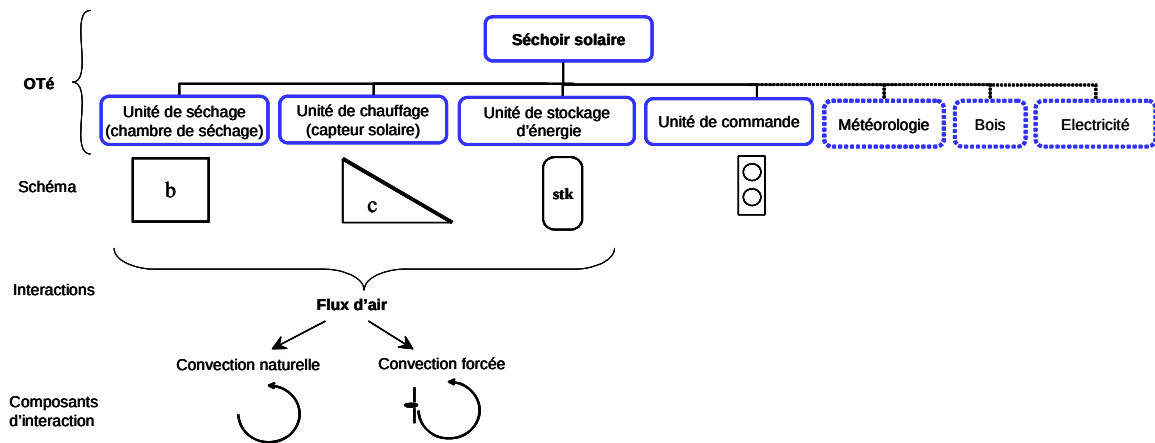


Figure 2.2. Organigramme technique (OTé) du séchoir et composants d'interaction

### 2.2.2 Analyse globale de l'état de l'art

À la suite de la recherche réalisée, nous avons observé diverses évolutions des unités du système « séchoir solaire ».

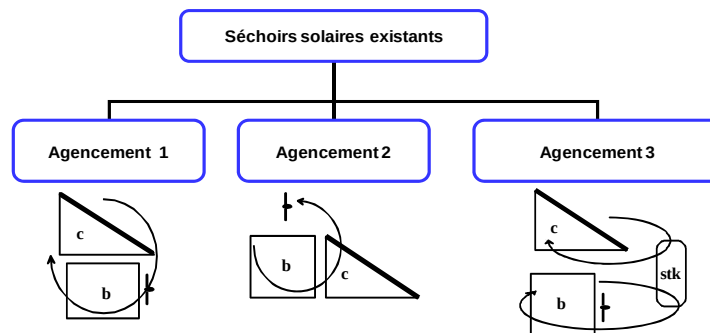
Concernant l'unité de chauffage, l'amélioration la plus remarquable a été celle relative à l'efficacité des capteurs. Dans la suite, nous présentons une analyse spécifique sur les évolutions constatées des capteurs solaires dans la partie, « 2.3 évolution de l'unité de chauffage ».

Concernant l'unité de séchage, les principaux points remarquables sont :

- La réduction des déperditions thermiques (parois isolées). L'utilisation de matériaux de construction rustiques sans isolation (feuille plastique, bois) a évolué vers de la brique et du béton bien isolés, [[Sim84](#), [Wen92](#)]. En particulier, l'entreprise australienne Solar Dryers Australia propose des séchoirs dont les murs sont en bardages en alliage d'aluminium avec une isolation interne,
- L'optimisation de l'aéroulque (pertes de charge réduites et vitesses uniformisées) grâce à la position à l'aspiration du composant d'interaction ventilateur,

- L'utilisation de dispositifs de contrôle automatique de l'humidité à l'intérieur de la chambre, du renouvellement de l'air et du by-pass du capteur lorsque l'ensoleillement n'est plus suffisant [Sim84].

Trois agencements représentatifs ressortent, ainsi nous avons effectué un classement par l'agencement des composant principaux du séchoir, c'est-à-dire l'unité de séchage (pile de bois), l'unité de chauffage et l'unité de stockage quand elle existe. La figure 2.3 récapitule les principaux agencements retrouvés.



**Figure 2.3. Classement des séchoirs solaires selon l'agencement des unités principales**

Les trois groupes issus du classement des séchoirs solaires montrent les efforts que les chercheurs et concepteurs de séchoirs solaires à bois ont déployés pour essayer d'aboutir à un système de séchage solaire autarcique qui soit fonctionnel tant le jour que la nuit.

L'agencement 1 est le groupe qui a inspiré le développement du séchage solaire [Mal62]. Ensuite, cet agencement a été repris par beaucoup de constructeurs mais l'ensemble n'a globalement pas beaucoup évolué. Cependant, nous le verrons, l'évolution proposée par des australiens qui intègrent le capteur à la chambre de séchage constitue une solution très intéressante, [Haq02].

Nous constatons que le groupe de séchoirs qui a été le plus étudié est celui qui correspond à l'agencement 2 car la séparation des unités rend les séchoirs solaires plus flexibles.

Le troisième groupe correspond aux séchoirs qui comportent une unité de stockage d'énergie. Nous en avons trouvé 2 modèles, le premier utilise l'eau comme fluide caloporteur à des fins de stockage, et le second comporte un lit de cailloux placé en dessous du séchoir chauffé directement par l'air de la chambre.

Les positions des composants d'interaction permettent de différencier les séchoirs et montrent les évolutions.

### 2.2.2.1 Séchoir solaire avec capteur intégré (Agencement 1)

Le séchoir solaire avec capteur intégré est un système dans lequel les unités font partie d'une même construction (figure 2.4), le capteur solaire est toujours placé au-dessus de la pile de séchage ou directement sur le toit de la chambre. Il est le plus ancien [Mal62], mais aussi le plus repris au cours des années à cause de son encombrement réduit et de sa facilité de construction. Hormis l'amélioration des capteurs, l'évolution principale concerne le positionnement des ventilateurs et leurs sens d'aspiration, ainsi, nous trouvons 2 sous-groupes représentatifs :

- celui qui aspire depuis le capteur et souffle vers la pile (bonne répartition d'air dans le capteur), [Wel04, Lun02, Vie97, Mar97, Lum79, San81, Gou80]
- celui qui aspire depuis la pile et souffle vers le capteur (bonne répartition d'air dans la pile), [Kum81].

Afin de récupérer le maximum d'énergie solaire en suivant le parcours du soleil pendant la journée (latitude favorable), Haque et al. [Haq02] proposent un capteur solaire enveloppant la chambre de séchage. La chambre de séchage joue 2 rôles, d'un côté, elle fonctionne comme la couverture transparente de l'absorbeur et, d'un autre côté, une couche d'air entre les parois intérieure et extérieure réduit les pertes thermiques du séchoir.

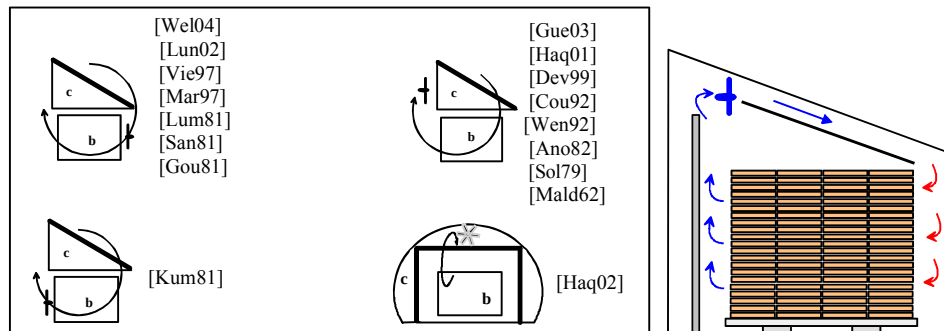


Figure 2.4. Séchoirs solaires avec capteur intégré (agencement 1)

### 2.2.2.2 Séchoir solaire avec capteur latéral semi-intégré (Agencement 2)

Le séchoir semi-intégré est un système dans lequel les unités sont séparées et ne sont liées que par les composants d'interaction, les conduites d'air et le ventilateur, (figure 2.5). Plusieurs auteurs ont proposé cet agencement. On trouve initialement, bien sûr, le séchoir à circulation d'air naturelle [Reu97], mais les évolutions suivantes intègrent un ventilateur pour augmenter l'efficacité de séchage.

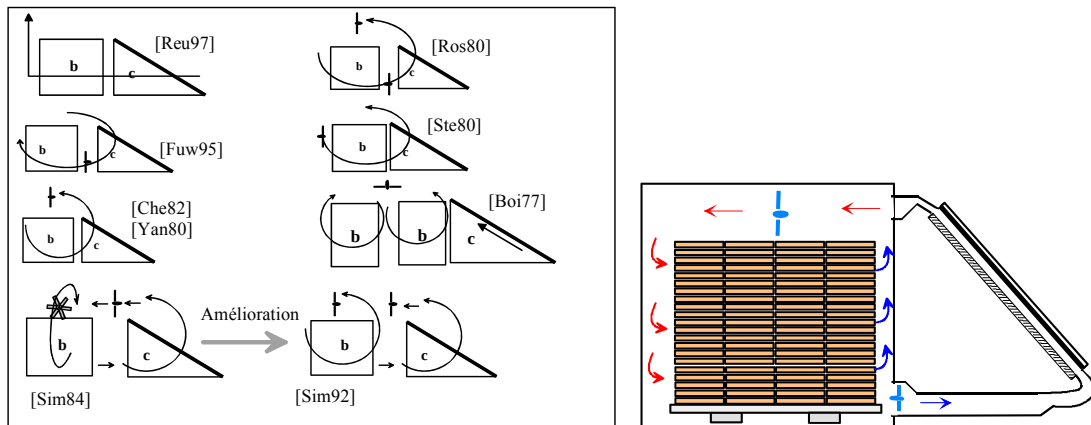
La localisation du composant d'interaction ventilateur diffère dans chaque modèle. Par exemple, certains auteurs [Fuw95, Ros80] proposent le ventilateur entre la

chambre et le capteur (partie basse), d'autres le placent au-dessus de la pile de bois [Ros80]. Pour améliorer l'évacuation, un concept met le ventilateur entre deux piles de bois [Boi77].

Les différentes innovations constatées concernent ainsi :

- l'amélioration de l'écoulement [Sim84, Ros80],
- la possibilité de by-pass du capteur la nuit [Sim84, Reu97, Boi77, Ros80].

Le placement du ventilateur en amont ou en aval de la pile de bois permet, selon la construction du séchoir, de s'assurer d'une bonne répartition de l'air dans la pile. Classiquement, la position en aval, à l'aspiration du système que l'on veut maîtriser, est la plus efficace, et, de surcroît, les dépenses d'énergie électrique en sont réduites.



**Figure 2.5. Séchoirs solaires avec capteur semi intégré (agencement 2)**

Le fait de construire les unités de séchage et de chauffage indépendantes, représente un avantage pour l'évolution de chacune d'elles. Ainsi, les modifications de l'une n'influent pas le développement de l'autre.

### 2.2.2.3 Séchoir solaire avec stockage (Agencement 3)

Cet agencement constitue une évolution de l'agencement 2 par l'intégration du stockage d'énergie. On trouve deux solutions pour ce type d'agencement.

Un premier séchoir est muni d'une batterie de capteurs à eau (figure 2.6) [Mcc80]. Les capteurs utilisent le composant d'interaction « conduite » pour les lier à une unité de stockage d'eau, puis cette eau assure le réchauffage de l'air par l'intermédiaire d'un échangeur situé dans l'unité de séchage.

L'autre solution constatée concerne un séchoir solaire avec un lit de pierres situé sous la pile de bois. Un flux d'air venant du capteur traverse le lit et ensuite passe dans la pile de bois. Evidemment, l'énergie fournie au bois en phase diurne sera affectée par

les capacités d'accumulation du lit. Cette solution a été peu exploitée à cause de l'encombrement du lit de pierres. [Rea74, Ano82, Rob83, Yan80].

Le stockage d'énergie permet de maintenir une température plus uniforme ou de maîtriser la température dans la chambre. Cela va se traduire directement sur la qualité du produit car on uniformise le chauffage et on peut contrôler le système.

L'utilisation des capteurs à eau pour emmagasiner l'énergie ainsi que pour chauffer la chambre affecte le rendement du système puisqu'il y a deux transferts (aussi bien le jour que la nuit) entre l'eau et l'air au niveau capteur-stockeur et au niveau stockeur-chambre.

Les coûts de fabrication du stockeur et les coûts du terrain représentent un investissement initial important. Ce système doit se juger à partir des critères différents, en particulier le coût de possession et l'amélioration de la qualité des produits.

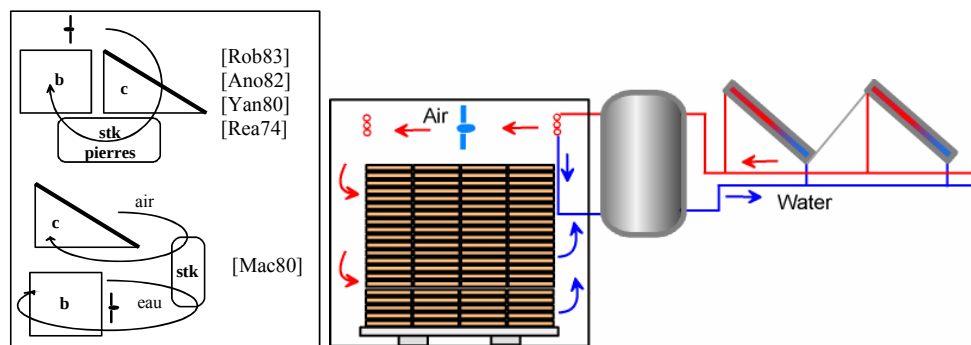


Figure 2.6. Séchoir solaire avec stockage (agencement 3)

### 2.2.3 Tendances d'évolution des séchoirs solaires pour bois

Nous utilisons les tendances d'évolution évoquées pour synthétiser l'analyse de l'existant et imaginer les évolutions à venir.

Pour réaliser l'action « sécher le bois », l'énergie solaire est transformée, transmise et utilisée par le système. A cette fin, la loi d'intégralité des parties (loi 1) identifie une entité motrice (le capteur de l'unité de chauffage transforme l'énergie du rayonnement solaire en énergie thermique sous forme d'air chaud), un transmetteur (les conduites transmettent l'air chaud), un opérateur (la chambre de séchage où l'air chaud sèche le bois) et une entité de contrôle (figure 2.7).

Le contrôle de la qualité du produit est maintenant assuré à partir du contrôle de l'humidité et de la maîtrise des flux d'air de séchage par l'intermédiaire des variables de



pilotage (VPi), le taux de renouvellement d'air  $\tau_r$  et le taux de mélange  $\tau_m$ . Les différentes entités vont évoluer en améliorant leur efficacité énergétique.

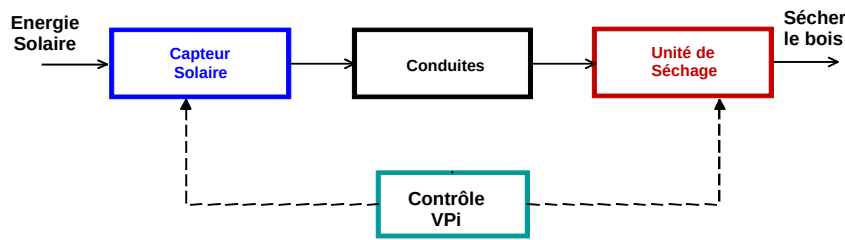


Figure 2.7. Intégralité des parties appliquée au séchoir solaire

Par rapport aux deux lois suivantes (loi 2 : conductivité énergétique et loi 3 : coordination des rythmes), on constate que les séchoirs sont de mieux en mieux isolés. Les isolants sont issus des ressources disponibles dans l'environnement. La notion de rythme se retrouve dans l'agencement 3 avec la prise en compte des alternances diurne/nocturne. L'utilisation de ventilateurs habilement placés et le plus souvent à l'aspiration devant la pile va dans le même sens.

Il s'agit ensuite d'étudier le degré de perfectionnement au travers de la loi 4. L'apparition des contrôles va se traduire par une gestion d'une aéraulique plus complexe et l'intégration du stockage. Le contrôle de la qualité du produit dans la chambre va se faire via les contrôles de l'humidité et de l'aéraulique.

Concernant la loi 5, l'agencement 1 fait que la chambre de séchage impose les dimensions du capteur, l'évolution vers l'agencement 2 permet un dimensionnement adapté aux besoins d'énergie et au volume de bois à sécher.

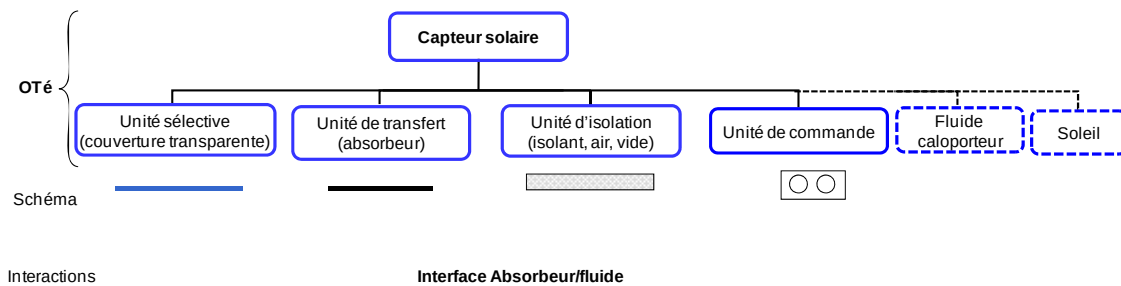
Les lois 6 et 7 définissent les possibilités de saut vers le micro-niveau et vers l'association du système avec les milieux extérieurs. Nous remarquons que la connaissance fine du matériau et des phénomènes de transfert associés permet de mieux conduire les séchoirs, de proposer des asservissements et, ainsi, d'améliorer le contrôle du séchage et la qualité du produit séché. L'évolution de l'agencement 1 [Haq02] intègre le séchoir dans son environnement et réduit ainsi les surfaces occupées, cette solution d'intégration est dans la logique d'évolution de la loi 7.

La dernière loi (loi 8) concerne l'augmentation du dynamisme et du niveau de contrôlabilité : La flexibilité de l'agencement 2, la disponibilité d'énergie nocturne due à l'intégration d'un stockeur à chauffage séparé donnent des possibilités d'adaptation dynamique, la présence de l'unité de stockage, des trappes et des ventilateurs réglables permettra la gestion et le contrôle des conduites de séchage.

## 2.3 Etat d'évolution de l'unité de chauffage

### 2.3.1 Approche Organique

D'après le système global (OTé N1, figure 2.2), l'unité de chauffage est présente au niveau 2, c'est un capteur solaire plat dans les séchoirs. Un capteur solaire plat est un type d'échangeur de chaleur particulier qui transforme l'énergie solaire rayonnante en chaleur [Duf06]. La conception du capteur dépendra de la quantité d'énergie demandée par le système à chauffer et du fluide caloporteur disponible, ainsi, on va des capteurs plats simples jusqu'aux capteurs sous vide et aux concentrateurs solaires. Les capteurs solaires sont généralement composés d'une couverture transparente, d'un absorbeur métallique noirci, d'une ou plusieurs conduites et d'un isolant. Pour décrire ce système, nous utilisons l'organigramme technique étendu de niveau 2 (OTé N2) de la figure 2.8, [Sca05].



**Figure 2.8. Organigramme technique étendu du capteur solaire plat (OTé)**

Dans le cas des capteurs, nous ne trouvons pas de composants d'interaction entre les unités du système. Au niveau de l'interface avec l'absorbeur, le fluide récupère l'énergie par convection. Cette énergie est transmise directement à l'opérateur ou bien emmagasinée dans un stockeur.

Le fluide caloporteur est un milieu extérieur du système, il peut être choisi selon les besoins de chaleur. Plusieurs fluides sont utilisés tels que l'air, l'eau et les fluides thermiques (chaleur sensible) ou des substances à changement de phase (chaleur latente). La chaleur récupérée depuis l'absorbeur dépendra des propriétés physiques du fluide. L'utilisation des fluides à changement de phase permet d'améliorer les transferts au niveau de l'interface absorbeur/fluide, et par conséquent une meilleure récupération d'énergie.

Les capteurs à chaleur sensible classiquement utilisés peuvent être classés en deux groupes : les capteurs à air et les capteurs à eau [Ber04].

Selon plusieurs auteurs, la conception des capteurs solaires permet de les classer dans des groupes différents, suivant l'agencement des composants [Heg99, Heg00] ou selon la présence ou l'absence de la couverture transparente [Ong95, Eke99].

Les premiers capteurs étudiés étaient composés par un absorbeur métallique, un isolant, [Njo00] et une couverture transparente facultative. L'évolution suivante impose l'apparition d'une seule ou d'une double couverture transparente au dessus de l'absorbeur afin de réduire les déperditions thermiques à l'avant [Cho95].

Dans notre analyse, nous allons étudier trois groupes de capteurs solaires : les capteurs à air, les capteurs à eau et les tubes sous vide. Nous distinguerons leurs évolutions à l'aide des lois d'évolution des systèmes techniques.

Les capteurs solaires à air sont généralement construits à des fins d'utilisation directe en séchage. L'air est directement réchauffé lors de son passage à travers le capteur.

Le groupe des capteurs solaires à eau, destinés principalement au chauffage de l'eau sanitaire, a rapidement amélioré son efficacité. Cela est dû à l'utilisation des matériaux spéciaux permettant l'amélioration des propriétés optiques de ses composants, (couverture transparente et absorbeur).

Finalement le 3<sup>ème</sup> groupe concerne un type de capteur spécial ; le capteur solaire sous vide. Il est généralement constitué par : un tube en verre transparent, un absorbeur sélectif et une ou plusieurs conduites. L'absorbeur est placé à l'intérieur du tube puis, le tube est vidé de l'air qu'il contient ou bien rempli avec un gaz inerte ; ainsi les pertes par convection entre l'absorbeur et la paroi vitrée sont minimisées, [Peu05].

La loi d'intégralité de parties permet de structurer l'analyse de la réalisation de l'action « chauffer un fluide à partir de l'énergie solaire », fonction globale du capteur solaire. On identifie ainsi les entités du système sur la figure 2.9. Une entité motrice représentée par l'unité sélective, (la couverture transparente, l'air confiné ou le vide entre couverture et absorbeur, la surface de l'absorbeur) ; une entité de transmission (l'absorbeur) et une entité opératrice (l'interface absorbeur/fluide caloporteur). L'unité de contrôle, si elle existe, permet l'orientation du capteur par rapport au soleil.

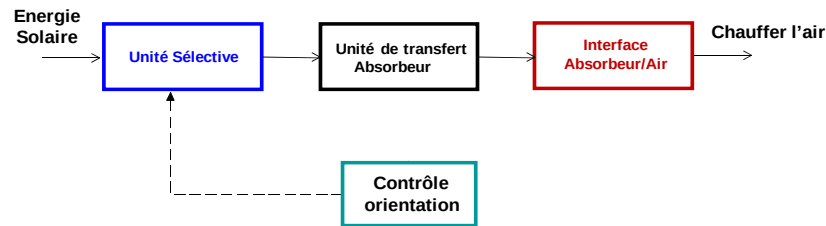


Figure 2.9. Loi d'intégralité de parties appliquée aux capteurs solaires

Les trois groupes sont différenciés par l'entité motrice (unité sélective) et l'entité opératrice (interface absorbeur/fluide caloporteur) (figure 2.10).

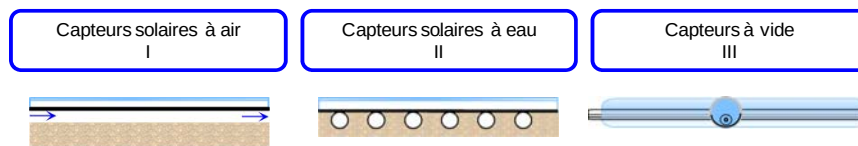


Figure 2.10. Classement des capteurs solaires existants

## 2.3.2 Analyse globale

### 2.3.2.1 Evolution de l'unité sélective

Une couverture efficace doit minimiser : l'absorption et la réflexion du rayonnement solaire afin que la plus grande quantité d'énergie possible atteigne l'absorbeur.

Divers matériaux (verre, matière plastique) ont été utilisés pour la fabrication des couvertures transparentes. Les premières couvertures construites en matière plastique réduisaient les coûts, mais aussi la durée de vie. Puis, les couvertures plastiques renforcées par des fibres de verre, vont prolonger la durée de vie sans progrès sur la performance du capteur. Finalement, le verre allie efficacité et durée de vie de la couverture. Les déperditions ont encore été réduites par une double couche de verre, mais l'utilisation d'un double vitrage n'est plus nécessaire grâce à l'apparition des verres sélectifs (le verre blanc antireflet à faible teneur en fer) qui réduisent la réflexion et augmentent la transmission de l'énergie solaire [Peu05, Fre-s/d].

Le second élément faisant partie de l'unité sélective est l'air confiné entre la couverture et l'absorbeur. On doit limiter les effets convectifs pour minimiser les pertes sur la face avant. Des innovations sont apparues en remplaçant l'air par un gaz inerte ou le vide (seulement pour les capteurs à eau grâce à la tenue mécanique des tubes).

### 2.3.2.2 Evolution de l'absorbeur

L'absorbeur participe à la transformation de l'énergie par sa surface, transmet l'énergie thermique par conduction et assure le chauffage du fluide caloporteur par le transfert convectif à son interface avec le fluide caloporteur.

#### 2.3.2.2.1 Transformation de l'énergie

La transformation de l'énergie rayonnante a imposé diverses modifications des propriétés optiques de l'absorbeur. Les revêtements sélectifs jouent sur la réduction de l'émittance dans le champ des longueurs d'onde du rayonnement thermique. La performance des absorbeurs actuels a été améliorée grâce à l'utilisation de ces revêtements sélectifs, par exemple ; les alliages métalliques au chrome, le chrome noir, les revêtements au plasma, les revêtements PVD (Physical Vapor Deposition), le CERMET (céramiques à base d'oxydes métalliques), etc. [Peu05].

La topologie a beaucoup évolué au cours du temps, ainsi nous trouvons des capteurs généralement composés par une plaque de métal noircie ou de matière plastique (EPDM) dans laquelle circule le fluide à réchauffer, puis ils se segmentent sous forme de tubes comme le représente la [figure 2.11](#), [Ong95, Cho95, Nap03, Tsi00].

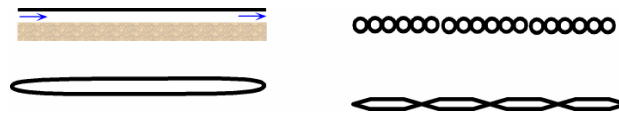


Figure 2.11. Les premiers types d'absorbeur solaire

Dans le groupe des capteurs à air, on retrouve aussi différents agencements de l'absorbeur tels que : collé à l'isolant [Heg99, Heg00, Kar04, Njo06], localisé entre deux passages d'air [Kar04] ou placé entre la vitre et le passage d'air [Heg00, Gao07, Mit06]. Les divers agencements du composant absorbeur révèlent ainsi l'évolution du capteur à air. Ces évolutions progressives, vers une meilleure efficacité, sont montrées sur la [figure 2.12](#).



Figure 2.12. Evolution du groupe I, ordre d'évolution

Selon une même logique, on trouve diverses formes d'absorbeur dans les capteurs à eau ([figure 2.13-A](#)).

### 2.3.2.2.2 Transmission de l'énergie

Plusieurs matériaux ont été utilisés durant les années 80, tels que : l'acier, l'acier inoxydable, l'aluminium et le cuivre. Actuellement, on utilise des métaux conducteurs pour l'absorbeur, principalement l'aluminium et le cuivre.

### 2.3.2.2.3 Transfert de l'énergie au fluide caloporteur

L'augmentation de la surface d'échange et de son efficacité selon le fluide caloporteur a été une de ses premières évolutions. Nous trouvons des tôles du type « persiennes » [Ahm01, Amm03, Nap05, Hom00, Pot00, Aln98], des tôles ailetées [Eke99, Pot00, Apu07, Kar01, Mit07, Aha07, Ese07] jusqu'à l'arrivée de l'absorbeur poreux. Ces modifications sont montrées sur la figure 2.13-B.

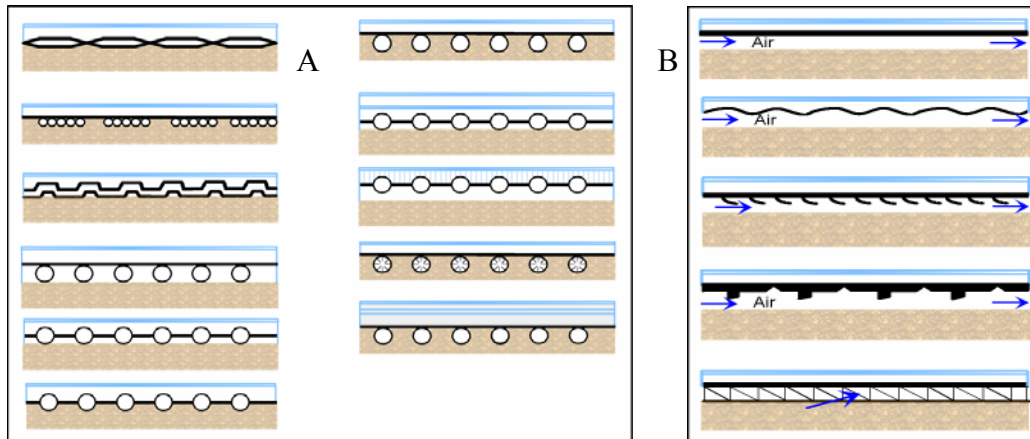


Figure 2.13. Evolution de l'unité de transfert (capteur à eau, A et capteur à air, B)

La conception optimisée des capteurs, comme des échangeurs, a conduit à diviser le passage du fluide (capteurs à air) dans le but d'augmenter la surface d'échange et diminuer la section de passage et, ainsi, maximiser la récupération de l'énergie par le fluide [Heg99, Heg00, Moh97, Eke99, Ram07]. Ensuite, la segmentation multiple du passage d'air constitue une augmentation encore plus importante de la surface et conduit, finalement, à un absorbeur poreux [Mit06, Nap05, Moh97, Fou93, Var98, Ahm95] (figure 2.14) pour un rendement augmenté de 10 à 18% [Moh97]. En revanche, le problème des importantes pertes de charge créées impose la convection forcée et un ventilateur en conséquence.

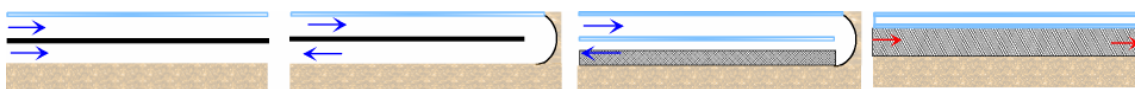


Figure 2.14. Augmentation de la surface d'échange (absorbeur/fluide)

### 2.3.2.3 Evolution de l'unité d'isolation

L'unité d'isolation joue un rôle très important lors de la conception d'un capteur solaire. Sa fonction consiste à minimiser les déperditions thermiques à l'avant et à l'arrière du capteur.

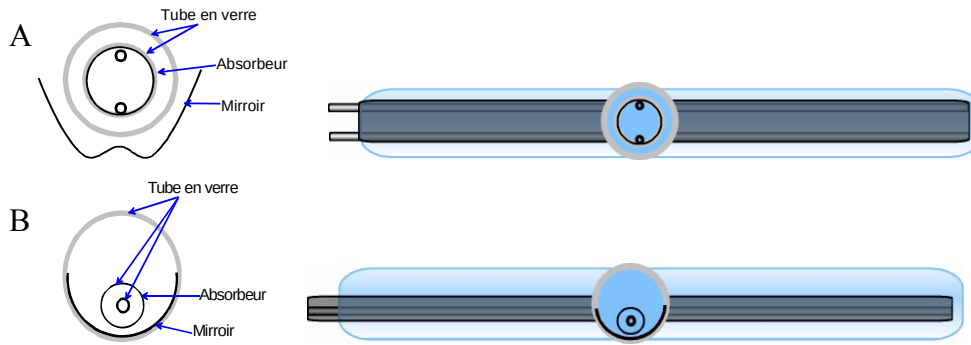
Dans le cas des capteurs plats, les déperditions thermiques à l'arrière ont été réduites grâce à l'utilisation de divers matériaux isolants, de la laine de verre en passant par l'emploi des mousses polymériques et actuellement via l'utilisation de la laine minérale [Ber04, Peu05]. Afin de réduire les coûts des matériaux du système et dans une vision développement durable, des nouveaux isolants sont proposés, il s'agit de matériaux à base de composés organiques : la laine de mouton, les fibres de bois et les fibres végétales en général.

Le problème des déperditions à l'avant a été minimisé par une couche d'air confinée entre la couverture transparente et l'absorbeur puis par des gaz inertes et enfin le vide.

En ce qui concerne l'isolation générale du capteur, Frei, s/d, [Fre-s/d] propose un capteur plat à eau à sortir en 2010. Il s'agit d'un caisson rempli avec un gaz inerte (krypton) pour réduire les pertes par convection. Dans le même esprit, les tubes sous vide représentent une évolution très importante dans le domaine de l'isolation, on a ainsi réussi à éliminer les déperditions de chaleur par convection [Peu05], cela a fait disparaître l'isolation en face arrière, cela veut dire que l'unité de chauffage commence à évoluer vers son environnement (loi 7).

A la différence des capteurs solaires plats, les capteurs sous vide ont l'avantage de capter la trajectoire du soleil pendant la journée grâce à leur forme cylindrique ce qui leur confère une meilleure efficacité de récupération de l'énergie solaire et par conséquence une performance plus élevée.

L'utilisation du vide a permis d'imaginer un capteur indépendant à récupération d'énergie par chaleur latente et ainsi d'éviter le passage du fluide caloporteur dans le tube, le tube est devenu un caloduc, l'absorbeur tubulaire emprisonne une petite quantité d'eau (ou d'un fluide différent selon la température désirée) (figure 2.15). Cette eau se vaporise dans le tube absorbeur, puis la vapeur s'élève dans le tube, elle se condense dans la partie supérieure placée dans la cuve d'eau à chauffer (condenseur) et finalement elle retourne sous forme liquide dans l'absorbeur par gravité. Le condenseur transfère la chaleur au fluide caloporteur dans la cuve [Peu05].



**Figure 2.15. Isolation sous vide (tube à flux direct, A, caloduc, B)**

- Les capteurs sous vide évoluent encore par :
- l'arrivée d'absorbeur en verre, grâce à la résolution des problèmes d'étanchéité métal/verre,
- l'incorporation d'un échangeur de chaleur dans le tube pour le cas des capteurs à flux direct,
- l'intégration d'un miroir, parabolique ou non, afin d'augmenter la surface de captation,
- l'utilisation des fluides à changement de phase.

### **2.3.3 Tendances d'évolution**

Le contrôle/commande du système (quatrième entité du système) doit encore évoluer, en améliorant le suivi du soleil et la maîtrise des transferts. Le capteur tubulaire sous vide répond à cela sans système de suivi, il n'est pas encore adapté aux capteurs à air. On peut imaginer de concevoir des caloducs avec des condenseurs à ailettes extérieures pour réchauffer l'air.

Les déperditions thermiques (loi 2) ont été réduites grâce à l'isolation à l'avant (couche d'air confiné ou de gaz inerte), à l'arrière du capteur (laine minérale), ainsi qu'avec l'utilisation du vide.

La loi de coordination de rythmes (loi 3) concerne l'adaptation du capteur au mouvement du soleil. L'inclinaison du capteur par rapport aux rayonnements solaires permet de recevoir la plus grande quantité d'énergie possible pendant l'année. Divers auteurs ont fait des recherches à ce propos. Sharian [Sha02] proposent un modèle mathématique qui optimise l'inclinaison du capteur. Pulcar [Puc05] ont prouvé que l'utilisation d'un capteur solaire réglable est bien plus efficace qu'un capteur fixe, particulièrement au lever et au coucher du soleil et lorsque le ciel est nuageux.



Dans la logique de la loi 8 (augmentation du dynamisme du système), le fait d'utiliser un système qui suit le déplacement du soleil rend le capteur dynamique.

Du point de vue de la loi 4, la performance du capteur a été augmentée par les modifications qui ont permis d'accroître la surface de l'absorbeur en le rendant plus efficace, il reste à mieux résoudre le problème des pertes de charge importantes imposées au fluide caloporteur. La réduction de la taille des capteurs en visant l'amélioration de sa manipulation lors de l'installation, amènera à la construction de composants de plus en plus petits, le système tend donc à se complexifier. Le passage d'un capteur 2D à un capteur 3D (capteur parabolique et capteur sous vide) permet d'optimiser la récupération de l'énergie solaire. Par contre, la construction des capteurs sous vide s'est complexifiée à cause de l'intégration des nouveaux composants dans le système.

On ne remarque pas de développement inégal des entités (loi 5) du système puisque chacun des composants du capteur peut évoluer sans affecter le développement des autres.

Selon la loi 6, l'intégration des capteurs dans leur environnement, le séchoir et le système de stockage sont en cours. Le capteur à air s'intègre dans le séchoir [[Haq02](#)] et le système sous vide s'intègre dans le stockage (caloducs) ; néanmoins cette dernière solution n'a pas encore trouvé sa place dans le stockage à des fins industrielles.

L'application des revêtements sélectifs à l'absorbeur impose une évolution de ce composant au micro-niveau (loi 7). L'analyse des revêtements sélectifs représente des années de recherche dans le but de trouver un ou plusieurs matériaux qui portent des caractéristiques d'absorptance élevée et réflectance réduite aux rayonnements solaires.

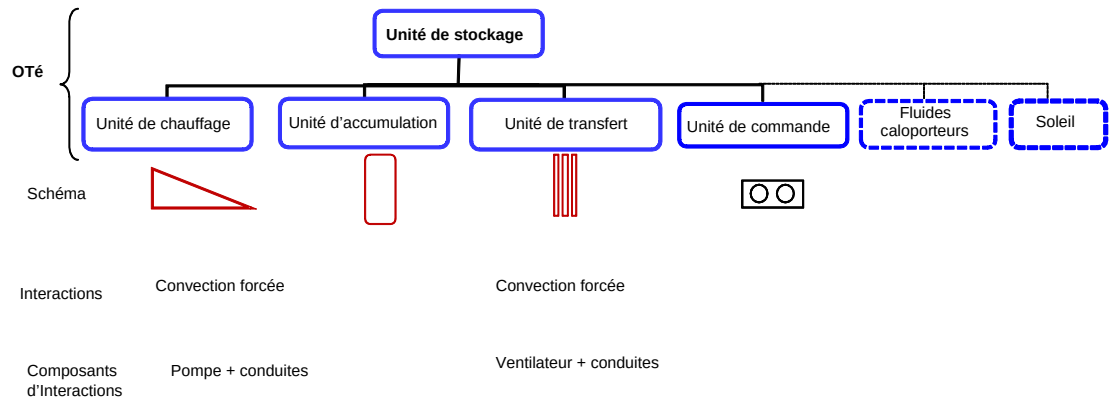
## **2.4 Etat d'évolution de l'unité de stockage**

### **2.4.1 Approche Organique**

Le développement des systèmes solaires actuels nécessite l'intégration d'un système de stockage d'énergie, afin de résoudre l'inconvénient de l'énergie solaire intermittente. Il s'agit d'emmagasinier l'énergie solaire pendant la journée et de la restituer lorsque celle-ci n'est plus disponible (nuit et jours nuageux).

La logique du système global (OTé N1) permet d'analyser chacune des unités. En s'appuyant sur l'OTé N2, nous décrivons l'unité de stockage d'énergie. Dans cette section, nous étudions l'unité de stockage comme système couplé qui comporte : un

capteur solaire, un réservoir de stockage, un fluide caloporteur et éventuellement un échangeur d'énergie, (figure 3.16).



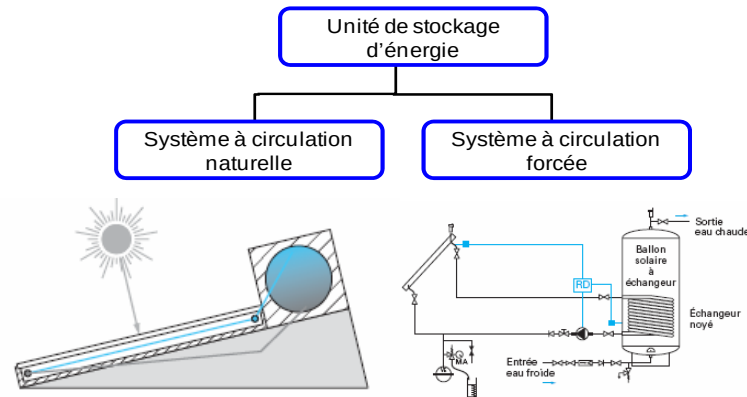
**Figure 2.16. Organigramme technique étendu du système de stockage (OTé)**

Nous retrouvons des composants d'interaction au niveau de l'unité de chauffage, capteur, (conduites, ventilateurs, pompes), mais aussi pour la restitution de l'énergie dans l'unité de transfert où la chaleur est récupérée par convection naturelle (conduites) ou par convection forcée (conduites, ventilateurs ou pompes). Le milieu extérieur est représenté par le fluide de transfert, par le fluide ou le milieu de stockage et par la source d'énergie (soleil). Nous trouvons de l'air, de l'eau dans le cas des fluides de stockage ou des matériaux à changement de phase (Phase Change Material, PCM) pour l'accumulation par chaleur latente. La quantité de chaleur emmagasinée dépendra de la masse contenue dans l'unité d'accumulation et des propriétés du matériau de stockage.

L'analyse de l'existant appliquée à l'unité de stockage fait ressortir les évolutions surtout, au niveau du composant « unité d'accumulation ». Nous analysons les différentes manières d'emmagasiner l'énergie solaire et de la récupérer lorsqu'elle n'est plus disponible. On remarque que le stockage solaire dans l'eau sert principalement, à chauffer l'eau sanitaire et pas à la récupération de la chaleur lors des procédés industriels.

Le recensement des systèmes de stockage retrouvés, permet de réaliser un premier classement en fonction de critères suivants :

Selon les composants d'interaction envisagés, nous trouvons deux sous-groupes : par circulation forcée (pompes et ventilateurs) et par circulation naturelle (thermosiphon), tel que le montre la figure 2.17.



**Figure 2.17. Classement des systèmes de stockage selon les composants d'interaction [Jofs/d]**

Le premier système est constitué d'un ballon situé au-dessus d'un capteur solaire. Le mouvement de l'eau contenue dans le capteur est causé par la différence de densité entre l'eau chaude et froide (plus lourde). Il s'agit de l'effet thermosiphon. Les deux inconvénients de ce système sont que le fluide caloporteur est le même que le fluide de chauffage et que le rendement du thermosiphon est très faible. Les nouveaux systèmes à caloducs [Din99] apportent une amélioration.

Les deuxièmes font appel à un composant de circulation pour transférer l'énergie depuis le capteur solaire vers le ballon de stockage. Dans cette catégorie, nous trouvons un sous classement des systèmes, à savoir : les systèmes directs, les systèmes vidangeables et les systèmes à échangeur.

Selon la manière de stocker l'énergie, nous trouvons : le stockage à chaleur sensible et le stockage à chaleur latente. La première, consiste à chauffer un matériau (eau, galets, sable, béton, etc.) avec un fluide caloporteur depuis les capteurs (eau ou air). Cette méthode induit des problèmes de fort encombrement et des gradients de température dans le milieu d'accumulation. Le stockage à chaleur latente, utilise un matériau à changement de phase (PCM) plus compact mais plus onéreux. L'utilisation d'un PCM ou d'un autre dépendra des besoins d'énergie demandés par le système. Un schéma des deux manières de stocker l'énergie solaire est proposée sur la figure 2.18.

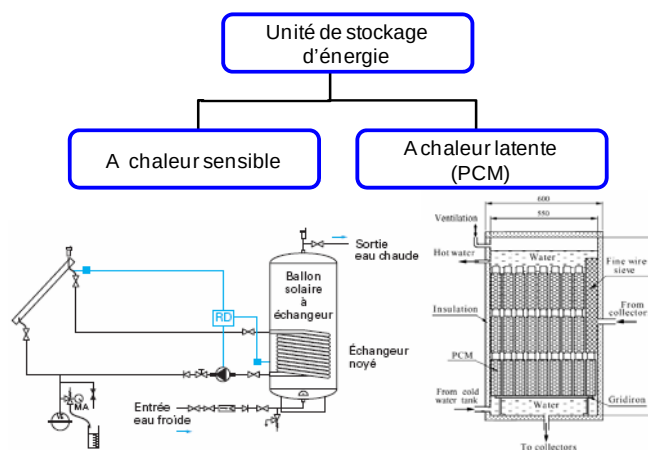


Figure 2.18. Classement des systèmes de stockage selon le milieu de stockage [Jofs/d, Can05]

L'analyse de l'unité de stockage doit se faire selon les situations de vie « stockage » et « déstockage ». En appliquant la loi d'intégralité de parties, on réussit à mieux structurer le système de stockage. Nous identifions chacune des entités sur la figure 2.19.

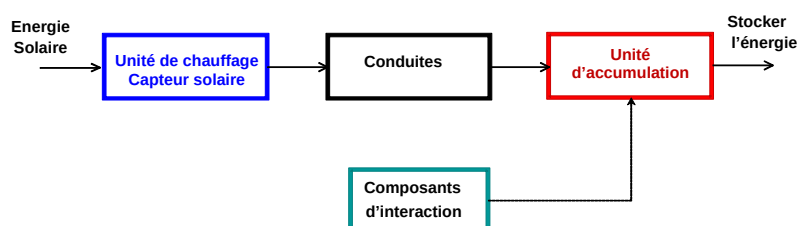


Figure 2.19. Loi d'intégralité de parties appliquée à l'unité de stockage (SdV : Stockage)

L'entité motrice concerne le capteur solaire, (quel que soit le type), l'entité de transmission étant les conduites, l'entité opératrice est constituée par l'unité d'accumulation (chauffage direct ou indirect de l'eau, matériau solide ou PCM) et une entité de contrôle au niveau des conduites grâce aux composants d'interaction (pompes et ventilateurs) et, à un degré moindre, au niveau de l'entité opératrice (masse du matériau d'accumulation).

La figure 2.20 montre les entités qui intègrent le système de stockage fonctionnant en situation de vie « récupération de l'énergie solaire ».

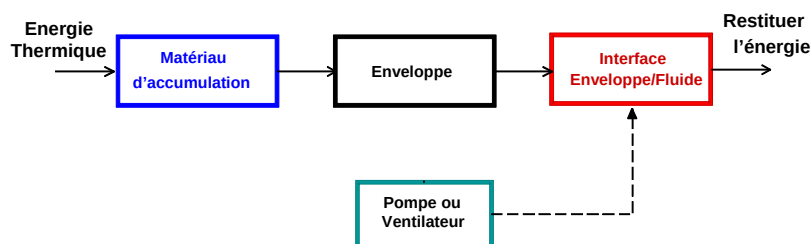


Figure 2.20. Loi d'intégralité de parties appliquée à l'unité de stockage (SdV : Déstockage)

La récupération de l'énergie débute par la diffusion de l'énergie thermique dans le matériau d'accumulation. L'énergie est transmise au fluide caloporteur via l'enveloppe et finalement l'action « restituer l'énergie » est accomplie à l'interface enveloppe/fluide (entité opératrice). On contrôle l'entité opératrice à travers les composants d'interaction et la température.

### 2.4.2 Analyse globale

L'état de l'art du système de stockage fait apparaître plusieurs évolutions qui concernent principalement les unités d'accumulation et de transfert. On ne parle pas des évolutions du capteur car ce sujet a déjà été abordé dans le paragraphe 2.3. Dans cette logique, nous analysons les évolutions constatées de ces unités. La figure 2.21 décrit les évolutions constatées des réservoirs de stockage existants, autant sur le marché que dans la littérature.

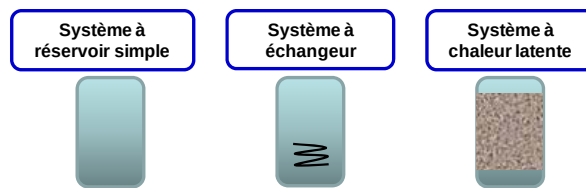


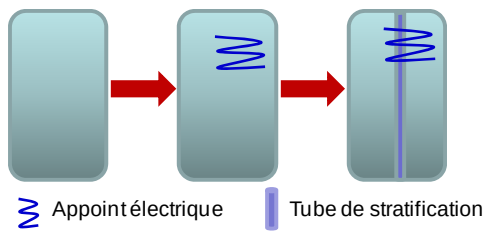
Figure 2.21. Classement des unités d'accumulation et de transfert existantes

#### 2.4.2.1 Evolution des unités d'accumulation et de transfert

##### 2.4.2.1.1 Systèmes à réservoir d'eau simple (directs)

Il s'agit d'un ballon de stockage simple couplé à un capteur solaire. Le fluide est chauffé directement dans le capteur et emmagasiné dans le réservoir de stockage. Ce type de ballon représente le point de départ du stockage d'énergie solaire à chaleur sensible [Day97, Med07, SPFt35, EPA01]. Les améliorations retrouvées concernent principalement, la réduction des pertes thermiques grâce à l'isolation des réservoirs, on trouve ainsi, le concept proposé par Buscarlet, [Bus01, Iap], concernant un réservoir simple à double enveloppe qui présente des performances acceptables en comparaison à 3 concepts différents. Plus tard, des nouveaux composants ont été ajoutés aux ballons, par exemple Furbo, Solvis, Buderus [Fur05, Sol, Bud] suggèrent l'intégration d'un tube stratificateur. Il s'agit d'un tube placé à l'intérieur du ballon de stockage composé par des languettes qui s'ouvrent et se ferment en fonction de la température de l'eau. D'autres auteurs choisissent l'utilisation des sources d'appoint électriques [Fur05, Bad08, Hov, Fre-s/d, Bac07] afin de résoudre le problème de l'intermittence solaire et la

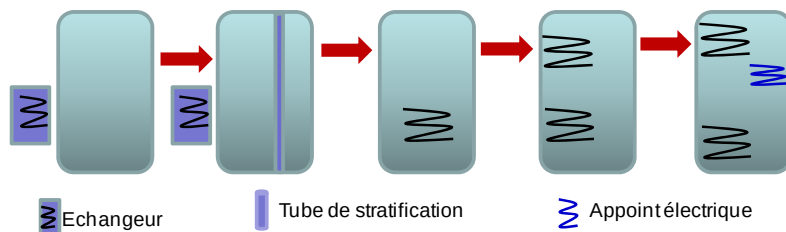
mauvaise distribution de l'eau chaude. La [figure 2.22](#) regroupe les évolutions constatées au réservoir simple.



**Figure 2.22. Evolution du réservoir de stockage simple**

#### 2.4.2.1.2 Systèmes à réservoir d'eau à échangeur (indirect)

A différence des systèmes simples, ce groupe intègre un seul [Laf01, Bac07] ou deux échangeurs de chaleur [Fre-s/d, Qui, Min, Lun04, Dah98] placés, soit à l'intérieur ou à l'extérieur [Bia06, Fur05, Day97] du ballon de stockage. Le fluide caloporteur transmet sa chaleur au milieu de stockage en passant par l'échangeur, puis, il repart vers les capteurs où il sera réchauffé à nouveau. Le fluide chaud est stocké dans le ballon. La nature intermittente de l'énergie solaire oblige à lier le système aux sources d'énergie complémentaires. Deux types de dispositifs peuvent être envisagés : un appoint électrique ou un appoint hydraulique qui permet de chauffer l'eau à l'aide d'un fluide, [Qui, Min, Fre-s/d, Lun04, Dah98]. On trouve aussi la solution du tube stratificateur [Fur05, AGENA, Son, Bud] celui-ci permet d'injecter et récupérer l'énergie à différentes hauteurs dans le ballon. Le résumé des évolutions est présenté sur la [figure 2.23](#).



**Figure 2.23. Evolution du réservoir de stockage à échangeur**

#### 2.4.2.1.3 Systèmes à chaleur latente

Les systèmes de stockage à chaleur latente incluent un matériau au changement de phase (PCM). Cette manière d'emmagasiner l'énergie offre des avantages lorsque l'on nécessite des températures élevées de récupération. La conception des ballons de stockage intégrant un PCM sont diverses. Choudhury [Cho95] propose un ballon de stockage rempli avec des sphères de PCM, le lit de PCM est chauffé par un capteur à air. Cette solution a été optimisée récemment par Kousksou [Kou07]. Dans la même logique de conception, Nallusamy [Nal07], utilise l'eau comme le fluide caloporteur et

analyse un système combiné (chaleur sensible et chaleur latente), [Is99, Ben03, Cho95]. Ce concept est repris par Canbazoglu, [Can05] mais en utilisant des bouteilles remplies de PCM dans le ballon. Des études récentes réalisées dans l'union européenne, proposent la conception d'un ballon de stockage qui intègre : un échangeur de chaleur, un PCM et une source d'énergie d'appoint [Bon07, Iba06]. Ce système est considéré comme un des plus évolués jusqu'à maintenant. La figure 2.24 montre les évolutions constatées des systèmes de stockage à changement de phase.

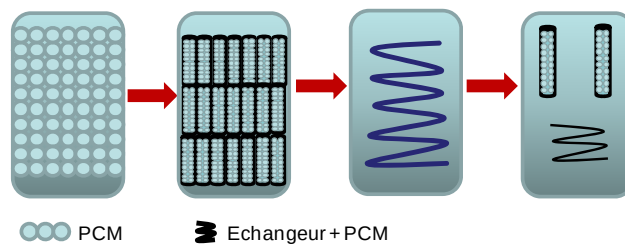


Figure 2.24. Evolution du réservoir de stockage à chaleur latente

### 2.4.3 Tendances d'évolution

Une des entités difficile à retrouver lors de l'analyse des systèmes techniques concerne l'entité de contrôle (loi 1). Les systèmes de stockage présentent cet inconvénient car il est difficile de maîtriser la quantité d'énergie emmagasinée. Néanmoins, on retrouve une manière de « gérer » cette quantité de chaleur en jouant sur le débit du fluide caloporteur (lorsque l'énergie solaire est disponible). En situation de vie déstockage, le système peut être contrôlé via les composants d'interaction, afin de réaliser un déstockage prolongé aux températures désirées.

Depuis le début du stockage de l'énergie solaire, les industriels ainsi que les chercheurs ont déployé des efforts pour réduire les déperditions thermiques. Aujourd'hui, les systèmes ne présentent pratiquement plus de problèmes de déperditions importantes d'énergie (loi 2).

La discontinuité de récupération de l'énergie solaire, oblige à intégrer dans le ballon de stockage une source d'appoint (électrique ou chaudière). Ainsi le fluide de stockage est chauffé de manière continue (loi 3).

L'évolution des ballons de stockage concerne principalement l'intégration des nouveaux composants, (échangeurs, sources d'appoint, stratificateurs, PCM), dans le but d'améliorer leurs performances (loi 4).

L'optimisation de l'efficacité des échangeurs, l'étude des nouveaux matériaux PCM et les nouveaux concepts de stratification proposés permettent au système évoluer dans le même sens (loi 5). Néanmoins, on retrouve une contradiction lors de la distribution eau chaude, eau froide dans le ballon. D'un côté on a besoin de l'eau à une température élevée pour son utilisation mais par contre, on souhaite des températures de l'eau réduites pour améliorer le rendement du capteur. Un concept propose la segmentation du ballon permettant un meilleur rendement du capteur [Alt06].

La transition vers le supersystème (loi 6) s'observe, en premier lieu, dans l'évolution du système de stockage. Le concept monobloc (caloducs) à thermosiphon [Din99] couple directement le capteur au ballon de stockage, en éliminant les composants d'interaction (conduites). L'évolution finale consiste à placer l'unité d'accumulation (parpaing plein) directement dans les parois de la cellule de séchage. Le capteur serait directement lié à la paroi et l'absorbeur serait l'unité d'accumulation. L'isolation de nuit se ferait par les volets isolant ou par un transport dynamique de billes de polystyrène entre la couverture et la paroi.

L'étude fine des matériaux à changement de phase représente les efforts développés pour réduire la taille du ballon stockeur, (transition vers le microniveau, loi 7), [Bon07, Iba06].

Les appoints d'énergie rendent les systèmes de séchage dynamiques (loi 8) car ils fonctionnent même si l'énergie solaire n'est pas disponible (stockage). En outre, les dispositifs de stratification présentent un grand avantage car ils chauffent le milieu de stockage à hauteurs différentes dans le ballon, [Sol, Bud] ce qui entraîne un stockage à température plus uniforme.

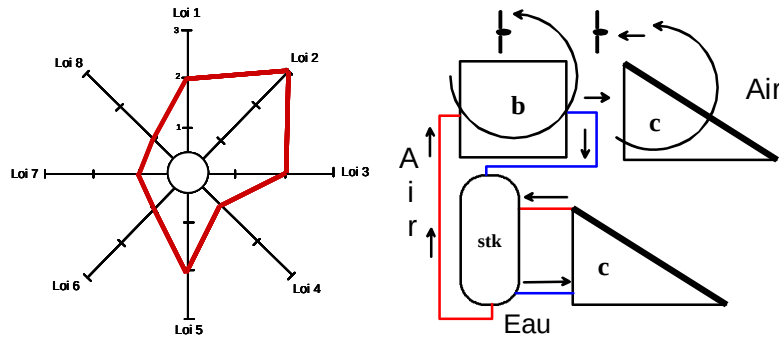
## 2.5 Dédution des évolutions du séchoir solaire

Pour situer le degré d'évolution des systèmes de séchage solaires existants, nous nous aidons de la [figure 2.25](#) traduisant les points de vue selon les 8 lois d'évolution. Pour chaque loi, la qualification du degré d'évolution de l'ensemble de l'existant part des concepts qui n'ont pas évolué (0) jusqu'aux systèmes très évolués (3). La proposition [figure 2.25](#), reprend les concepts connus intéressants et rajoute les évolutions prévisibles issues de l'analyse du radar, soit :

- l'agencement 2, l'évolution des unités indépendantes,



- l'utilisation d'un stockage à chauffage indépendant, pour ne pas diminuer l'efficacité du séchage diurne,
- l'intégration d'un réchauffeur d'air dans le stockage et non dans la chambre de séchage, afin d'éliminer un transfert supplémentaire,
- la gestion de différents cycles de séchage en fonction du contrôle de la qualité du produit.



**Figure 2.25. Radar d'aide à l'analyse des évolutions futures et nouvel agencement proposé.**

Concernant les unités de chauffage, nous avons vu que les capteurs à eau sont maintenant extrêmement efficaces (tube de verre assurant statiquement le suivi du soleil), leur conception permet une maintenance facile (capteurs à caloducs). Par contre, les capteurs à air n'ont pas suivi la même évolution et on peut proposer d'utiliser les capteurs à caloducs en plaçant des surfaces ailettes sur le condenseur et côté air. Le flux d'air ne voit plus alors le soleil et passe dans une conduite à ailettes internes dans laquelle sont incorporés les caloducs. On obtient, ainsi, la même flexibilité pour la maintenance. Cette flexibilité doit être utilisée pour le nettoyage des surfaces captatrices.

## 2.6 Notre choix

Nous avons proposé une méthode permettant d'analyser l'existant des séchoirs solaires et les brevets associés. Cette méthode est basée sur une approche organique et fonctionnelle qui permet d'analyser les agencements et les différentes unités d'un séchoir.

Les lois d'évolution des systèmes techniques sont utilisées pour qualifier les solutions trouvées et pour les placer dans une optique d'évolution. Ainsi, on a pu proposer l'intégration d'un système de stockage et un nouvel agencement adapté. De la même manière, un nouveau capteur à air est envisageable à partir de l'analyse conjointe des tendances d'évolution des capteurs à air et des capteurs sous vide.

La figure 2.26 montre le séchoir à concevoir (dérivé de la proposition figure 2.25). L'unité de chauffage est constituée par des capteurs à air isolés et à air confiné. Les capteurs à eau reliés à l'unité de stockage sont plus rustiques pour des raisons de robustesse et de coût mais pourraient facilement être remplacés par des capteurs sous vide.

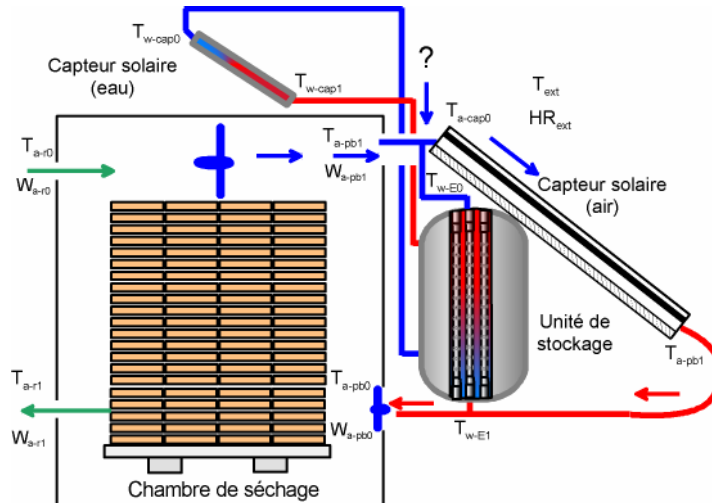


Figure 2.26. Séchoir solaire avec stockage d'énergie

### 2.6.1 Le choix des composants du séchoir

D'après le schéma 2.26, nous réalisons une brève description de chaque composant choisi lors de l'analyse de l'état de l'art. On ne considère pas encore les dimensions définitives des unités. On ne propose qu'une première approche du système à concevoir.

#### 2.6.1.1 L'unité de séchage

L'unité de séchage comporte : une cellule isolée, deux ventilateurs hélicoïdes pour la circulation interne, des rails pour la charge et décharge de la chambre, (composants de la chambre), un autre ventilateur vers le capteur à air et/ou l'échangeur – stockeur et quatre trappes pour l'échange avec l'extérieur, (composant d'interaction). Les dimensions préliminaires sont imposées par le volume de bois à sécher et pour ses composants. La figure 2.27 montre quelques détails de construction de cette unité.

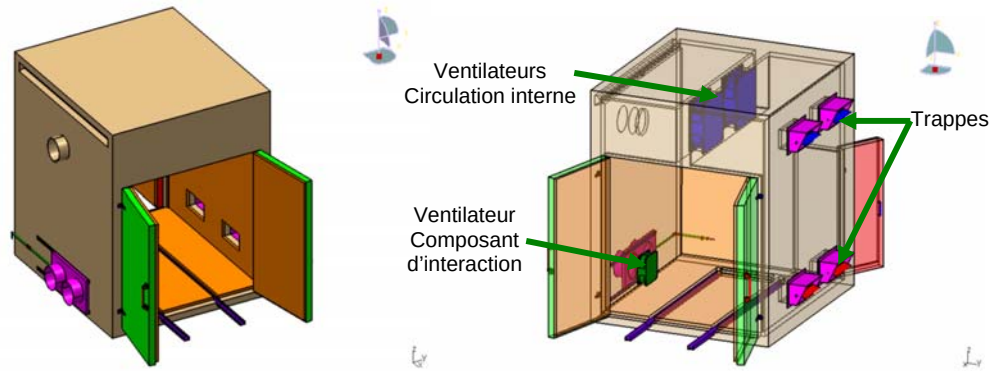


Figure 2.27. Choix de l'unité de séchage, détail de construction, Catia V5

### 2.6.1.2 L'unité de chauffage

D'après le classement des capteurs solaires réalisé sous le critère de l'entité motrice (unité sélective) et l'unité opératrice (interface absorbeur/fluide caloporteur) de la figure 2.10, nous allons modéliser un capteur solaire issu du groupe I. La figure 2.28 présente le détail de construction d'un capteur solaire modulaire.

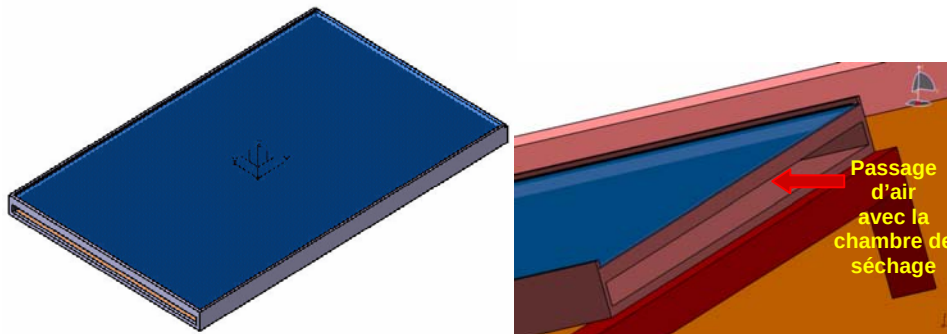


Figure 2.28. Choix de l'unité de chauffage, détail de construction, Catia V5

### 2.6.1.3 L'unité de stockage

Nous proposons une configuration particulière de l'unité de stockage. Notre solution entraîne l'utilisation d'un réservoir de stockage à eau simple (direct) et un type d'échangeur particulier. Il s'agit d'un ensemble de tubes poinçonnés, placés à l'intérieur du réservoir de stockage, aménagement carré de côté  $e_T$ . Ce concept est issu des travaux de recherche réalisés dans le laboratoire TREFLE dans le cadre d'un contrat interne avec la Société Air Quality Process [Are04]. La figure 2.29 présente un schéma de cette unité.

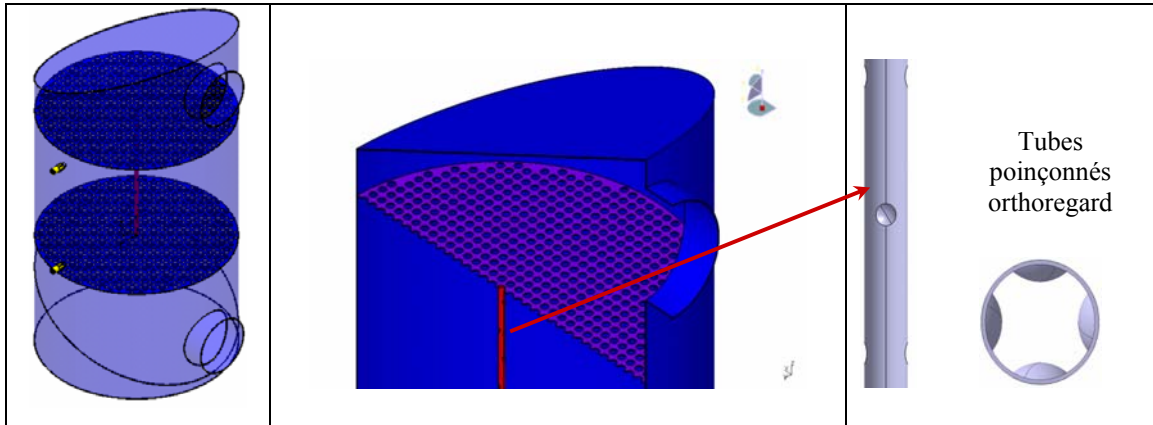


Figure 2.29. Choix de l'unité de stockage, détail de construction, Catia V5

#### 2.6.1.4 L'unité de chauffage (capteur à eau)

L'énergie solaire, sera récupérée par un capteur solaire à eau. Il la transmet au fluide caloporteur (l'eau), puis, cette énergie est emmagasinée directement dans l'échangeur-stockeur.

Le capteur solaire à eau comporte ; des spirales en tube polyéthylène de couleur noire enroulées les unes autour des autres. Ces spirales sont placées dans une boîte carrée en bois. Le capteur est muni d'une vitre permettant grâce à l'effet de serre, de réduire les déperditions thermiques par rayonnement. Le fond du capteur, comporte une couche isolante sur laquelle repose les tubes en polyéthylène. Sur ces côtés se trouvent les entrées et sorties de l'eau qui le relie à l'unité de stockage, placé sous le capteur à air (figure 2.30).

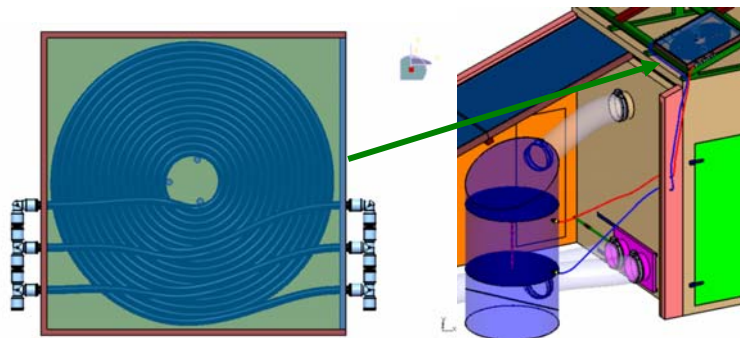
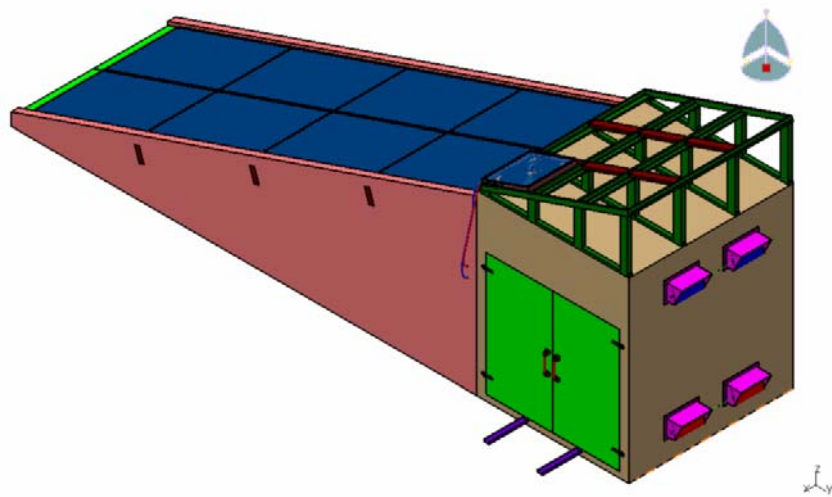


Figure 2.30. Choix de l'unité de chauffage (stockage), détail de construction, Catia V5

#### 2.6.1.5 Le Séchoir solaire

La figure 2.31 montre la compacité du séchoir qui découle de l'analyse.



**Figure 2.31. Schéma global du séchoir solaire Catia V5**

L'échangeur stockeur trouve sa place sous le capteur à air, il ne sera pas utile de l'isoler car il est placé à l'intérieur de deux murs isolés.

Le composant d'interaction ventilateur permet de relier la chambre de séchage au capteur à air le jour ou à l'échangeur stockeur la nuit.

L'accès à la chambre de séchage pour le chargement des piles de bois est réalisé par les portes latérales.

## 3 Structuration du problème de conception

### 3.1 Définition des variables pertinentes

#### 3.1.1 Les différentes variables

La première approche de configuration du séchoir permet de visualiser ses composants (fig. 2.2). Ainsi, on a défini des unités et des milieux extérieurs dans l'organigramme technique étendu et des composants d'interaction ou des interactions simples entre ses unités.

Choisir entre différentes configurations, définir le fonctionnement d'un système et le qualifier demande de pouvoir exprimer les critères d'appréciation client et concepteur. A cette fin, Vernat [Ver06], propose d'utiliser différents types de variables, les **critères Cr**, les **variables de conception VCo** et des variables auxiliaires VA.

Dans notre cas, nous concevons un procédé et pour conduire ce procédé nous pouvons faire varier les différents flux de matière entrant dans les unités. Nous nommons **variables de pilotage VPi**, le taux de flux fonctionnel passant d'une unité à l'autre ou d'un milieu extérieur à une unité (ou inversement), taux que nous ferons varier pour conduire le système.

A ces variables, il faut ajouter les **paramètres caractéristiques des milieux extérieurs** soit dans notre cas, pour le milieu extérieur météorologie, la température et l'humidité relative de l'air extérieur et l'ensoleillement et pour le milieu extérieur bois, la vitesse de séchage.

Les flux fonctionnels circulant dans les unités font intervenir des fluides caractérisés par leurs **variables d'état** (T, P, P<sub>v</sub> ou HR pour l'air).

#### 3.1.2 Les Critères

Les critères sont ceux exprimés par le cahier des charges fonctionnel et par le client. Ils sont définis par une variable et un niveau pour cette variable, le plus souvent une inéquation.

#### 3.1.3 Les variables de conception

Les variables de conception, (**VCo**) permettent de définir de manière stricte l'unité (ou composant) à laquelle elles sont associées, (dimension, matériau, référence

catalogue,...). L'évaluation de ces variables permet de distinguer deux configurations de conception entre elles.

Les variables auxiliaires (VA), concernent toutes les variables de modélisation qui ne sont pas de VCo, elles participent à la cohérence du modèle et leur fonction est de relier les variables de conception aux critères, (nombre adimensionnel, débits, vitesse,...).

### 3.1.4 Les variables de pilotage

Les variables de pilotage concernent les flux d'interaction, elles sont associées aux interactions entre unités ou entre unité et milieu extérieur. Si ces interactions font intervenir des composants d'interaction (ventilateur, trappes, pompes), les variables de pilotage sont pertinentes de ces éléments. Autrement dit, les VPi définissent les composants d'interaction.

Les variables de pilotage (VPi) permettent la conduite d'un système en terme de fonctionnement, elles évoluent selon les situations de vie différentes. Les VPi peuvent être considérées comme des variables de procédé car elles assurent la conduite du système à concevoir.

## 3.2 Définition des unités et variables de conception

### 3.2.1 Unité de chauffage : capteur à air

La figure 3.1 schématise l'unité de chauffage. Cette unité est composée par : une couverture transparente en vitre, une tôle métallique noircie (absorbeur), une conduite (passage de l'air) et une isolation à l'arrière. L'isolation à l'avant est réalisée par une couche d'air confiné entre la couverture transparente et l'absorbeur. Les dimensions de l'unité de chauffage sont définies par les VCo, **longueur L** et **largeur l** (soit une surface de captation  $A_{cap}=Ll$ ) et une **hauteur de canal d**.

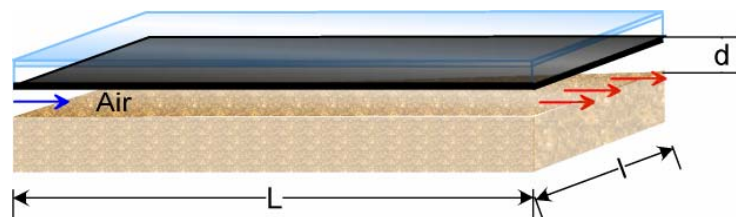


Figure 3.1 Les VCo de l'unité de chauffage



### 3.2.2 Unité de séchage

Le dimensionnement de l'unité de séchage est imposé par le volume de bois à sécher. Les **VCo** sont donc liées à la taille de la pile de bois ( $L_{pb}$ ,  $l_{pb}$  et  $H_{pb}$ ) selon la figure 3.2. La hauteur de l'unité de séchage va aussi dépendre des composants d'interaction, ventilateur, trappes et conduites de liaison entre cette unité et, respectivement l'unité de stockage d'énergie, le milieu extérieur et l'unité de chauffage (capteur solaire).

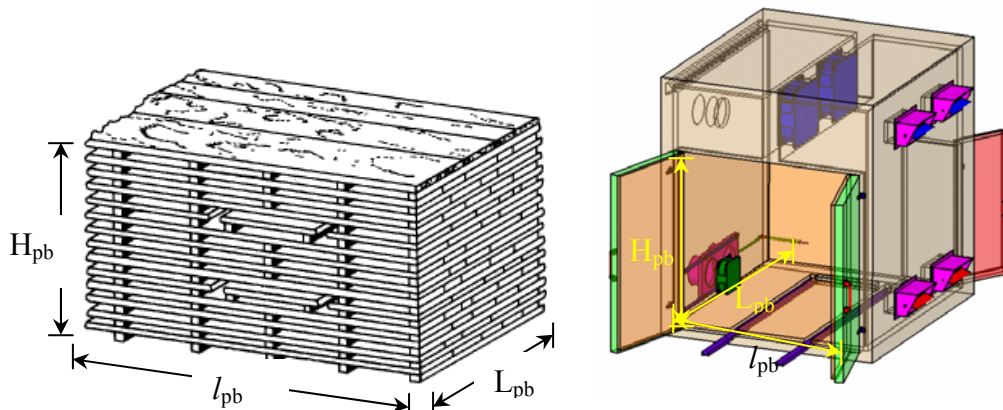


Figure 3.2. Les VCo de l'unité de séchage

### 3.2.3 Unité de stockage : échangeur stockeur

L'unité de stockage d'énergie est composée par deux sous-unités à savoir, un capteur solaire à eau et un réservoir à deux fonctions, stockage et déstockage. Les composants de l'unité de stockage sont montrés sur la figure 3.3.

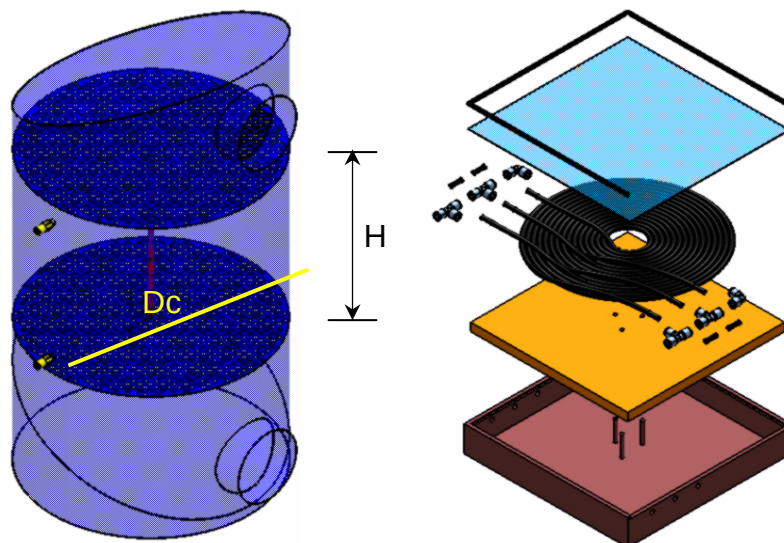


Figure 3.3. Les VCo de l'unité de stockage



L'énergie solaire est récupérée par un capteur solaire à eau muni d'une couverture transparente en verre, un tuyau de polyéthylène noir enroulé (absorbeur) et une isolation sur le fond. Cette énergie est transportée par l'eau au réservoir de stockage. Les **VCo du capteur** concernent ; le **diamètre du tuyau,  $d_{ext}$**  et, le **nombre de tours de la spirale,  $N_t$**  (la surface du capteur s'exprime alors  $A_{cap} = \pi/4(N_t d_{ext})^2$ )

Le réservoir de stockage est composé par une calandre définie par ses **VCo** c'est-à-dire le **diamètre  $D_c$**  et la **hauteur  $H$** . Pour le déstockage, cette unité est munie des tubes poinçonnés qui ont la fonction de transmettre l'énergie stockée à l'air de séchage, la variable de conception  $D_c$  est directement liée au nombre de tubes  $N$  en arrangement carré d'écartement  $e_T$  (le diamètre s'exprime  $D_c = 1,25 e_T N^{0,5}$ ).

### 3.3 Séchoir solaire et variables de pilotage

#### 3.3.1 Agencement des unités

La représentation schématique du système (fig. 3.4) permet de visualiser les besoins de modélisation pour chaque composant du séchoir et, pour chaque milieu extérieur participant au phénomène de séchage du bois.

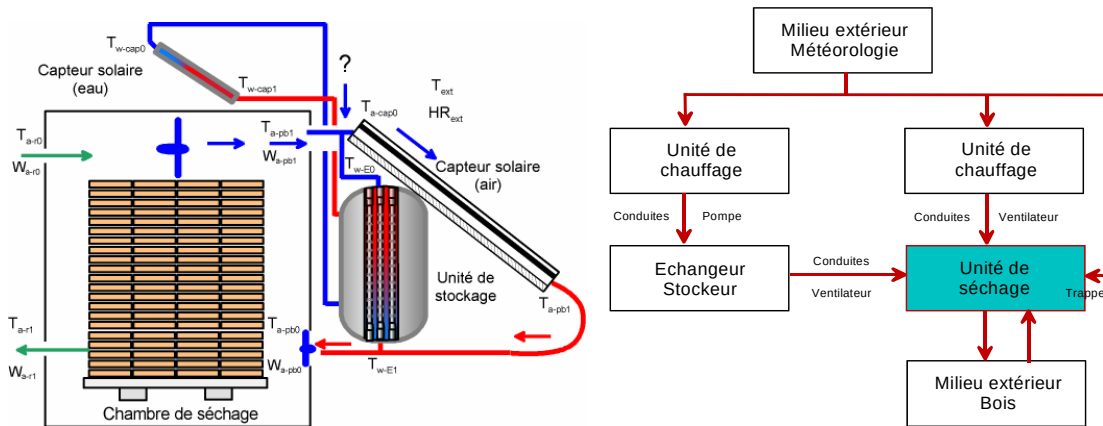
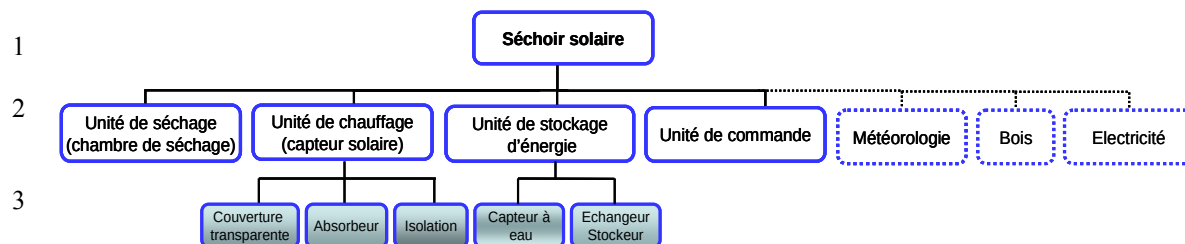


Figure 3.4. Schéma du modèle global du séchoir solaire à concevoir

#### 3.3.2 Flux d'interaction

Il s'agit de définir les flux d'interaction entre les différentes unités du système. Pour cela, on utilise l'outil de conception appelé le **bloc diagramme fonctionnel, BDF**. Il permet de réaliser une représentation du cheminement des flux fonctionnels au sein d'un bloc fonctionnel, en faisant apparaître les composants de niveau immédiatement inférieur dans l'OTé N3, (figure 3.5) [Nad06a].

Niveau


Composants d'interaction, unité de séchage – milieu extérieur : **trappes**

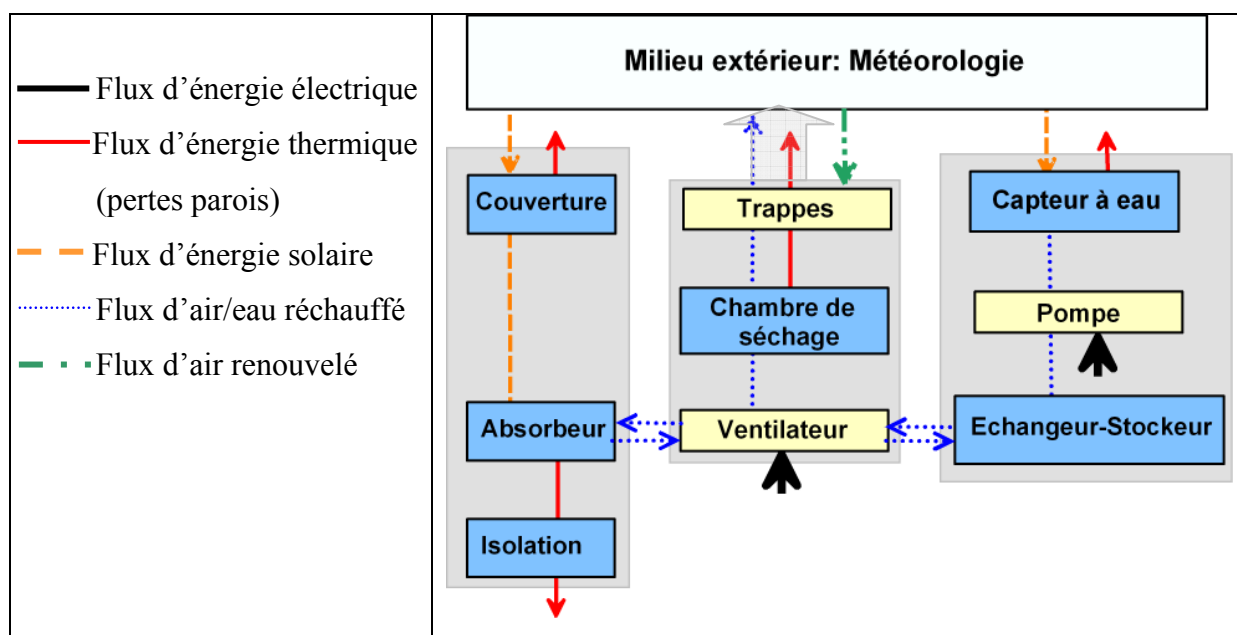
Composant d'interaction, u. de séchage – u. de chauffage ; u. de séchage – u. de stockage : **ventilateur + conduites**

**Figure 3.5. Organigramme technique étendu de niveau 3 du séchoir solaire, OTé N3.**

Le Niveau 3 de l'OTé permet de définir le capteur solaire à air par 3 composants : la couverture, l'absorbeur et l'isolation.

Les BDF permettent d'associer à chaque flux fonctionnel un modèle d'interaction qui traduit, les couplages entre les différents composants traversés par le flux. Il est réalisé pour **chaque situation de vie structurante du système**.

La figure 3.6 montre le BDF du séchoir en situation de vie « fonctionnement jour ». Pour diminuer le temps de séchage, on peut être amené à utiliser l'unité de stockage le jour.



**Figure 3.6. BDF du séchoir, situation de vie « fonctionnement jour »**

Cet outil permet de visualiser les flux échangés lors du fonctionnement de l'unité de séchage (matière et énergie), mais aussi les transferts réalisés lors du stockage d'énergie solaire. Les flux d'interaction du séchoir solaire en situation de vie « fonctionnement nuit » sont représentés sur la figure 3.7.

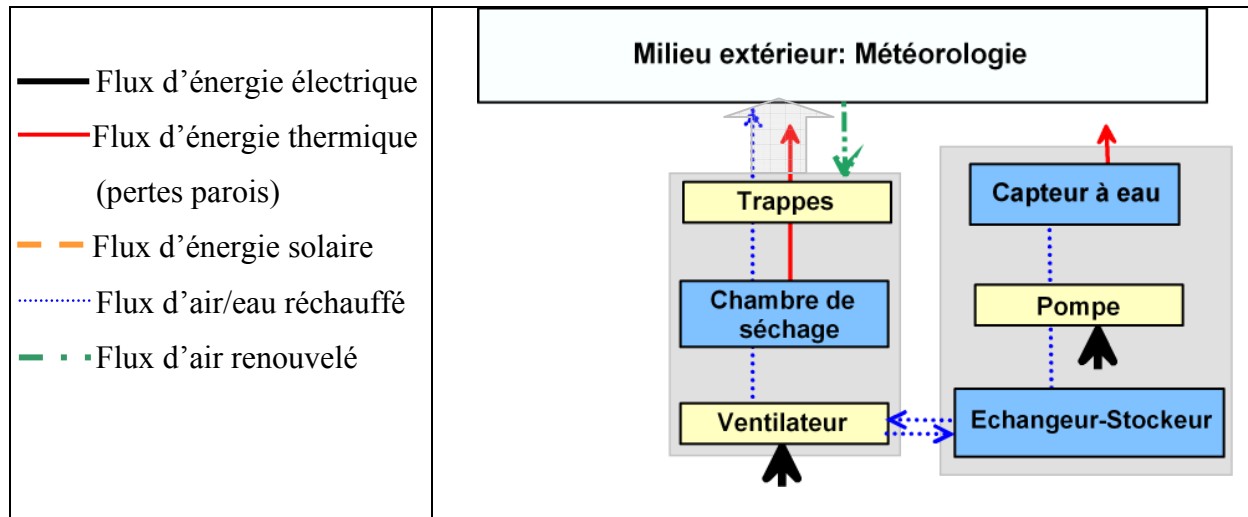


Figure 3.7. BDF du séchoir, situation de vie « fonctionnement nuit »

Dans notre logique de modélisation, il s'agit de représenter par des modèles d'interaction les relations entre les composants du système et les milieux environnants. Ces modèles doivent permettre le couplage des modèles de composants afin de simuler le comportement global du séchoir.

Le tableau 3.1 récapitule les flux d'interaction.

Tableau 3.1. Bilan des flux d'interaction

|                       | Chambre de séchage         | Capteur solaire à air          | Capteur solaire à eau          | Echangeur Stockeur    | Milieu extérieur               |
|-----------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Chambre de séchage    |                            | Flux d'air réchauffé           |                                | Flux d'air réchauffé  | Flux d'air matière+énergie     |
| Capteur solaire à air | Flux d'air réchauffé       |                                |                                |                       | Flux solaire<br>Flux thermique |
| Capteur solaire à eau |                            |                                |                                | Flux d'eau réchauffée | Flux solaire<br>Flux thermique |
| Echangeur Stockeur    | Flux d'air réchauffé       |                                | Flux d'eau réchauffée          |                       | Flux thermique                 |
| Milieu extérieur      | Flux d'air matière+énergie | Flux solaire<br>Flux thermique | Flux solaire<br>Flux thermique | Flux thermique        |                                |

### 3.3.3 Variables d'état pertinentes

Le séchage du bois obéit à des échanges d'énergie et de masse par convection entre le bois et l'air. On définit dans cette partie, les paramètres pertinents de l'air humide nécessaire, pour la modélisation du séchage de bois. La prise en compte de ces grandeurs permettra, de réaliser un modèle de comportement qui décrira de manière acceptable le transport de l'eau dans le bois.

### 3.3.3.1 La température de l'air

Ce paramètre est représenté par trois grandeurs: la température sèche, la température humide et la température de rosée.

La **température sèche** correspond, à la température de l'air. Lors du séchage de bois, l'évaporation de l'eau absorbe de la chaleur en provoquant un refroidissement de l'air. Nous trouvons alors le concept de la **température humide** correspondant à la température d'évaporation de l'eau en surface en première phase de séchage. Une autre grandeur importante lors de l'étude de l'air humide est la **température de rosée**. Elle correspond à la température pour laquelle, la vapeur d'eau contenue dans l'air se condense sur des surfaces plus froides.

La température de l'air de séchage est la température sèche.

### 3.3.3.2 La pression

Comme on l'a déjà évoqué, l'air humide est composé d'air sec et de vapeur d'eau. La pression du mélange air humide est la somme de la pression partielle de l'air sec  $P_a$  et de la pression partielle de vapeur  $P_v$ .

Lorsque l'air contient une quantité maximale de vapeur d'eau à une température donnée, on parle de **pression de vapeur saturante**,  $P_{v-sat}$ . La vapeur proche de la surface de séchage est à la pression de vapeur saturante à la température de surface (en première phase de séchage). L'écart entre ces 2 pressions est un des termes moteurs pour l'évaporation de l'eau du bois que l'on appelle parfois pouvoir évaporatoire.

### 3.3.3.3 L'humidité de l'air

Le rapport entre la pression partielle,  $P_v$  et la pression de vapeur saturante,  $P_{v-sat}$ , est connu comme, **l'humidité relative** de l'air, HR. Elle a une valeur de 100% lorsque l'air est saturé.

A différence de l'humidité relative, **l'humidité absolue** correspond à la masse de vapeur d'eau contenue par 1 kilogramme d'air sec, elle est exprimée alors en  $kg_w/kg_{as}$ .

Au cours du séchage, il est donc fondamental de pouvoir quantifier l'humidité contenue dans l'air, de suivre son évolution et de savoir réguler son niveau. Les grandeurs ici définies permettent de traduire ces exigences lors du séchage. Les variables de pilotage vont permettre de maîtriser la valeur de l'humidité relative à chaque instant.

### 3.3.4 Composants d'interaction et VPi associées

La circulation des flux fonctionnels identifiés est assurée par les composants d'interaction. Ces composants sont un ventilateur, les conduites et les trappes.

Le *ventilateur* relie l'unité de séchage au capteur solaire à air ou à l'unité de stockage, suivant la situation de vie du système. Le débit d'air envoyé par ce ventilateur dépend de la variable de pilotage **VPi, taux de mélange  $\tau_m$**  (débit dans le capteur,  $\tau_m q_{pb}$ ).

Les *conduites* servent à connecter les unités du système. Ce composant d'interaction est représenté par des gaines, des passages d'air et par des tubes de conduction.

Les *trappes* réalisent la fonction d'échange de matière et d'énergie entre l'unité de séchage et le milieu extérieur. Ce composant d'interaction est très important en séchage de bois car il permet d'évacuer l'air chargé en humidité et de le renouveler par de l'air plus sec. Le débit d'air entrant ou sortant sera caractérisé par la variable de pilotage **VPi, taux de renouvellement d'air  $\tau_r$**  (débit entrant ou sortant dans la chambre de séchage,  $\tau_r q_{pb}$ ).

Le tableau 3.2 résume les composants d'interaction du système et ses VPi associées.

Tableau 3.2. Composants d'interaction du séchoir solaire et VPi associées

|                         | Météorologie              | Unité de chauffage                           | Unité de stockage                            |
|-------------------------|---------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| <b>Unité de séchage</b> | Trappes<br>VPi : $\tau_r$ | Ventilateur +<br>conduites<br>VPi : $\tau_m$ | Ventilateur +<br>conduites<br>VPi : $\tau_m$ |

## 3.4 Expression des critères

### 3.4.1 Les critères d'optimisation

Il s'agit d'associer des VCo et des VPi aux critères d'appréciation « client » (qualité, temps de séchage et coûts d'utilisation) du séchoir solaire, afin de discriminer des solutions potentielles du système à modéliser.

Concernant la **qualité de séchage**, nous établirons une conduite permettant de gérer la vitesse de séchage lorsque la teneur en eau du bois passe entre 0,35 et 0,25 kg<sub>w</sub>/kg<sub>bs</sub>. Pour atteindre cet objectif, on peut jouer sur les VCo de l'unité de stockage et

sur les variables de pilotage soit le taux de renouvellement d'air  $\tau_r$  et le taux de mélange  $\tau_m$  dans la chambre de séchage. La gestion de la conduite dans cette plage de teneur en eau permettra de minorer les défauts de séchage.

Le critère **temps de séchage** correspond à la période au bout de laquelle le bois atteint la teneur en eau souhaitée. Ce paramètre est directement lié aux échanges de chaleur et de masse entre la pile de bois et l'extérieur. La variable de pilotage associée pour ce cas concerne le taux de renouvellement de l'air  $\tau_r$ . Nous savons ainsi que le temps de séchage sera une fonction de la teneur en eau finale souhaitée,  $[tS=f(W_f)]$ .

Le critère **coût de possession et temps de retour d'investissement DRI** permettra de discriminer les architectures du séchoir et les façons de conduire le séchoir. Les variables de modélisation associées à ce critère seront toutes les VCo des unités du séchoir solaire (tableau 3.2). En outre, le temps de fonctionnement du séchoir imposera des coûts de fonctionnement qui seront directement liés au temps de séchage établi par le critère tS lié aux VPi,  $\tau_r$  et  $\tau_m$ .

### ***3.4.2 Les critères concepteur pour l'aide à la décision***

Dans le tableau 3.3, nous récapitulons les VCo liées à chaque unité du système à modéliser. Cette démarche permet de visualiser une première approche des besoins de modélisation. Le tableau 3.3 résume les critères associés aux composants du séchoir solaire envisagé du point de vue du concepteur. Les variables auxiliaires VA seront justifiées dans le chapitre 4.

Tableau 3.3. Variables de modélisation et critères structurants associés à chaque unité du système, vision concepteur.

| Unité de séchage                                   |                   |                              |          |                                                                                         |          |                                     |                                           |
|----------------------------------------------------|-------------------|------------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------------------------------------|-------------------------------------------|
| Fonction                                           | Flux              | Critère                      | VCo      | VA                                                                                      | VPI      | Variable                            | Niveau                                    |
| Sécher le bois                                     | Matière           | Performances attendues       | $L_{pb}$ | $U_a$                                                                                   | $\tau_r$ | Teneur en eau, $W_f$                | $0,10 < W_f < 0,12$                       |
|                                                    |                   | Encombrement                 |          | $\Delta p$                                                                              |          | Surface de terrain, ST              | $ST \leq 15 \text{ m}^2$                  |
|                                                    | Energie           | Résistance à l'environnement | $I_{pb}$ | $W_b$                                                                                   | $\tau_m$ | MTTF : mean time to (first) failure | MTTF>10 ans                               |
|                                                    |                   | Coûts de possession          | $H_{pb}$ | $h$<br>$h_C$<br>$\Delta H_v$                                                            |          | Consommation électrique, $C_{cE}$   | $C_{cE} < 12 \text{ kWh}$                 |
| Unité de chauffage capteur à air                   |                   |                              |          |                                                                                         |          |                                     |                                           |
| Transformer l'énergie solaire en énergie thermique | Energie solaire   | Performances attendues       | $L$      | $U_a$                                                                                   | $\tau_m$ | Température ( $T_{a-cap}$ )         | $T_{a-cap1} > 30 \text{ }^\circ\text{C}$  |
|                                                    | Energie thermique | Encombrement                 |          | $d$                                                                                     |          | Surface de terrain (ST)             |                                           |
|                                                    |                   | Résistance à l'environnement | $I$      | $\rho_a$<br>$C_{p_a}$<br>$\sigma$<br>$G^*$<br>$\alpha_p$<br>$\tau_c$<br>$\lambda_l$     |          | MTTF : mean time to (first) failure | MTTF>10 ans                               |
|                                                    |                   | Coûts de possession          |          |                                                                                         |          | Consommation électrique, $C_{cE}$   | $C_{cE} < 6 \text{ kWh}$                  |
| Unité de stockage                                  |                   |                              |          |                                                                                         |          |                                     |                                           |
| Stocker l'énergie solaire (chaleur sensible)       | Energie solaire   | Performances attendues       | $H$      | $U_a$                                                                                   | $\tau_m$ | Température $T_{a-E}$               | $T_{a-E1} \geq 30 \text{ }^\circ\text{C}$ |
|                                                    | Energie thermique | Encombrement                 |          | $\rho_a$<br>$\rho_w$<br>$C_{p_a}$<br>$C_{p_w}$<br>$\mu_a$<br>$M_w$<br>NUT<br>$\Delta p$ |          | Surface de terrain, ST              | $ST \leq 12 \text{ m}^2$                  |
| Résistance à l'environnement                       |                   | $D_c$                        |          | MTTF : mean time to (first) failure                                                     |          | MTTF>10 ans                         |                                           |
| Coûts de possession                                |                   |                              |          | Consommation électrique, $C_{cE}$                                                       |          | $C_{cE} < 6 \text{ kWh}$            |                                           |
| Déstocker l'énergie                                |                   |                              |          |                                                                                         |          | Consommation d'eau, $C_{c_w}$       | $C_{c_w} \leq 1000 \text{ l}$             |

### 3.5 Besoins de modélisation

#### 3.5.1 Expression du critère $tS=f(W_f)$

Nous nous référons à la solution choisie lors de l'analyse de l'état de l'art (fig. 2.26). Les critères d'appréciation identifiés sont tous liés au temps de séchage. Dans cette logique, nous devons modéliser le fonctionnement global du système à concevoir pour exprimer l'évolution de la teneur en eau moyenne de la pile de bois en fonction du temps de séchage.

Le modèle global doit donc comporter : les modèles d'unités, des modèles du milieu extérieur et des modèles d'interaction. Les modèles d'unités décrivent le comportement physique des unités à concevoir. Alors que les modèles du milieu

extérieur représentent le comportement figé des milieux extérieurs. Finalement, les modèles d'interaction expriment les flux de liaison entre les composants du système et ses milieux extérieurs, [Ver04].

### 3.5.2 Entités pertinentes

Il s'agit d'écrire des modèles de composants pour chacune des unités du système retenu à concevoir. A partir de l'OTé (fig. 2.2) et des variables de modélisation associées à chaque entité pertinente, le système à modéliser comprendra les modèles de composants suivants :

- **Une unité de séchage** représentée par la chambre et les composants d'interaction correspondants, (ventilateurs, trappes, conduites, portes).
- **Une unité de chauffage** fonctionnant comme la source d'énergie thermique, représentée par un capteur solaire à air.
- **Une unité de stockage** d'énergie, afin de permettre un fonctionnement continu. Cette unité est composée par : un capteur solaire à eau, un réservoir de stockage à double fonction (échangeur - stockeur).

### 3.5.3 Travaux de modélisation

#### Milieu extérieur « météorologie »

Le milieu extérieur entourant le séchoir, sera décrit par deux modèles de comportement. Le premier consiste à représenter les variations de température  $T$ , l'humidité relative de l'air  $HR$  et l'ensoleillement  $G^*$  dans la région de l'aéroport de Mexico. Il s'agit donc d'un modèle décrivant les variations météorologiques de la zone considérée, à partir des coordonnées géographiques et de données réelles connues, ( $T$ ,  $HR$  et  $G$ ).

#### 3.5.3.1 Milieu extérieur « planche de bois »

Le deuxième milieu extérieur concerne le matériau bois. On s'intéresse à la représentation de la vitesse de séchage d'une pièce de bois de pin, ( $\frac{dW_b}{dt}$ ).

#### 3.5.3.2 Unité de séchage

Pour l'écriture du modèle de séchage, nous partons du modèle de milieu extérieur « planche de bois ». Puis, nous l'intégrons dans un modèle de comportement physique d'une pile de bois, caractérisée par des planches empilées côte à côte. On



cherche à représenter les échanges de matière et d'énergie entre la pile de bois et l'air de séchage dans une chambre isolée. Le modèle ainsi construit devra permettre d'estimer le temps de séchage, ( $t_s$ ) nécessaire pour qu'un volume de bois déterminé atteigne la teneur en eau souhaitée.

#### **3.5.3.3 Unité de chauffage**

Le modèle de l'unité de chauffage doit définir comment les échanges ont lieu dans un capteur solaire. On va de la récupération de l'énergie solaire à la transformation en énergie thermique et finalement à la transmission de cette énergie à l'air de séchage. Le modèle sera écrit à partir des lois de conservation de l'énergie dans chaque composant du capteur. La variable de sortie concerne le flux d'interaction utile fourni par cette unité de chauffage.

#### **3.5.3.4 Unité de stockage**

Dans le cas de l'unité de stockage, l'écriture des modèles consistera à représenter : la récupération de l'énergie solaire (modèle du capteur solaire à eau), le processus de stockage d'énergie solaire dans un réservoir à eau (modèle du ballon d'eau) et finalement, la restitution de l'énergie emmagasinée (modèle de l'échangeur). On part des lois de conservation de l'énergie dans chaque composant de ce sous système. On doit aboutir à l'écriture des flux d'interaction utile en phase de stockage et en phase de déstockage.

### **3.6 Qualification des modèles, PEPS**

La qualification permet d'évaluer l'aide apportée par les modèles au choix d'une solution de conception pertinente. Il s'agit d'une méthode qui laisse voir le comportement physique du système, afin d'estimer le degré de confiance que le concepteur peut accorder aux résultats de la représentation obtenue par ses modèles [Ver06, Pai07].

Le résultat de cette qualification permettra la prise de décisions satisfaisantes si les résultats sont acceptables ou, dans le cas contraire, des résultats peu satisfaisants nous amènerait à la re-conception du système.

D'après notre méthode, la qualification d'un modèle consiste à estimer la valeur des quatre paramètres suivants : la Parcimonie, l'Exactitude, la Précision et la Spécialisation (PEPS), afin d'évaluer l'exploitabilité des modèles pour l'aide à la décision.

La méthodologie de qualification des modèles à l'aide de PEPS a été proposée par Vernat, [Ver04]. Nous présentons dans la suite, un résumé des principaux points à considérer lors de la qualification d'un modèle.

### **3.6.1 Estimation de la Parcimonie**

La Parcimonie est définie comme le paramètre caractérisant la capacité d'un modèle à décrire le comportement physique du système qu'il représente avec un nombre minimum de relations et de variables. Définie comme la mesure inverse de la complexité d'un modèle, la parcimonie peut se calculer à l'aide de la relation 3.1.

$$Pa = \frac{1}{n_{rel} + n_{var}} \quad (3.1)$$

Il est évident que la parcimonie croît avec le nombre et le niveau de couplage entre les variables du modèle. Par conséquent, un modèle sera d'autant plus parcimonieux que son nombre de variables et de relations sera réduit.

Cette procédure d'estimation de la parcimonie présente l'avantage d'être simple à appliquer et de permettre une comparaison rapide entre différents modèles. Néanmoins, elle n'est pas adaptée à d'autres types de modèles que ceux exprimés à l'aide de relations algébriques.

### **3.6.2 Estimation de l'Exactitude**

L'exactitude est définie, comme une mesure de la distance entre l'espace de solutions du modèle et un comportement de référence.

L'objectif principal de la modélisation est de permettre un choix entre différentes solutions, caractérisées par des combinaisons de variables de conception (VCo), en se basant sur l'évaluation de critères (Cr). Ceux-ci sont ces critères qui, par comparaison avec des valeurs de référence, vont permettre de vérifier l'exactitude d'un modèle.

La comparaison du modèle à qualifier, peut se réaliser en prenant comme référence : des essais disponibles, un modèle existant et réputé exact pour un domaine de validité clairement défini ou, un modèle existant qui constitue une référence dans le domaine d'application.

La mesure de l'écart entre valeurs de référence et résultats du modèle peut se faire à une échelle locale ou à une échelle globale. Une évaluation globale qui cherche à minimiser l'influence des valeurs extrêmes et, une estimation locale, en évaluant l'erreur

maximale ou minimale absolue aux points mesurés. Nous avons mesuré cette distance en utilisant l'estimation de l'erreur maximale absolue à l'échelle locale :

$$E_M = \max_i |\tilde{X}_i - X_i|, \quad (3.2)$$

où  $\tilde{X}_i$  représente la valeur en un point "i" de l'espace de solutions et  $X_i$  est la valeur de la grandeur de référence à comparer à  $\tilde{X}_i$ .

Cette méthode présente également l'avantage de permettre une évaluation dans un contexte imprécis, en ne considérant plus  $\tilde{X}_i$  et  $X_i$  comme des valeurs, pourtant comme des intervalles de valeurs.

Les étapes considérées pour l'estimation de l'exactitude d'un modèle sont :

- la définition d'une référence,
- la définition des variables de comparaison pour le modèle (Critères) et pour la référence,
- la définition, par le biais de plans d'expériences si nécessaire, des points de l'espace de solutions qui serviront de points d'évaluation,
- le calcul de l'erreur maximale pour chaque variable de comparaison.

### **3.6.3 Estimation de la Précision**

La précision d'un modèle peut être définie comme l'étendue du domaine des valeurs possibles pour une variable donnée. La précision est donc à dissocier de l'exactitude, puisqu'elle est une mesure de la justesse avec laquelle le résultat est déterminé, sans lien avec une valeur de référence.

L'imprécision d'un modèle peut être due à l'incertitude sur les valeurs de certaines variables ou à l'incertitude sur une relation entre plusieurs variables. Les Critères (Cr) étant considérés comme les variables de sortie du modèle, nous évaluons la précision d'un modèle par la fluctuation des valeurs des Cr associés aux variables sources d'imprécision.

La précision correspond donc à une mesure de la taille de l'intervalle des valeurs possibles pour une variable source d'imprécision.

Pour estimer la précision nous devons prendre en compte :

- l'identification des variables source d'imprécisions dans les résultats du modèle,

- le choix des critères qui serviront de variables de calcul,
- la définition des points de calcul dans l'espace de solutions,
- le calcul de la précision pour chaque variable de calcul choisie.

### 3.6.4 Estimation du niveau de Spécialisation.

La spécialisation d'un modèle caractérise l'ensemble des hypothèses et des informations qui restreignent le domaine d'application. Selon le niveau systémique auquel on se place (OTé) et en considérant les hypothèses restrictives, un modèle sera plus ou moins spécialisé.

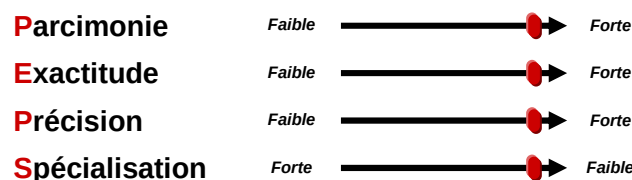
L'estimation proposée n'est pas chiffrée. Elle est qualitative et subjective. Elle permet de départager des modèles ayant des niveaux équivalents pour les trois autres paramètres.

### 3.6.5 Qualification des modèles.

La capacité d'un modèle à apporter une aide à la décision dépend de l'analyse globale des quatre paramètres : la Parcimonie, l'Exactitude, la Précision et la Spécialisation. Un modèle de conception architecturale aidera d'autant plus à la conception lorsqu'il présente :

- une forte parcimonie, pour permettre un traitement facile, rapide et peu coûteux,
- une forte exactitude, le plus proche possible de la réalité,
- une forte précision, pour minimiser le risque lié à la décision,
- une faible spécialisation, pour couvrir au maximum l'espace de conception.

Pour illustrer cette caractéristique, nous proposons de représenter le PEPS d'un modèle de manière qualitative à l'aide de la figure 3.8.



**Figure 3.8.** Schéma de représentation du PEPS d'un modèle de conception architecturale idéal [Ver04].

### 3.7 Conclusion

Dans un premier temps, nous identifions les unités pertinentes du séchoir solaire à concevoir, puis nous associons des variables de conception (VCo, VPi, Cr et VA) à chaque unité. Cela permet la visualisation du système global à modéliser. Les relations entre les unités et entre les unités et le milieu extérieur sont assurées par les composants d'interaction identifiés (ventilateurs conduites, pompe et trappes). A l'aide de ces composants, nous identifions les flux fonctionnels qui circulent entre les unités en utilisant l'outil de conception le BDF.

Finalement, nous exprimons les critères d'appréciation d'un point de vu client, ceux-ci concernent : la qualité et le temps de séchage et les coûts de possession du séchoir. Les expression des critères d'appréciation du point de vu du concepteur, permettent d'identifier les besoins de modélisation et de proposer une méthode de qualification des modèles.

De manière particulière, le modèle et le calcul de l'unité de stockage d'énergie concernent le chauffage diurne de l'eau dans un échangeur stockeur ainsi que la détermination du composant d'interaction pompe. Ce couplage a été réalisé mais, il n'est pas intégré dans ce document.

## 4 Modélisation des unités

En s'appuyant de l'OTé (figure 4.1), nous rappelons le système à modéliser. Il s'agit de trouver un modèle pour chaque unité du séchoir solaire, puis identifier les paramètres pertinents pour leur couplage afin de simuler le fonctionnement global du séchoir.

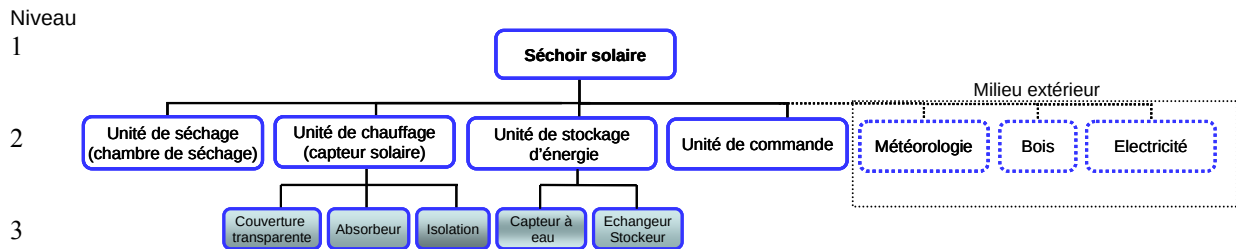


Figure 4.1 Organigramme technique de niveau 3 du système « séchoir solaire »

Les Besoins :

Modèle de milieu extérieur : météorologie

- *C'est un modèle qui représente de manière adéquate le comportement horaire des variables météorologiques (milieu extérieur) telles que : la température  $T$  et l'humidité  $HR$  de l'air ainsi que, l'ensoleillement  $G^*$ .*

Modèle de milieu extérieur : bois

- *Représentation de la cinétique de séchage convectif d'une planche de pin maritime*

Modèle de l'unité de chauffage

- *Ecriture d'un modèle de comportement pour un capteur solaire à air, représenté de manière parcimonieuse.*

Modèle de l'unité de séchage

- *Modélisation du séchage d'une pile de bois.*

Modèle de l'unité de stockage

- *Modélisation d'un système couplé : le échangeur-stockeur avec un capteur solaire à eau.*

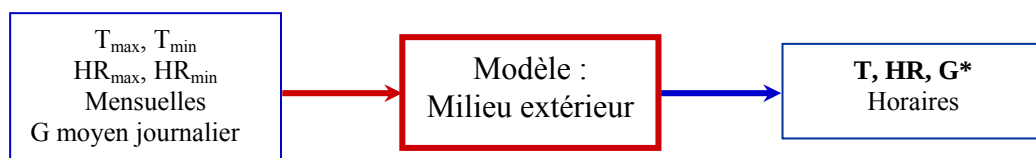
## 4.1 Modèle du milieu extérieur « météorologie »

Dans cette partie nous allons étudier les différents paramètres météorologiques qui permettent de définir les flux d'interaction entre le milieu extérieur « météorologie » et les différentes unités : il s'agit de la température extérieure  $T$ , de l'humidité relative de l'air  $HR$  et de l'ensoleillement  $G^*$  horaire pour un certain site.

**Les besoins :**

- *Estimation d'une année type à partir des données météorologiques de l'aéroport de la ville de Mexico.*
- *Deux relations représentant l'évolution horaire de la température et de l'humidité relative de l'air extérieur, afin de les intégrer dans un code global de séchage d'une pile de bois.*
- *Un modèle permettant la représentation de l'ensoleillement journalier horaire  $G^*$ , en fonction des coordonnées géographiques d'un certain site et des aspects géométriques du rayonnement solaire.*

On utilise des variables d'entrée définies sur la figure 4.2. On cherche à modéliser le comportement de  $T$ ,  $HR$  et  $G^*$  horaires.



**Figure 4.2.** Entrées/sorties du modèle de milieu extérieur

Le but de cette étude, est de disposer de fonctions parcimonieuses facilement et rapidement intégrables dans un programme de simulation de séchage solaire.

Nous avons considéré les données de température moyenne mensuelle pour 10 ans (1996-2006) pour l'estimation de l'année type. La station météorologique de l'aéroport de Mexico, (figure 4.3) nous a fourni des données journalières horaires pour : la température, l'humidité relative, la température de rosée, la vitesse et la direction du vent, la durée de l'ensoleillement, l'heure du lever du Soleil, l'azimut ainsi que des cartes de la distribution de la température et de l'humidité relative [Jan03].



**Figure 4.3. Localisation de la station météorologique « Aéroport de Mexico » ( $\lambda = 19,4^\circ$ ,  $L = 99,1^\circ$  W et altitude de 2238 m)**

Pour l'estimation de l'année type, nous avons considéré les données des températures moyennes mensuelles. Pour chaque mois, on calcule la moyenne de la température pour 10 ans, puis on sélectionne, quelle que soit l'année, le mois dont la moyenne de T se rapproche le plus de la moyenne générale sur 10 ans. Cette logique est la même que celle utilisée pour le logiciel de diagnostic énergétique des entreprises de construction mécanique CETIM-MINERG [Nad92]. L'année type résultante est résumée dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1. L'année type retenue

| Mois      | Année Type | T moyenne mois | T moyenne générale |
|-----------|------------|----------------|--------------------|
|           |            | °C             | °C                 |
| Janvier   | 2004       | 13             | 13,13              |
| Février   | 1997       | 15             | 14,82              |
| Mars      | 2006       | 17             | 16,99              |
| Avril     | 2003       | 19             | 18,67              |
| Mai       | 1999       | 19             | 19,36              |
| Juin      | 2002       | 18             | 18,27              |
| Juillet   | 2000       | 17             | 17,45              |
| Août      | 1999       | 17             | 17,27              |
| Septembre | 1996       | 17             | 17,18              |
| Octobre   | 1997       | 16             | 16,18              |
| Novembre  | 2005       | 14             | 14,00              |
| Décembre  | 1998       | 13             | 12,82              |



#### **4.1.1 Estimation de la température $T$ et de l'humidité relative $HR$ journalières horaires**

Nous estimons les variations horaires journalières de  $T$  et  $HR$  par des fonctions sinusoïdales si l'on connaît, respectivement, les valeurs réelles mensuelles de  $T_{\max}$  et  $T_{\min}$  et  $HR_{\max}$  et  $HR_{\min}$ . Dans le cas de  $T$ , nous la calculons à l'aide de la relation suivante :

$$T_{\text{cal}}(t) = T_{\min} + \alpha(t) (T_{\max} - T_{\min}) \quad (4.1)$$

Où :

$T_{\max}$  : température maximale mensuelle ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{\min}$  : température minimale mensuelle ( $^{\circ}\text{C}$ )

avec :

$$\alpha(t) = 0,4319 - 0,3304\cos(-0,179t) - 0,2759\cos(0,3945t - 2,5862)$$

Avec  $t$  en heures

Pour l'estimation de  $HR$  horaire on a utilisé la formule suivante :

$$HR_{\text{cal}} = HR_{\min} + \beta(t) (HR_{\max} - HR_{\min}) \quad (4.2)$$

Où :

$HR_{\max}$  : humidité relative maximale mensuelle (%)

$HR_{\min}$  : humidité relative minimale mensuelle (%)

avec :

$$\beta(t) = 0,4702 + 0,2502\cos(-0,14t) - 0,3494\cos(0,3578t + 1,1035)$$

Avec  $t$  en heures

Afin de valider les fonctions trouvées pour  $\alpha$  et  $\beta$ , nous comparons des données réelles de  $T$  et de  $HR$  avec les valeurs calculées pour 2 jours, (le jour considéré le plus chaud en mai et le jour considéré comme le plus froid en décembre). Nous présentons les résultats sur la figure 4.4.

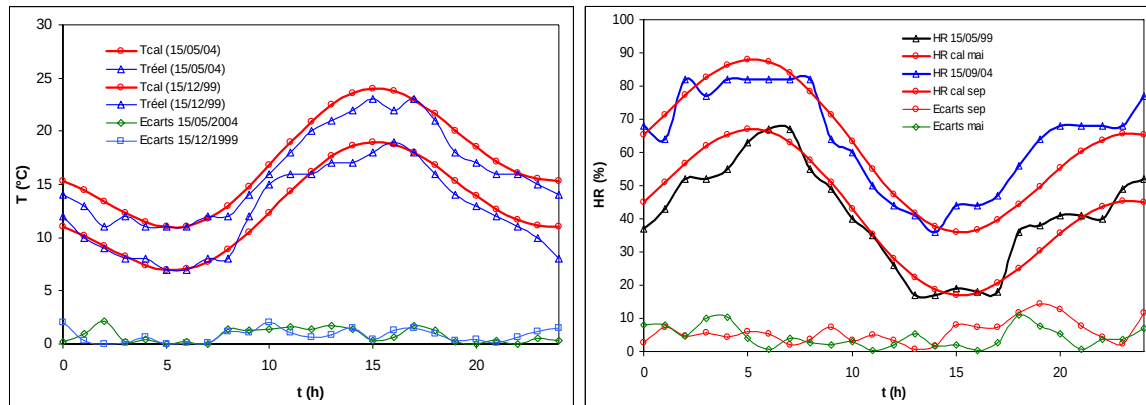


Figure 4.4. Variation de T et HR réelle et calculée.

La représentation de T et HR montre une bonne concordance avec les données réelles. Nous constatons que pour les deux cas, les écarts entre la température calculée et la température réelle sont inférieurs à 2,1 °C et que les écarts entre l'humidité relative calculée et l'humidité relative réelle sont inférieurs à 15,4 %. Les fonctions permettent, une représentation satisfaisante des variations de T et HR d'une journée.

#### 4.1.2 Calcul de la densité de flux solaire global $G^*$

Pour récupérer le maximum d'énergie en provenance du soleil, il est nécessaire d'optimiser l'orientation du récupérateur d'énergie. La connaissance de la position du soleil en fonction du temps est donc fondamentale [Ber04].

Pour la simulation de l'ensoleillement dans un endroit déterminé, nous sommes partis des coordonnées géographiques (latitude,  $I$  et longitude,  $L$ ) pour repérer le site en question. Ensuite, en connaissant la valeur de l'irradiation solaire journalière globale  $G$ , nous avons réalisé un programme de simulation à l'aide d'Excel en considérant des paramètres issus des aspects géométriques du rayonnement solaire tels que :  $\delta$ ,  $\omega$ ,  $TS$ ,  $h$ ,  $a$ , etc. On décrit ces paramètres ainsi que la méthode de calcul par la suite.

La déclinaison  $\delta$ , est l'angle formé par la direction du soleil avec le plan équatorial. Elle varie au cours de l'année entre  $-23,45^\circ$  et  $+23,45^\circ$ . La valeur de  $\delta$  peut être calculé par la relation (4.3).

$$\delta = 23,45^\circ \sin[0,980(j + 284)] \quad (4.3)$$

Où  $j$  est le numéro du jour de l'année.

La position du Soleil dans l'espace peut être repérée par ses coordonnées horizontales définies sur la sphère céleste (sphère ayant pour centre la Terre et pour rayon la distance entre la Terre et le Soleil, [Ber04]. Il s'agit de la hauteur **h** et de l'azimut **a**.

La hauteur angulaire **h** est définie comme l'angle que fait la direction du Soleil avec le plan horizontal, alors que, l'azimut **a** est l'angle que fait la direction de la projection du Soleil sur le plan horizontal avec la direction Sud, il est négative vers l'Est et positive vers l'Ouest. Ces deux angles sont fonction de la latitude **l**, du jour **j** et de l'heure solaire TS dans la journée.

La hauteur du Soleil peut se calculer par [Duf06, Jan03]:

$$\sin(h) = \sin(l)\sin(\delta) + \cos(l)\cos(\delta)\cos(\omega) \quad (4.4)$$

Où,  $\omega$  est l'angle horaire calculé par :

$$\omega = 15^\circ(TS - 12) \quad (4.5)$$

Et on déduit l'azimut avec la relation :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta)\sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (4.6)$$

#### 4.1.2.1 Durée du jour

En ce qui concerne la durée du jour, nous considérons les paramètres  $\omega_1$ ,  $(TS)_1$  et  $d$ . Tout d'abord nous décrivons l'angle horaire au lever du soleil  $\omega_1$ , celui-ci s'obtient en écrivant  $\sin(h) = 0$  dans la formule (4.4), ce qui donne :

$$\cos(\omega_1) = -\tan(l)\tan(\delta) \quad (4.7)$$

L'heure solaire au lever du Soleil  $(TS)_1$  est donc (4.8) :

$$(TS)_1 = 12 - \frac{\omega_1}{15} \quad (4.8)$$

L'angle horaire au coucher du Soleil est l'opposé de l'angle au lever, nous avons donc,  $\omega_c = -\omega_1$  et la durée du jour  $d$  vaut [Jan03] :

$$d = 2 \frac{\omega_1}{15} \quad (4.9)$$

On a bien vu que les relations qui concernent le mouvement du Soleil utilisent le temps solaire TS qui diffère généralement du temps légal TL (heure des montres) du lieu, cette différence est liée à :

La différence (fixé par chaque pays) entre l'heure légale TL et l'heure civile TCF du fuseau horaire dans lequel se trouve :

$$C = TL - TCF \quad (4.10)$$

L'heure civile TCF du fuseau horaire est égale au temps universel TU (temps solaire du méridien de Greenwich) augmenté de la valeur du décalage horaire correspondant à chaque région (figure 4.5).

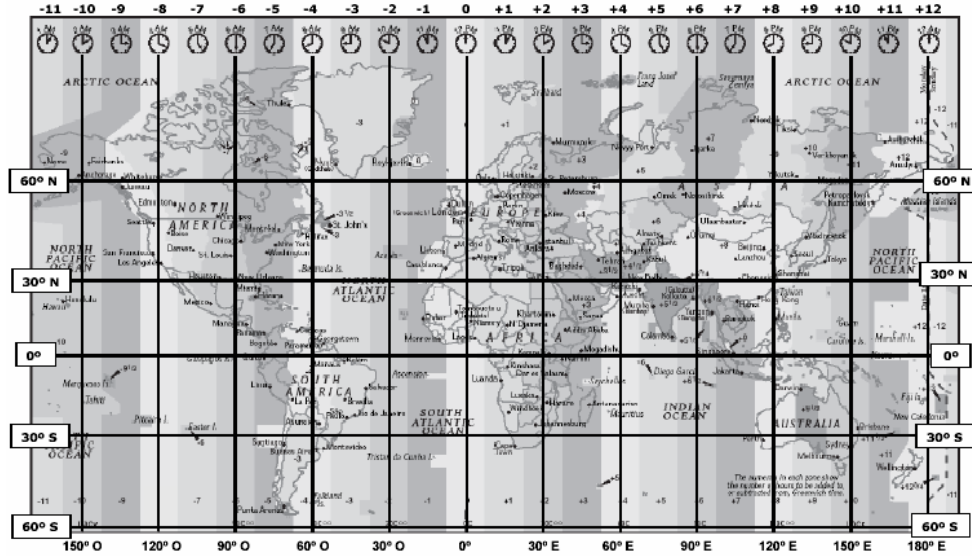


Figure 4.5. Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.

- La variation de la vitesse de la Terre sur sa trajectoire autour du Soleil qui introduit un terme correctif appelé équation du temps ET [Jan03], il peut s'obtenir de la manière suivante :

$$ET = - \left[ \begin{aligned} &0,0002 - 0,4797 \cos(\omega' j) + 3,2265 \cos(2\omega' j) + 0,0903 \cos(3\omega' j) \\ &+ 7,3509 \sin(\omega' j) + 9,3912 \sin(2\omega' j) + 0,3361 \sin(3\omega' j) \end{aligned} \right] \quad (4.11)$$

Où :  $j$  : Numéro de jour de l'année

$$\omega' = \frac{360}{366} = 0,984$$

ET : Equation du temps (terme correctif) en mn ;

- La différence de longitude ( $L - L_{\text{réf}}$ ) entre le lieu considéré et le lieu servant de référence au temps légal (en général le centre du fuseau).

Le terme TS se calcule alors par la relation :

$$TS = TL - C + ET + \frac{(L - L_{\text{réf}})}{15} \quad (4.12)$$

#### 4.1.2.2 Durée de l'ensoleillement

On appelle durée effective d'ensoleillement ou insolation SS le temps pendant lequel, au cours d'une journée, le rayonnement solaire direct atteint le sol du lieu considéré. Les rayonnements directs sont ceux qui atteignent la surface terrestre sans avoir subi de déviation depuis leur émission par le Soleil, [Jan03].

La durée maximale de l'ensoleillement SS<sub>0</sub> pour un site dégagé peut être prise égale à la durée du jour calculé par la relation (4.9). Pour avoir une idée de la quantité d'énergie reçue au cours de la journée, nous utilisons le taux d'ensoleillement ou taux d'insolation qui est le rapport entre la durée effective et la durée maximale d'ensoleillement. Ce paramètre peut s'obtenir avec la relation (4.13).

$$\sigma = \frac{SS}{SS_0} \quad (4.13)$$

Si l'on part d'une irradiation solaire globale G connue, alors on peut connaître le taux d'ensoleillement  $\sigma$  par la relation :

$$G = G_0 (\sqrt{2\sigma + 1} - 0,72) \quad (4.14)$$

$G_0$  est l'irradiation journalière sur un plan horizontal placé au dessus de l'atmosphère calculé par :

$$G_0 = 3,795.10^4 \cos(l) \cos(\delta) \left[ \sin(\omega_1) - \frac{\pi \omega_1}{180} \cos(\omega_1) \right] \quad (4.15)$$

#### 4.1.2.3 Rayonnement solaire au sol

Nous allons nous intéresser à l'énergie solaire qui atteint la surface terrestre. Ainsi, nous étudierons les différents types de rayonnement solaire qui tombent sur une surface quelconque.

Le rayonnement direct, il s'agit de l'énergie solaire qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.

Le rayonnement diffus, est la part de rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'y a pas de direction privilégiée.

Le rayonnement global, est la somme de rayonnement direct et diffus.

La notation utilisée pour les composants du rayonnement solaire sur une surface horizontale est présentée dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2. Notation utilisée pour l'irradiation et l'éclairement solaire

|                                                                                                          |         |       |                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------|-------------------|
| Irradiation solaire<br>Energie reçue pendant une certaine durée<br>$W.m^{-2}.durée^{-1}$ ou $kWh.m^{-2}$ | Directe | S     | $G = S + D$       |
|                                                                                                          | Diffuse | D     |                   |
|                                                                                                          | Globale | G     |                   |
| Eclairement solaire<br>Flux instantané<br>$W.m^{-2}$                                                     | Direct  | $S^*$ | $G^* = S^* + D^*$ |
|                                                                                                          | Diffus  | $D^*$ |                   |
|                                                                                                          | Global  | $G^*$ |                   |

L'irradiation solaire diffuse D sur un plan horizontal à partir de la mesure de l'irradiation journalière globale G s'écrit :

$$D = \left[ 0,91 + 1,154 \left( \frac{G}{G_0} \right) - 4,936 \left( \frac{G}{G_0} \right)^2 + 2,848 \left( \frac{G}{G_0} \right)^3 \right] G \quad (4.16)$$

Ainsi, nous en déduisons  $S = G - D$ .

En utilisant la valeur connue de G, nous pouvons calculer l'éclairement solaire global  $G^*$  par :

$$G^* = \frac{\pi}{24} [a + b \cos(\omega)] \frac{\cos(\omega) - \cos(\omega_1)}{\sin(\omega_1) - \frac{\pi \omega_1}{180} \cos(\omega_1)} G \quad (4.17)$$

$$\text{Où : } a = 0,409 + 0,502 \sin(\omega_1 - 60^\circ)$$

$$b = 0,661 - 0,477 \sin(\omega_1 - 60^\circ)$$

L'éclairement solaire direct  $S^*$  sur un plan horizontal peut se déterminer selon les données disponibles, G pour notre cas particulier.

L'ensoleillement diffus  $D^*$  s'exprime par la relation (4.18) :

$$D^* = \frac{\pi}{24} [a + b \cos(\omega)] \frac{\cos(\omega) - \cos(\omega_1)}{\sin(\omega_1) - \frac{\pi \omega_1}{180} \cos(\omega_1)} D \quad (4.18)$$

$$\text{Finalement } S^* = G^* - D^* \quad (4.19)$$

#### 4.1.2.4 Rayonnement solaire sur un plan quelconque

Pour connaître la quantité d'énergie solaire récupérée par un capteur solaire de surface  $A_{cap}$ , orienté vers une direction sud et avec une certaine inclinaison ( $\gamma$ ), nous avons utilisé la démarche suivante :

Soit une surface plane inclinée d'un angle «  $i$  » par rapport à l'horizontale et orientée vers une direction faisant un angle  $\gamma$  avec la direction Sud ( $\gamma$  compté positivement vers l'Ouest). Le rayonnement global  $G^*(i, \gamma)$  reçu par cette surface est la somme de 3 termes, [Jan03]:

$$G^*(i, \gamma) = S^*(i, \gamma) + D^*(i, \gamma) + R^*(i, \gamma) \quad (4.20)$$

Chacun des 3 termes se calculant de la façon suivante :

Eclairement direct :

$$S^*(i, \gamma) = \frac{S^*}{\sin(h)} [\cos(h)\sin(i)\cos(a - \gamma) + \sin(h)\cos(i)] \quad (4.21)$$

Eclairement diffus :

$$D^*(i, \gamma) = \frac{D^*}{2} [1 + \cos(i)] \quad (4.22)$$

Eclairement réfléchi :

$$R^*(i, \gamma) = \frac{G^*}{2} \rho [1 - \cos(i)] \quad (4.23)$$

Où  $\rho$  est le facteur de réflexion du sol vis-à-vis du rayonnement solaire,  $\rho$  est appelé l'**albedo**.

Pour la validation du code, on a réalisé une simulation avec les coordonnées de l'aéroport de Mexico et les valeurs de l'irradiation globale journalière moyenne de l'aéroport de Mexico, montrées dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3. Coordonnées géographiques de l'aéroport de Mexico

| Localité | Latitude<br><b>I</b> | Longitude<br><b>L</b> | $L_{\text{réf}}$ | Albedo | G                      |
|----------|----------------------|-----------------------|------------------|--------|------------------------|
| Mexico   | (°)                  | (°)                   | (°)              | (-)    | (kWh.m <sup>-2</sup> ) |
|          | 19,40                | -99,09                | -105             | 0,25   | 5*                     |

\*Source : SENER (Secretaría de Energía, Mexique, [Sen04])

La figure 4.6 compare l'ensoleillement réel et l'ensoleillement estimé pour notre modèle pour le 15 mai, 2006. Le programme permet d'estimer la valeur de  $G^*(i,\gamma)$  pour une journée quelconque de l'année.

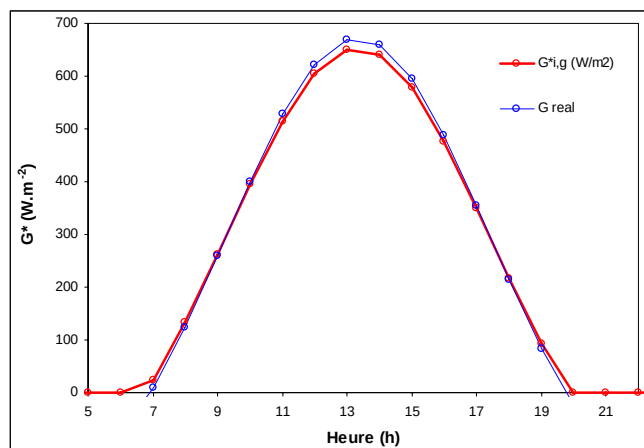


Figure 4.6. Variation de l'ensoleillement de l'aéroport de Mexico, (15/05/2006)

Les écarts observés entre la courbe réelle et la courbe simulée sont dans une plage de 1 à 6%. On peut conclure que le modèle utilisé, représente de manière satisfaisante le comportement de l'ensoleillement solaire journalier  $G^*$  à partir des données géographiques du site, de l'irradiation journalière globale  $G$  et de la saison de l'année.

#### 4.1.2.5 Conclusion sur le modèle de milieu extérieur « météorologie »

Nous avons obtenu deux relations parcimonieuses, (4.1) et (4.2), permettant d'estimer les variations de la température et de l'humidité relative journalières horaires, à partir des données maximales et minimales mensuelles connues.

Un programme de calcul de l'ensoleillement permet d'estimer ces variations journalières horaires en fonction de la saison de l'année, des coordonnées géographiques du site et de l'irradiation journalière globale  $G$ .

Cette modélisation permettra l'établissement des conditions du milieu extérieur à considérer lors de la simulation du fonctionnement du séchoir solaire.



## 4.2 Modèle de l'Unité de Séchage et modèle du milieu extérieur « bois »

Le modèle du milieu extérieur « bois » concerne le modèle de cinétique de séchage décrivant l'évolution de la teneur en eau lors du séchage convectif d'une planche de bois dans une veine d'essai en laboratoire. Il existe plusieurs paramètres pertinents de la vitesse de séchage, ce sont des paramètres caractéristiques de l'air de séchage, la température  $T_a$ , l'humidité relative  $HR_a$  (ou la pression partielle de l'air) et la vitesse  $U_a$ . Normalement, seule la caractéristique géométrique épaisseur de la planche est pertinente mais comme nous n'avons qu'une seule épaisseur de planche à sécher, elle n'intervient pas.

Le modèle de l'Unité de séchage va permettre de traduire l'évolution de la teneur en eau d'une pile de bois dans son environnement de séchage.

Les variables d'entrée et de sortie des deux modèles sont définies par la figure 4.7.

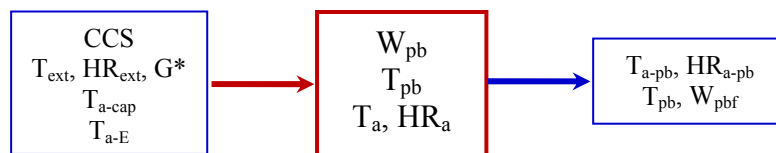


Figure 4.7 Entrées/sorties du modèle de l'unité de séchage

Nous cherchons un modèle simple qui permette son intégration dans un code de simulation du séchage d'une pile de bois, dans le but d'établir des scénarios de séchage pour des conditions de  $T_a$ ,  $HR_a$  et  $U_a$  variables.

### Les Besoins :

- *Un modèle qui représente de manière correcte la cinétique de séchage d'une planche de pin maritime.*
- *Un modèle global du séchage d'une pile de bois, en considérant les caractéristiques d'une chambre de séchage et la cinétique de séchage obtenue auparavant.*

### 4.2.1 Modèle de milieu extérieur « bois »

#### 4.2.1.1 Etat de l'art des modèles du milieu extérieur « bois »

Plusieurs types de modèles peuvent représenter l'évolution de la teneur en eau dans le bois, Nadeau [Nad95] les a répertoriés. L'utilisation d'un modèle ou d'un autre dépend de l'objectif recherché. Nous présentons un résumé des principaux modèles utilisés dans la simulation du séchage de bois :

- **les modèles semi-empiriques** : il s'agit d'un modèle, issu des expériences, décrit par des comportements discernables sur la courbe de séchage. Nadeau [Nad95], propose un modèle dans lequel les variations de la teneur en eau du bois sont décrites par un flux masse ( $F_m$ , évolution de la masse d'eau évaporée par unité de surface et par unité de temps) basé sur la phase de séchage isenthalpe à vitesse constante puis minoré par une fonction  $\beta$  lors des phases de ralentissement. Ce modèle a été repris par Khater, [Kha04] pour représenter le séchage d'une pile de bois dans un séchoir solaire en obtenant de résultats satisfaisants. Lorsque la phase à vitesse constante n'est pas discernable, on va dépouiller les résultats soit par un modèle temporel (fonction du temps et donc très spécialisé) soit par une expression de la vitesse de séchage en fonction d'une vitesse de séchage maximale de référence minorée d'une fonction de la teneur en eau moyenne instantanée. Cette méthode développée par Van Meel [Mee58] est appelée la méthode de la courbe caractéristique de séchage, CCS.
- **le modèle diffusif** : la description du séchage se traduit par une équation de diffusion dans laquelle chaque phase de séchage est représentée par son propre coefficient de transport noté  $D_\beta$ . La cinétique est interprétée en 3 phases de séchage : une phase isenthalpe, une phase de premier ralentissement et une phase de deuxième ralentissement. L'indice  $\beta$  représente chacune des phases de séchage (1, 2, 3), [Nad95]. La cinétique de séchage d'après le modèle diffusif s'écrit :

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D_\beta \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \quad (4.24)$$

- finalement, **le modèle complet**, il s'agit d'un modèle qui prend en compte le mouvement des deux types d'eau dans le bois (libre et liée). On parle donc, d'une phase liquide et d'une phase gazeuse ou de vapeur d'eau [Whi77]. L'équation représentant la cinétique de séchage est de la forme :

$$\frac{dW}{dt} + \nabla \left\{ \frac{1}{\rho_s} (\rho_l \bar{V}_l + \rho_v \bar{V}_v + \rho_b \bar{V}_b) \right\} = 0 \quad (4.25)$$

où :  $\rho_s$ ,  $\rho_l$ ,  $\rho_v$  et  $\rho_b$  : masse volumique, solide, liquide, de la vapeur, et de l'eau liée respectivement.

$U_l$ ,  $U_v$  et  $U_b$  : vitesse liquide, de la vapeur et de l'eau liée, respectivement.

Pour le cas du séchage solaire de bois, la détermination de la cinétique de séchage ne requiert pas l'analyse fortement fine du matériau. Dans ce contexte, nous avons constaté que le modèle complet n'a pas encore été appliqué dans ce domaine.

Le modèle diffusif a été souvent repris pour représenter la cinétique de séchage du bois. Dans le cas particulier du séchage solaire, nous pouvons mentionner les travaux de Haque [Haq01] et Khater, [Kha04]. Ils se sont servi de ce modèle pour simuler le séchage de bois en obtenant des résultats acceptables.

Pour notre cas particulier, nous avons utilisé le modèle de la CCS. La CCS permet de représenter plusieurs courbes obtenues dans des conditions expérimentales différentes par une courbe unique appelée « la courbe caractéristique de séchage ». Elle représente les cinétiques de séchage par un modèle de comportement [Mee58]. Ce modèle permet d'aboutir à une modélisation simplifiée du séchage d'une planche de bois intégrable facilement dans la modélisation complète d'une pile de bois, [Jan06], [Mar95]. Dans la suite, nous expliquons le principe de cette méthode.

#### 4.2.1.2 Modèle de la CCS

Le principe de cette méthode consiste à tracer sur un même graphe les courbes de séchage réduites représentant la vitesse réduite en fonction de la teneur en eau réduite  $W^*$ . Ces deux termes sont mieux expliqués dans la suite.

Pour un certain nombre de produits, les courbes de séchage réduites obtenues sous différentes conditions d'air se superposent et peuvent être représentées par une courbe unique que l'on appelle la CCS du produit.

Dans ce cas, la vitesse de séchage d'un produit de teneur en eau  $W$  soumis à un air de conditions  $T_a$ ,  $HR_a$  et  $U_a$  se calcule de la façon suivante :

$$\frac{dW}{dt} = \left( \frac{dW}{dt} \right)_{\max} f(W^*) \quad (4.26)$$

Pour rendre le modèle utilisable nous avons besoin d'identifier :

- la teneur en eau  $W_{eq}$  pour différentes conditions d'air ce qui revient à déterminer puis à modéliser les isothermes de désorption pour différentes températures,
- une forme mathématique de la fonction  $f$  après avoir vérifié que les courbes de séchage réduites correspondant à différentes conditions de séchage se superposent,

- une relation permettant d'estimer la vitesse  $\left(\frac{dW}{dt}\right)_{\max}$  en fonction des conditions de l'air  $T_a$ ,  $HR_a$  et  $U_a$  pour une taille et une géométrie de produit données.
- une courbe des points caractéristiques  $W_{cr}$  en fonction des conditions de séchage ( $HR_a$  et  $T_a$ ). Signalons que faute de données expérimentales,  $W_{cr}$  est souvent pris comme indépendant de  $T_a$  et  $HR_a$  et égale à la teneur en eau initiale, car la phase isenthalpe n'est plus observable pour le cas de bois.

#### 4.2.1.3 Isothermes de sorption et teneur en eau réduite $W^*$

La teneur en eau de l'air ainsi que sa température participent au mouvement de l'eau dans le bois et aux transferts de vapeur à sa surface. L'isotherme de sorption est la courbe représentant pour une température  $T_a$  donnée, la teneur en eau d'équilibre  $W_{eq}$  d'un produit en fonction de la valeur de l'activité de l'eau  $a_w$  ou de l'humidité relative en équilibre  $HR_a$  [Jan06]. Elles représentent, pour des températures et humidités relatives données, la teneur en eau d'équilibre du produit.

Il existe plusieurs modèles pour représenter l'évolution de la teneur en eau d'équilibre d'un produit [Jan06]. Tous ne sont pas applicables au bois mais permettent plutôt de représenter les isothermes de sorption de produits alimentaires.

Pour le cas particulier du pin maritime, on retiendra le modèle des courbes de sorption trouvé par Lartigue, [Lar87], ce modèle a aussi été utilisé par Couture, [Cou95]. Finalement le modèle a été repris par Nadeau, [Nad95], pour décrire l'équilibre hygroscopique du bois de pin maritime avec l'air environnant. Il propose la relation (4.27) liant la teneur en eau en équilibre  $W_{eq}$  du bois et de l'humidité relative  $HR_a$  de l'air à une température  $T_a$  donnée.

$$W_{eq} = \frac{\ln \left[ C - \frac{\ln \left( \frac{HR}{100} \right)}{A} \right]}{100 \ln(B)} \quad (4.27)$$

$$A = -2,86 \times 10^{-5} T^2 - 1,07 \times 10^{-2} T + 10,24$$

$$B = -5,41 \times 10^{-4} T + 1,01$$

$$C = 4,97 \times 10^{-6} T^2 - 2,67 \times 10^{-3} T + 0,35 \quad \text{Où } T \text{ est exprimée en K.}$$

Les isothermes de sorption prédites par ce modèle pour le bois de pin maritime sont représentées sur la figure (4.8).

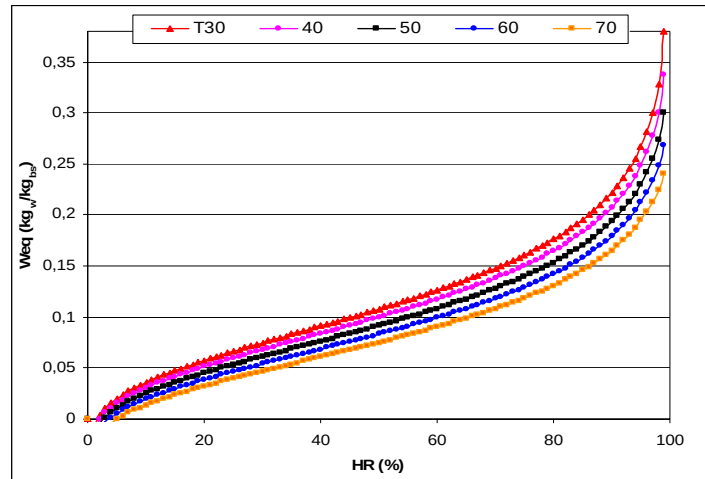


Figure 4.8. Isothermes de sorption pour le pin maritime

La teneur en eau réduite est définie par :

$$W^* = \frac{W - W_{eq}}{W_{cr} - W_{eq}} \quad (4.28)$$

où :  $W$  : Teneur en eau moyenne du produit

$W_{eq}$  : Teneur en eau d'équilibre

$W_{cr}$  : Teneur en eau critique correspondant à la fin de la phase isenthalpe de séchage

Cette teneur en eau réduite  $W^*$  varie entre la valeur 1 à partir de la teneur en eau critique et tend vers une valeur nulle en fin de séchage.

#### 4.2.1.4 Définition de la vitesse de séchage réduite

On définit la vitesse de séchage réduite par :

$$\frac{\left(\frac{dW}{dt}\right)_{(t)}}{\left(\frac{dW^*}{dt}\right)_{(0)}} \quad (4.29)$$

où :  $\left(\frac{dW}{dt}\right)_{(t)}$  est la vitesse de séchage à l'instant  $t$

$\left(\frac{dW}{dt}\right)_{(0)}$  est la vitesse de séchage en phase isenthalpe (début du séchage)

Cette vitesse réduite, varie entre la valeur 1 au début du séchage et tend vers une valeur nulle en fin de séchage.

#### 4.2.1.5 Cinétique de séchage

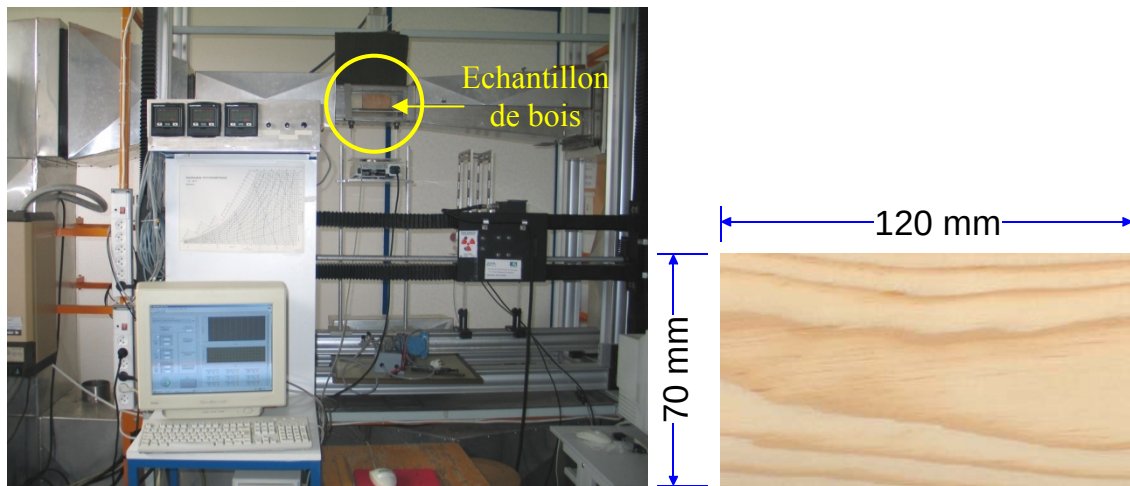
##### 4.2.1.5.1 Description des essais

Nous avons identifié un certain nombre de modèles physiques proposés par différents auteurs [Lar87, Col88, Nad95, Cou95] pour représenter la cinétique de séchage du pin maritime. Ces modèles complets multidirectionnels prennent en compte les gradients internes de teneur en eau et permettent de bien représenter les cinétiques de séchage à conditions d'air constantes. Leur complexité les rend toutefois difficilement intégrables dans un code de calcul visant à simuler le séchage d'une pile de bois complète sous des conditions d'air variant de manière continue.

Nous avons opté pour le choix du modèle de la CCS, modèle parcimonieux, et donc facilement intégrable dans un programme de simulation du séchage d'une pile de bois complet.

Pour exploiter ce modèle il faut disposer de résultats expérimentaux de cinétiques de séchage obtenues sous différentes conditions d'air afin d'identifier la forme de la CCS. Nous avons effectué une recherche bibliographique afin de trouver des cinétiques expérimentales pour le bois de pin maritime. Nous n'avons trouvé qu'une seule courbe expérimentale dans le travail de Lartigue, [Lar87].

Nous avons donc réalisé plusieurs expériences de séchage pour le pin maritime correspondant à différentes conditions d'air afin de pouvoir identifier la CCS. On a séché des échantillons de bois (120x70x27mm) dans la veine de séchage du laboratoire TREFLE, (figure 4.9) qui permet une régulation en température ( $T_a$ ), humidité relative ( $HR_a$ ) et vitesse de l'air ( $U_a$ ) et une acquisition continue de la masse. Les produits ont été disposés sur une claie grillagée de dimensions 25 x 11 cm<sup>2</sup> dont la masse totale est mesurée par une balance de précision 1mg. Cette masse est enregistrée avec un pas de temps de 3 minutes (180 s) jusqu'à la fin du séchage. Le périmètre de chaque échantillon a été étanchéifié afin d'éviter le séchage sur les côtés. On a donc considéré, un produit plat à deux faces dans lequel les transferts sont monodimensionnels, c'est-à-dire un séchage par léchage.



**Figure 4.9 Veine de séchage (planche épaisseur 27mm)**

Pour les essais, on a choisi 6 conditions de séchage dont les valeurs sont reportées dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4. Conditions de séchage et résultats des expériences

| Conditions de séchage |             |            |        |             |             |                |                |                |
|-----------------------|-------------|------------|--------|-------------|-------------|----------------|----------------|----------------|
| Essai                 | $T_a$       | $U_a$      | $HR_a$ | $T_h$       | $T-T_h$     | $W_{eq}$       | $W_i$          | $W_f$          |
|                       | $^{\circ}C$ | $m.s^{-1}$ | %      | $^{\circ}C$ | $^{\circ}C$ | $kg_w/kg_{ss}$ | $kg_w/kg_{ss}$ | $kg_w/kg_{ss}$ |
| 1                     | 30          | 2          | 50     | 22          | 8,0         | 0,11           | 0,94           | 0,12           |
| 2                     | 40          | 2          | 50     | 30,3        | 9,7         | 0,1            | 0,8            | 0,12           |
| 3                     | 40          | 3,5        | 50     | 30,3        | 9,7         | 0,1            | 0,76           | 0,12           |
| 4                     | 40          | 5          | 50     | 30,3        | 9,7         | 0,1            | 0,86           | 0,07           |
| 5                     | 40          | 2          | 30     | 25,1        | 14,9        | 0,068          | 0,73           | 0,15           |
| 6                     | 50          | 2          | 50     | 38,7        | 11,3        | 0,091          | 0,71           | 0,11           |

Où :

$T_h$  : température humide de l'air

$W_i$  : Teneur en eau initiale du bois

$W_f$  : Teneur en eau finale du bois

La teneur en eau moyenne  $W_f$  du produit en fin de séchage est déduite par étuvage à  $102^{\circ}C$  pendant 24 h. En connaissant les valeurs de la teneur en eau et de la masse du produit  $M_b(t)$ , on peut calculer  $W(t)$ .

La vitesse de séchage  $\frac{dW}{dt}(t)$  est calculée par :

$$\frac{dW}{dt}(t_i) = \frac{1}{2} \left[ \frac{W(t_{i-1}) - W(t_i)}{t_i - t_{i-1}} - \frac{W(t_i) - W(t_{i+1})}{t_{i+1} - t_i} \right] \quad (4.30)$$

Le faible pas de temps génère un bruit important sur les valeurs estimées ce qui nous a amené à les remplacer par une moyenne mobile centrée calculée sur 9 points. Ce nombre de points est le plus élevé possible ne produisant aucun biais sur la courbe des vitesses de séchage : une valeur plus élevée aurait conduit à une translation et à un écrasement de cette courbe. On constatera plus loin sur la [figure 4.12](#) que cette méthode permet de réduire le bruit sur les valeurs calculées de la vitesse de séchage.

#### 4.2.1.5.2 Identification de la CCS

La figure (4.10), montre les résultats de la vitesse de séchage réduite  $V^*$  en fonction de la teneur en eau réduite  $W^*$  pour 3 essais pour différentes températures d'air en coordonnées semi-logarithmiques. La vitesse de séchage réduite  $V^*$  a été calculée en divisant la vitesse de séchage instantanée par la valeur maximale atteinte  $V_{\max}$ .

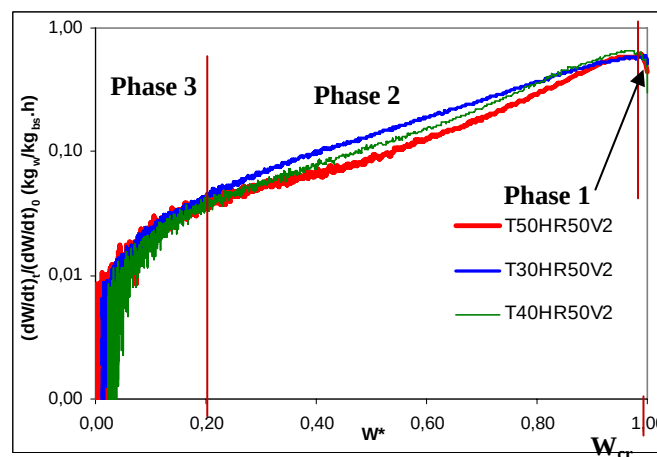


Figure 4.10. Vitesse de séchage expérimentale réduite (planche épaisseur 27mm)

Les courbes font apparaître clairement les trois phases typiques distinctes du séchage :

- une phase 1 correspondant à la mise en température du produit plutôt qu'à une phase isenthalpe. On s'aperçoit que la phase de séchage isenthalpe n'existe pas pour notre cas particulier. C'est souvent le cas lorsque le débit des planches s'est fait longtemps après l'abattage,
- La phase 2 où la vitesse de séchage diminue correspondant à l'évacuation de l'eau libre (premier ralentissement),
- une phase 3 où la vitesse diminue plus rapidement correspondant à l'évacuation de l'eau liée (deuxième ralentissement).



Après avoir analysé les résultats expérimentaux, on s'aperçoit qu'il est envisageable d'écrire une expression mathématique qui groupe toutes les courbes dans une courbe unique (CCS). En sachant que la méthode de la CCS est purement expérimentale, on écrira le modèle sous la forme :

$$\text{Si } W^* < W_{2-3}^* : \quad f(W^*) = \left( \frac{dW}{dt} \right)_{\max} (cW^* + d) \quad (4.31)$$

$$\text{Si } W_{2-3}^* < W^* \quad f(W^*) = \left( \frac{dW}{dt} \right)_{\max} \left[ \frac{\exp(bW^*)}{\exp(b)} \right] \quad (4.32)$$

Où, la valeur de  $W_{2-3}^*$  correspondant à la transition entre les phases de séchage 2 et 3 a été estimée à 0,2. Elle a été déterminée graphiquement sur l'ensemble des courbes en coordonnées réduites.

La valeur de  $d$  est nulle car si la vitesse réduite est égale à 0, alors  $W^* = 0$ .

La vitesse de séchage maximale  $\left( \frac{dW}{dt} \right)_{\max}$  a été représentée à partir d'un modèle en l'exprimant en fonction des paramètres de l'air de séchage ( $P_{v\text{-surf}}(T_{pb})$  et  $P_{v\text{-air}}$ ) :

$$\left( \frac{dW}{dt} \right)_{\max} = A [P_{v\text{-surf}}(T_{pb}) - P_{v\text{-air}}]^\alpha U^\beta \quad (4.33)$$

Les paramètres  $A$ ,  $\alpha$ , et  $\beta$  ont été estimés par minimisation de la somme des écarts quadratiques entre les vitesses de séchage expérimentales maximales et le modèle de la vitesse de référence (éq. 4.33) définie par :

$$S_{ec} = \sum_{i=1}^6 (V_{\text{exp-max}} - V_{\text{max-mod}})^2 \quad (4.34)$$

Les valeurs ainsi obtenues sont les suivantes :  $A = 0,07611$ ,  $\alpha = -0,009301$   $\beta = 0,4099$

L'écart moyen observé entre les valeurs expérimentales et celles recalculées par la relation (4.33) avec les valeurs précédentes est de 5,67 %, ce qui est acceptable.

Les teneurs en eau ont été calculées à partir de  $\frac{dW}{dt}$  par :

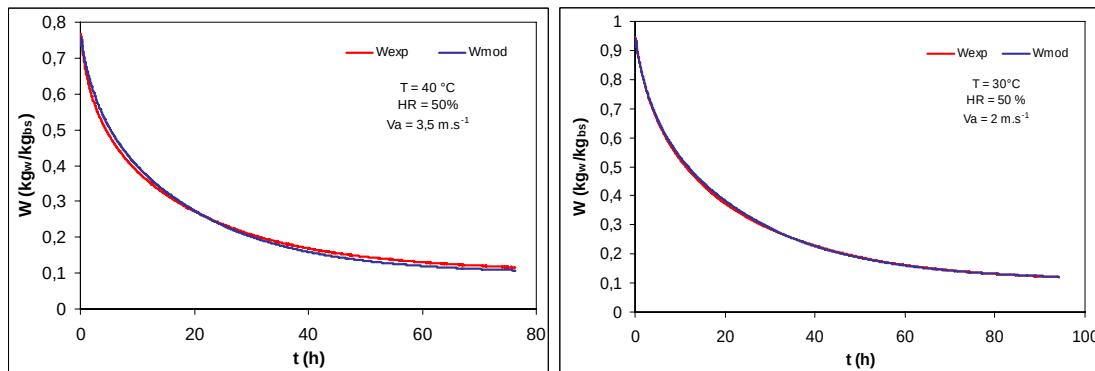
$$W(t + dt) = W(t) + \left( \frac{dW}{dt} \right) dt \quad (4.35)$$

Pour le calcul de cette grandeur, nous avons utilisé la méthode suivante :

Tout d'abord nous avons calculé  $\frac{dW}{dt}$  avec les relations (4.31) ou (4.32) selon la valeur de  $W^*$  et la valeur de  $\left(\frac{dW_{pb}}{dt}\right)_{\max}$ . Ensuite, nous avons recalculé les valeurs des paramètres  $b_i$  et  $c_i$  pour chacune des expériences en minimisant la somme des écarts quadratiques entre la teneur en eau expérimentale et la teneur en eau du modèle, nous avons utilisé la relation (4.36).

$$\sum_{W=W_i}^{W=0,12} [W_{\text{mod}}(t) - W_{\text{exp}}(t)]^2 \quad (4.36)$$

Finalement, nous avons retenu les valeurs moyennes de  $b = 3,1446$ ,  $c = 0,361$  et  $d=0$  ainsi que  $\left(\frac{dW_{pb}}{dt}\right)_{\max}$  de chaque essai pour recalculer  $W_{\text{mod}}$  en utilisant la méthode de différences finies. Les écarts observés entre les courbes de séchage expérimentales et les courbes simulées sont acceptables ainsi que le montrent les deux cas représentés sur la figure (4.11).



**Figure 4.11. Ecarts observés entre les courbes expérimentales et simulées.**

Ces écarts sont dus, en partie, à la variabilité des propriétés du bois (hétérogène) même si les échantillons sont issus de la même pièce. Cela a été démontré par [Raj06] qui ont observé des variations allant jusqu'à 20% de la masse volumique du pin nordique sur 20 échantillons provenant d'une même pièce de bois.

On a également réalisé une deuxième série d'essais pour les conditions 1, 2 et 3 du tableau 4.4. La figure (4.12) qui représente les vitesses de séchage en fonction de la teneur en eau réduite montre les écarts dus à l'hétérogénéité du bois.

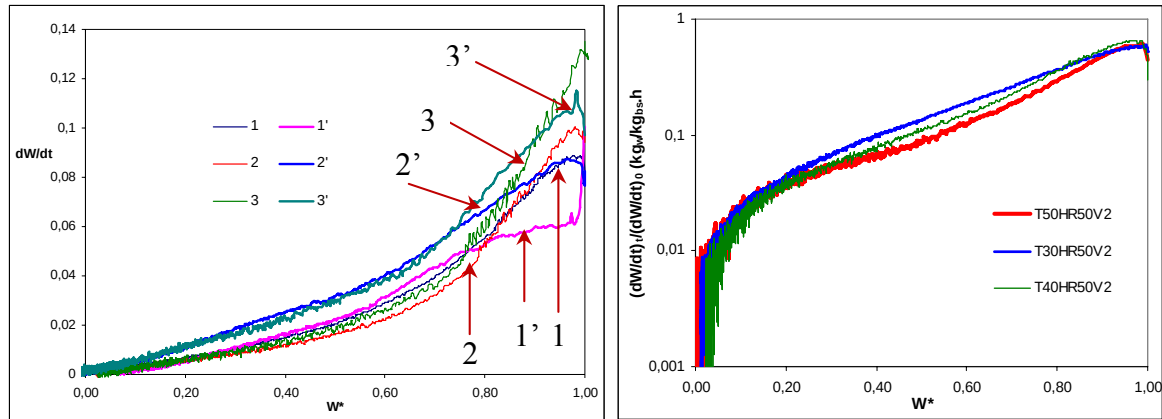


Figure 4.12. Ecarts dus à l'hétérogénéité du bois

Les courbes 2, 2', 3 et 3' montrent la grande variabilité du bois. Au début du séchage elles sont proches, après une certaine teneur en eau, elles s'écartent de façon non négligeable, cela confirme l'hétérogénéité du bois. Un autre facteur qui a pu influencer la variabilité des résultats expérimentaux est le stockage des échantillons. Les échantillons sont restés plongés dans l'eau le temps de déroulement de chaque essai. Ce fait a changé leurs propriétés et leur comportement devant le séchage.

Le modèle de la CCS à exploiter est résumé à l'aide de la relation :

$$\frac{dW_{pb}}{dt} = 0,0761 \left[ P_{v-surf}(T_{pb}) - P_{v-a} \right]^{-0,009301} U_a^{0,4099} \left\{ \frac{0,361 W^* \exp(3,1446 W^*)}{\exp(3,1446)} \right\} \quad (4.37)$$

#### 4.2.1.6 Modèle de milieu extérieur bois pour une planche d'épaisseur 27 mm

La méthode empirique de la CCS permet d'écrire la relation 4.37, elle résume le modèle de comportement à exploiter lors de la modélisation d'une pile de bois. Le modèle est issu des expériences de séchage réalisées sous des conditions de température, humidité et vitesse de l'air de l'air contrôlées.

Le domaine de validité du modèle est :

$$2 < U_a < 3,5 \text{ m.s}^{-1} ; 30 < T_a < 50^\circ\text{C} ; 30 < HR_a < 50\%.$$

Le chapitre 4.2.3. va qualifier ce modèle dans le contexte de l'unité de séchage.

## 4.2.2 Modèle de l'unité de séchage

### 4.2.2.1 Objectifs

Nous allons chercher un modèle parcimonieux pour décrire l'évolution de la température et de la teneur en eau d'une pile de bois, ainsi que de l'air dans l'enceinte au cours du séchage.

En accord avec la démarche de modélisation proposée, nous cherchons à établir des scénarii de séchage pour des journées types (en accord aux conditions météorologiques).

L'objectif est d'intégrer ce modèle dans un programme de simulation global du séchoir solaire qui permettra :

- De dimensionner les différents éléments du séchoir
- De proposer une conduite de séchage adaptée aux conditions extérieures (la Température, l'Humidité Relative, la Vitesse du vent et l'Ensoleillement)

### 4.2.2.2 Bilans globaux d'énergie : hypothèses et couplages

Compte tenu de la forme d'une pile de bois lors du séchage, les planches sont empilées en plusieurs lits superposés de  $n$  planches dans le sens de l'écoulement avec un écartement entre chaque lit donné par l'épaisseur des baguettes,  $a$  (figure 4.13). Le rapport entre l'épaisseur des baguettes et celle du bois présente une forte influence sur les vitesses de l'air dans la pile. Ainsi, Jolly [Jol80] mentionne que pour des épaisseurs de bois inférieures ou égaux à 29 mm il faudra utiliser, des baguettes d'épaisseurs entre 15 et 20 mm, 20 à 25 mm de largeur et un écartement entre baguettes de 400 à 800 mm.

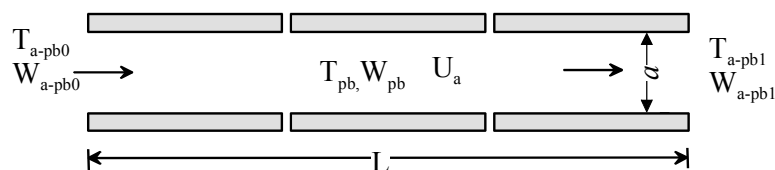


Figure 4.13. Empilement des planches

Pour la modélisation de la pile de bois nous sommes parti des hypothèses suivantes :

La pile de bois est considérée comme une série de  $n$  planches empilées dans le sens de l'écoulement

- La vitesse de l'air est la même au niveau de toutes les planches
- Une partie de l'air recircule dans la chambre
- Uniformité de l'air dans la chambre de séchage (bien mélangé)

- $\rho_a$  et  $C_{p_a}$  sont environ ceux de l'air sec ( $\rho_{as}$  et  $C_{p_{as}}$ )
- La teneur en eau moyenne  $W$  d'une planche ne dépend que de sa position par rapport à l'entrée d'air repérée par  $x$  et du temps  $t$  écoulé depuis le début du séchage :  $\bar{W} = \bar{W}(x, t)$ .
- Le gradient d'humidité est faible dans l'épaisseur des planches et pas de gradient de température
- La cinétique de séchage est décrite par l'expression de la courbe caractéristique (CCS)
- La vitesse de séchage réduite décroît de manière linéaire au début du séchage et de façon exponentielle à la fin.

Compte tenu des hypothèses retenues, pour connaître l'évolution des conditions du produit et de l'air en chaque point du séchoir nous avons adopté la démarche proposée par Jannot, [Jan06]. Nous utilisons la figure 4.14 pour représenter le principe de calcul utilisée.

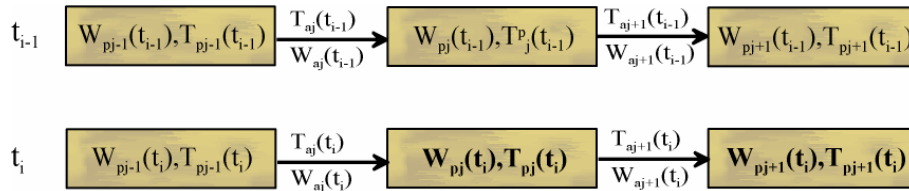


Figure 4.14. Schéma de principe du calcul itératif : paramètres connus et paramètres à déterminer en gras

Nous calculons donc :

- la teneur en eau  $W_{pj}(t_i)$  de la  $j^{\text{ème}}$  planche à l'instant  $t_i$ ,
- la température  $T_p(t_i)$  de la  $j^{\text{ème}}$  planche à l'instant  $t_i$ ,
- les conditions de l'air  $T_{aj+1}(t_i)$  et  $W_{aj+1}(t_i)$  à l'instant  $t_i$  après contact avec la  $j^{\text{ème}}$  planche connaissant :
- la teneur en eau  $W_{pj}(t_{i-1})$  du  $j^{\text{ème}}$  de la  $j^{\text{ème}}$  planche à l'instant  $t_{i-1}$ ,
- la température  $T_p(t_{i-1})$  de la  $j^{\text{ème}}$  planche à l'instant  $t_{i-1}$ ,
- les conditions de l'air  $T_{aj}(t_i)$  et  $W_{aj}(t_i)$  à l'instant  $t_i$  avant contact avec la  $j^{\text{ème}}$  planche

#### 4.2.2.3 Conservation de la masse sur le bois

Ce calcul s'effectue en plusieurs étapes. Un bilan massique sur la  $j^{\text{ème}}$  planche entre les instants  $t_{i-1}$  et  $t_i$  permet de calculer  $W_j(t_i)$  par :

$$M_j(t_i) = M_j(t_{i-1}) - dM_j(t_i) \quad (4.38)$$

avec

$$dM_j(t_i) = M_{js} \left[ -\frac{d\bar{W}_j(t_i)}{dt} \right] (t_i - t_{i-1}) \quad (4.39)$$

où  $M_{js}$  est la masse sèche de la  $j^{\text{ème}}$  planche invariante avec le temps

$$\text{et} \quad -\frac{dW_j(t_i)}{dt} = \left( \frac{dW_{pb}}{dt} \right)_{\max} \left[ U_a, T_{aj}(t_i), HR_j(t_i) \right] f \left\{ W(t_{i-1}), W_{eq} \left[ T_{aj}(t_i), HR_j(t_i) \right] \right\} \quad (4.40)$$

où  $U_a$  est la vitesse de l'air (constante) au niveau du produit, la fonction  $f$  par les relations (4.31) ou (4.32), et  $\left( \frac{dW_{pb}}{dt} \right)_{\max}$  par la relation (4.33).

Pour le calcul de  $W_{eq}$  nous utiliserons la relation (4.28) qui est une fonction de  $HR$  et  $T_a$ .

#### 4.2.2.4 Conservation de la masse sur l'air

Un bilan massique sur l'air permet de calculer  $W_{j+1}(t_i)$  par :

$$\rho_a V_a \frac{dW_a}{dt} = -\rho_b^s V_b \frac{d\bar{W}_{pb}}{dt} \quad (4.41)$$

#### 4.2.2.5 Conservation de l'énergie sur le bois

Un bilan thermique sur la  $j^{\text{ème}}$  planche permet de calculer  $T_{pj}(t_i)$  :

$$h A_j(t_i) \left[ T_{aj}(t_i) - T_{pj}(t_i) \right] = M_j(t_i) C_p \left[ T_{pj}(t_i) - T_{pj}(t_{i-1}) \right] + M_{js} \left[ -\frac{d\bar{W}_j(t_i)}{dt} \right] \Delta H \quad (4.42)$$

#### 4.2.2.6 Conservation de l'énergie sur l'air

Un bilan thermique sur l'air avant et après échange de chaleur et de masse avec la  $j^{\text{ème}}$  planche permet enfin de calculer  $T_{aj+1}(t_i)$  :

$$\rho_a V_a (C_{p_a} + W_a C_{p_w}) \frac{dT_a}{dt} = h A (T_{pb} - T_a) \quad (4.43)$$

$A_j(t_i)$  est la surface en contact avec l'air de la  $j^{\text{ème}}$  planche.

$h$  est calculé dans l'annexe 1.

Pour le cas du pin maritime, Lartigue, [Lar87], propose de calculer la chaleur massique du bois par la relation suivante :

$$C_{p_b} = \frac{1209 + 4180 \bar{W}}{1 + \bar{W}} \quad (4.44)$$

La modélisation de la pile de bois en fonction de la cinétique de séchage (CCS), permet de connaître l'évolution de la teneur en eau du bois et des conditions de l'air de

séchage. Nous allons exploiter ce modèle pour réaliser le couplage global d'un séchoir solaire selon le schéma présenté sur la figure 4.1.

### 4.2.3 Qualification du modèle extérieur « bois » dans le contexte de l'unité de séchage

#### 4.2.3.1 Evaluation de la Parcimonie

La cinétique de séchage du bois de pin est représentée par un modèle issu de la courbe caractéristique de séchage, CCS. Le modèle est composé par :

- 11 variables et 4 relations

Tableau 4.5. Identification des variables de conception dans le modèle extérieur bois

| Fonction       | Flux                                            | VCo              | VA                                                             | VPi                  |
|----------------|-------------------------------------------------|------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------|
| Sécher le bois | Energie thermique<br><br>Matière (vapeur d'eau) | $(L, l, H)_{pb}$ | $T_a$<br>$HR_a$<br>$U_a$<br>$P_{v-surf}$<br>$P_{v-a}$<br>$W^*$ | $\tau_m$<br>$\tau_r$ |

La parcimonie est donc de  $\frac{1}{15}$

Le modèle est considéré comme parcimonieux en le comparant aux modèles complets multidirectionnels qui prennent en compte les gradients internes de teneur en eau et permettent de bien représenter les cinétiques de séchage à conditions d'air constantes. Leur complexité les rend difficilement intégrables dans un code de calcul visant à simuler le séchage d'une pile de bois complète sous des conditions d'air variant de manière continue.

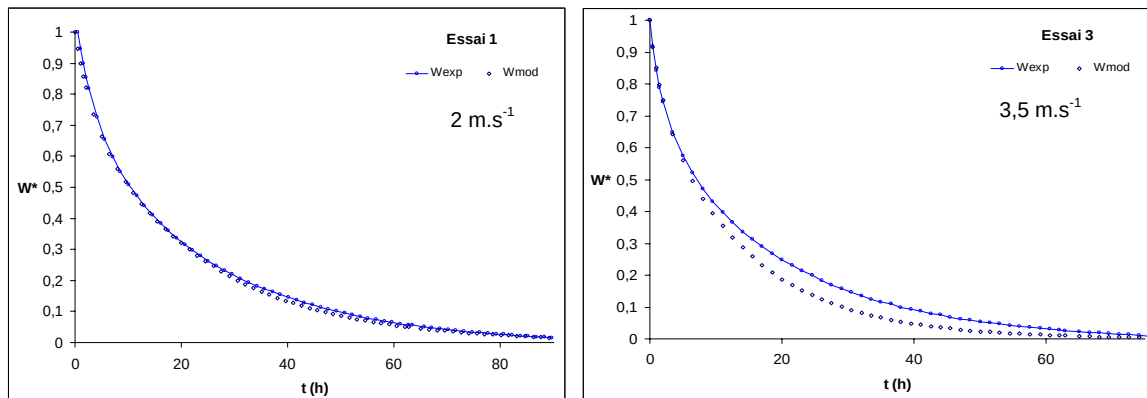
Le modèle de la CCS est représenté par peu de variables et de relations d'où sa forte parcimonie. Cette caractéristique le rend plus facilement intégrable dans un code de simulation d'une pile de bois.

#### 4.2.3.2 Evaluation de l'Exactitude

Pour la détermination de l'exactitude d'un modèle, il est nécessaire de s'appuyer sur un comportement de référence. Comme nous l'avons déjà expliqué, les résultats issus de l'exploitation d'un modèle peuvent être comparés avec des essais ou bien avec un modèle réputé exact. Pour ce cas, nous avons comparé les teneurs en eau calculées avec l'exploitation du modèle CCS au travers du modèle de l'unité de séchage avec les résultats des essais que nous avons réalisés dans la veine de séchage du TREFLE.

La modélisation de la cinétique de séchage à l'aide de la CCS fait apparaître un comportement moyen de la teneur en eau réduite du bois par rapport au temps. Le modèle

trouvé, a été construit à partir des valeurs moyennes des paramètres ( $b$ ,  $c$  et  $\left(\frac{dW}{dt}\right)_{\max}$ ). Lors de la comparaison, nous avons remarqué que le modèle moyenné n'est pas tout à fait exact pour tous les cas. Il est exact pour certaines conditions mais, il ne l'est pas pour d'autres. Nous montrons sur la figure (4.15), les différences retrouvées lors de la validation du modèle, de même, cette comparaison permet d'observer l'exactitude de notre modèle empirique.



**Figure 4.15. Variation de la teneur en eau réduite par rapport au temps, comparaison entre deux expériences et le modèle CCS.**

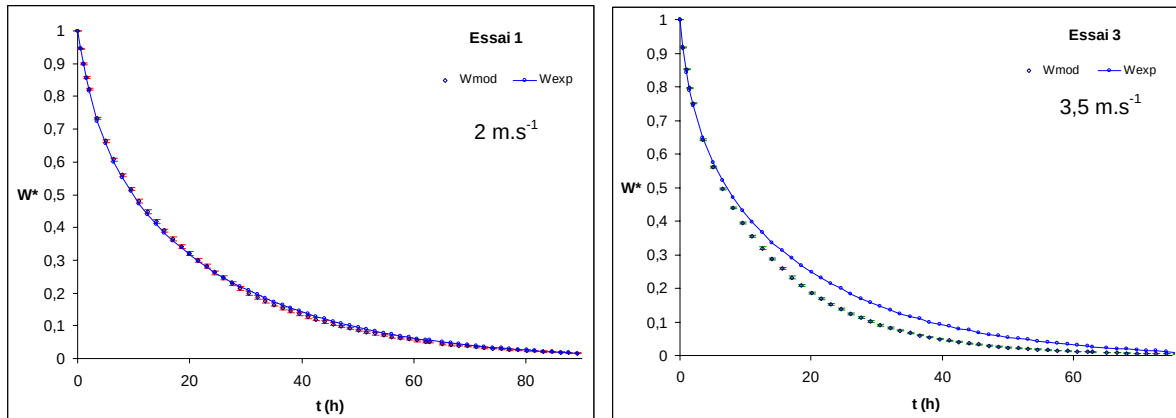
Les écarts mesurés entre le modèle et les expériences sont de l'ordre de 6% pour le premier cas (forte exactitude) et de 0 à 40% en fin du séchage (15 %) pour le deuxième (faible exactitude). Notons que le modèle est exact pour l'essai 1 car, la courbe simulée est très proche de la courbe référence. Néanmoins, pour l'essai 3, nous observons un écartement entre les deux courbes, ce qui veut dire que le modèle est moins exact pour ce cas. Ces différences observées sont dues à la qualité de la référence. Le manque de bois frais a obligé à stocker les pièces disponibles plongées dans l'eau. Ce fait a beaucoup modifié les caractéristiques du bois d'où les différences retrouvées lors des comparaisons.

La validation du modèle CCS avec les expériences de séchage permet d'identifier les écarts existants entre le modèle et le comportement de référence (essais). De manière générale, nous affirmons que le modèle est exact dans un domaine de validité de  $1,5 < U_a < 3 \text{ m.s}^{-1}$ .

#### 4.2.3.3 Evaluation de la Précision

Considérant une incertitude sur la vitesse de  $U_a \pm 0,1 \text{ m.s}^{-1}$  nous avons identifié l'intervalle de variation de la teneur en eau réduite,  $W^*$  en fonction du temps. Les résultats sont montrés sur la figure (4.16).





**Figure 4.16. Variation de la teneur en eau réduite en fonction du temps, identification des intervalles de variation de  $W^*$  en considérant une incertitude de  $U_a \pm 0,1 \text{ m.s}^{-1}$ .**

La validation du modèle CCS avec les résultats expérimentaux, permet d'identifier son degré de précision. La représentation de la cinétique de séchage par le biais de la CCS, fait apparaître des imprécisions au delà de  $U_a = 2 \text{ m.s}^{-1}$ . Nous exprimons la justification dans la suite :

Notons que la valeur de  $W^*$  est peu sensible à la variation de  $U_a$ . Lors de la variation de  $U_a \pm 0,1 \text{ m.s}^{-1}$ , on obtient un domaine d'imprécision réduit tel que le montre la figure 4.16. On constate ainsi, la forte précision du modèle représentant la cinétique de séchage du pin.

L'intervalle d'imprécision ( $U_a \pm 0,1 \text{ m.s}^{-1}$ ) sur la vitesse appliquée au modèle de la CCS permet de démontrer sa forte précision. Notons que le modèle est peu sensible aux variations de la vitesse de l'air, (intervalle de variation réduite).

#### 4.2.3.4 Evaluation du niveau de Spécialisation

Nous rappelons que la spécialisation d'un modèle dépend très fortement des hypothèses sous lesquelles on a démarré la modélisation ainsi que, du niveau systémique de l'OTé.

Comme nous l'avons déjà abordé, le modèle CCS est un modèle empirique. Pour sa détermination, nous avons établi sept conditions de  $T$ ,  $HR$  et  $U_a$  constantes dans des plages de valeurs bien définies. Ces plages vont donc, réduire le domaine d'application du modèle car, sont utilisation pour d'autres conditions de séchage différentes ne sera plus valide. Il s'agit donc, d'un modèle de séchage très spécialisé dans un domaine de valeurs très restreint de :  $2 < U_a < 3,5 \text{ m/s}$  ;  $30 < T_a < 50^\circ\text{C}$ . En ce qui concerne l'humidité relative, nous avons réalisé des expériences sur une plage de  $30 < HR_a < 50\%$ . Sachant que l'humidité relative peut atteindre les 100%, en séchage du bois ; il reste à compléter les expériences pour des valeurs de  $HR$  entre 50 et 100%.

Le modèle est très spécialisé car les conditions de séchage de  $T_a$ ,  $HR_a$  et  $U_a$  utilisées sont restreintes. Il restera à élargir ce domaine afin de rendre le modèle moins spécialisé.

#### 4.2.3.5 Conclusion sur le modèle de milieu extérieur « bois »

La qualification du modèle de la cinétique de séchage à partir de la courbe caractéristique, CCS a été réalisée à partir des paramètres du PEPS. Nous avons remarqué que, le fait d'utiliser un modèle écrit à partir des valeurs moyennes de  $b$ ,  $c$  et  $\left(\frac{dW}{dt}\right)_{\max}$  présente des soucis lors de sa qualification avec le PEPS. Nous pouvons finalement tirer les conclusions générales suivantes :

- le modèle montre une forte parcimonie par rapport au modèle diffusif, car il est plus simple d'utilisation,
- nous estimons une exactitude moyenne du modèle, étant plus précis pour certains cas et moins précis pour d'autres. Il faut signaler que les échantillons de bois utilisés ont été trempés dans de l'eau avant le séchage. Cela a sûrement modifié les caractéristiques des pièces, c'est pourquoi, le comportement de chaque échantillon a été différent.
- le niveau de précision du modèle dépende très fortement de la valeur moyenne de  $\left(\frac{dW}{dt}\right)_{\max}$ , étant très précis pour des vitesses de l'ordre de  $2 \text{ m.s}^{-1}$  et moins précis pour des valeurs plus importantes de la vitesse de l'air.
- le modèle est considéré comme très spécialisé à cause des plages réduites des paramètres  $T$ ,  $HR$  et  $U_a$ .
- Le PEPS du modèle évalué ci-dessus correspond au modèle de séchage d'une planche de bois. L'évaluation du modèle pile de bois n'a pas été réalisé à cause du manque de données expérimentales, ce modèle reste à évaluer.

La figure (4.17), résume le niveau atteint pour chacun des paramètres du PEPS :

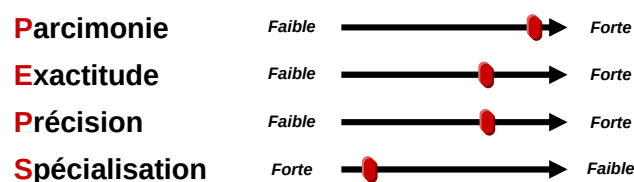


Figure 4.17. Représentation du PEPS du modèle, cinétique de séchage à partir de la CCS.

### 4.3 Modèle de l'Unité de Chauffage

L'analyse de l'état de l'art des capteurs solaires fait apparaître une série de modifications visant l'amélioration du rendement du système. Ces améliorations concernent l'utilisation de matériaux spéciaux, des arrangements des composants principaux ainsi que la réduction des déperditions thermiques. Le capteur étudié est issu du groupe I (chapitre 2).

#### 4.3.1 Etat de l'art de la modélisation

La représentation du fonctionnement d'un capteur solaire est décrite de différentes manières : d'une part, on parle des modèles détaillés lorsque l'on cherche à obtenir une précision élevée. Ces modèles sont écrits à l'aide d'équations différentielles. Après leurs discrétisation, ils sont résolus à l'aide de programmes numériques [Duf06]. Njomo, [Njo06] présente un modèle mathématique global qui permet l'analyse de 4 types de capteurs. Les bilans d'énergie de chaque composant sont écrits à partir d'équations différentielles ordinaires non linéaires de premier ordre, utilisées pour prédire le comportement thermique du capteur.

Nous trouvons d'autre part, des modèles de comportement généraux du capteur, écrits à partir d'équations algébriques non linéaires. Après linéarisation, les équations sont résolues par des méthodes itératives. Ong [Ong95] décrit le comportement d'un capteur par un jeu de 4 équations simultanées (une pour chaque composant). Il calcule les coefficients d'échange thermique ( $h$ ), puis, le système est résolu par inversion de matrice en considérant des valeurs de températures imposées comme des données d'entrée. Cette méthode impose une manipulation algébrique complexe. Néanmoins, Hegazy [Heg99], utilise l'écriture des équations classiques des bilans d'énergie pour chaque unité du capteur, il obtient un système de 4 équations à 4 inconnues ( $T_c$ ,  $T_p$ ,  $T_b$ ,  $T_{a-cap1}$ ). Les valeurs approximatives initiales sont imposées pour les 3 premières températures, puis, il résout le système par itération jusqu'à sa convergence. Ensuite, il calcule la valeur de  $T_{a-cap1}$  à l'aide de l'expression du flux utile ( $\phi_u = q_a C_p [T_{a-cap1} - T_{a-cap0}]$ ). Yadav [Yad95], analyse l'influence de divers paramètres sur la performance d'un capteur. Les expressions algébriques sont résolues pour une approche transitoire.

Duffie et al, [Duf06], proposent d'écrire le flux utile affecté par un coefficient  $F_R$  qui intègre la variation de la température  $T$  dans le capteur. Le flux utile gagné sur la surface totale  $A_{cap} = L l$  de l'absorbeur peut se calculer par :

$$\phi_u = A_{cap} F_R [\phi_s - hp(T_{a-cap0} - T_{ext})] \quad (4.45)$$

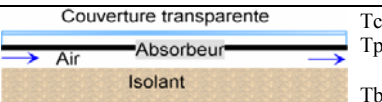
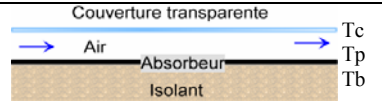
Le coefficient  $F_R$  appelé le facteur de conductance de l'absorbeur est obtenu par l'intégration des transferts au long du capteur.

Pour simplifier la modélisation, ils proposent de calculer le coefficient global de pertes  $h_p$  dans lequel sont considérés les transferts par convection, par conduction et par rayonnement. Le calcul du flux utile et de  $h_p$  va permettre l'estimation de la température à la sortie du capteur  $T_{a-cap1}$ , la température moyenne de la plaque absorbante  $T_{pm}$  et la température moyenne du fluide  $T_{am}$  par les relations :

$$T_{a-cap1} = T_{a-cap0} + \frac{\phi_u}{q_a C_p}, \quad \bar{T}_p = T_{a-cap0} + \frac{\phi_u / A_{cap}}{h_p F_R} (1 - F_R), \quad \bar{T}_a = T_{a-cap0} + \frac{\phi_u / A_{cap}}{h_p F_R} (1 - F'')$$

Kalogirou et Koyuncu [Kal04, Koy06], reprennent l'expression de l'efficacité affectée par  $F_R$  pour réaliser une comparaison de la performance de plusieurs capteurs solaires.

Tableau 4.6. Ecriture des modèles de comportement des capteurs solaires

| Référence          | Modèle mathématique (équations algébriques non linéaires)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Hypothèses                                                                                                                                                                                                           |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [Heg99]<br>[Cho95] |  <p>La Couverture transparente<br/> <math>\alpha_c I + (h_{p-c} + h_{rp-c})(T_p - T_c) = (h_{vent} + h_{rc-ciel})(T_c - T_{ext})</math></p> <p>L'absorbeur<br/> <math>\alpha_p I = (h_{p-c} + h_{rp-c})(T_p - T_c) + h(T_p - \bar{T}_a) + h_{rp-b}(T_p - T_b)</math></p> <p>L'air<br/> <math>h(T_p - \bar{T}_a) = h(\bar{T}_a - T_b) + 2GCp(\bar{T}_a - T_{a-cap0}) \left( \frac{L}{dx} \right)</math></p> <p>Avec : <math>G = \frac{q_a}{A_p}</math></p> <p>Le fond<br/> <math>h(\bar{T}_a - T_b) + h_{rp-b}(T_p - T_b) = h_p(T_b - T_\infty)</math></p>                                                                                                 | <p>Les transferts sont quasi constants et unidirectionnels.</p> <p>La variation de la température des composants est dans le sens de l'écoulement.</p> <p>Les composants du capteur sont à température uniforme.</p> |
| Référence          | Modèle mathématique (équations différentielles)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Hypothèses                                                                                                                                                                                                           |
| [Njo06]            |  <p>La Couverture transparente<br/> <math>M_c C_p \frac{dT_c}{dt} = \alpha_c I + h_{r \rightarrow p-c}(T_p - T_c) + h_{c \rightarrow c-ext}(T_{ext} - T_c) - (h_{c \rightarrow c-ext} + h_{r \rightarrow c-ext})(T_c - T_{ext})</math></p> <p>L'absorbeur<br/> <math>M_p C_p \frac{dT_p}{dt} = (\tau\alpha)I - (h_p + h_{r \rightarrow p-ext})(T_p - T_{ext}) - h_{c \rightarrow p-a}(T_p - T_a) - (h_{r \rightarrow p-c})(T_p - T_c)</math></p> <p>L'air<br/> <math>\rho_a e_a C_p \frac{\partial T_a}{\partial t} + \frac{q_a C_p}{l} \frac{\partial T_a}{\partial x} = h_{c \rightarrow p-a}(T_p - T_a) - h_{c \rightarrow c-a}(T_a - T_c)</math></p> | <p>La diffusion chaleur - fluide est négligeable.</p> <p>La vitesse de l'air uniforme dans le capteur.</p> <p>Les transferts se font dans le sens de l'écoulement.</p>                                               |

Actuellement, il existe des logiciels de simulation des capteurs solaires commerciaux, ils se basent sur l'écriture des bilans d'énergie des composants du capteur, on peut mentionner les produits suivants : TRNSYS, WATSUN, Polysun, F-Chart, etc., [Kal04]. Le tableau (4.6) résume l'écriture des modèles des capteurs les plus utilisés dans la littérature.

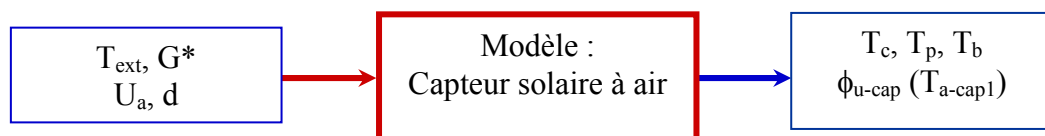
### 4.3.2 Modélisation de l'unité de chauffage : le capteur solaire

La modélisation du capteur solaire est basée sur les bilans de conservation de l'énergie de chacun de ses composants. Nous envisageons d'écrire une expression du flux de chaleur utile récupéré dans le capteur qui permettra le réchauffement de l'air dans la chambre de séchage.

**Les besoins :**

- *Un modèle parcimonieux qui représente de manière adéquate le fonctionnement d'un capteur solaire à air.*
- *Evaluer les variables de conception (VCo) du capteur ainsi que ses variables de pilotage (VPi).*
- *Identifier les paramètres pertinents permettant le couplage du modèle « capteur solaire » à un code global de séchage.*

L'écriture des bilans du capteur permettra l'identification d'un système simple d'équations en s'appuyant sur un terme connu tel que la température de l'air extérieur  $T_{\text{ext}}$  pour la linéarisation des équations. Le système est résolu par itération afin de connaître l'évolution de :  $T_p$ ,  $T_c$ ,  $T_b$  et  $T_{a\text{-cap1}}$  pour une journée donnée. Les variables entrées/sorties du modèle sont définies sur la figure 4.18.



**Figure 4.18. Entrées/sorties du modèle de l'unité de chauffage**

La figure 4.19 montre les échanges énergétiques qui ont lieu entre les différents composants du capteur solaire.

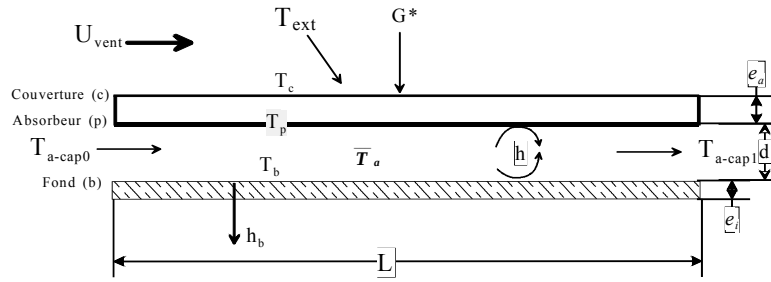


Figure 4.19. Echanges thermiques dans le Capteur solaire à air

### 4.3.3 Bilans globaux d'énergie : hypothèses

Pour l'écriture des bilans d'énergie, nous considérons les hypothèses suivantes :

- $T_p$ ,  $T_c$ ,  $T_b$  sont uniformes
- Les transferts de chaleur sont dans le sens perpendiculaire à l'écoulement.
- La température de l'air ne varie que dans le sens de l'écoulement.
- L'énergie absorbée par la couverture est négligeable.
- Le régime est stationnaire.

Nous présentons dans la suite les bilans d'énergie (radiatif, convectif et de conduction) pour chacun des composants du capteur solaire.

#### 4.3.3.1 Conservation de l'énergie pour la couverture transparente

$$\phi_{R \rightarrow c} = \phi_{\text{conv} \rightarrow c}$$

Bilan radiatif [Jan97] :

$$\begin{aligned} \phi_{R \rightarrow c} &= \phi_{s \rightarrow c} + \phi_{c \rightarrow c} + \phi_{\text{ciel} \rightarrow c} + \phi_{p \rightarrow c} - 2\alpha_{ci}\sigma T_c^4 \\ \phi_{R \rightarrow c} &= G\alpha_{cs} + G \frac{\alpha_{cs}\tau_{cs}(1-\alpha_{ps})}{1-\rho_{cs}(1-\alpha_{ps})} + \phi_{\text{ciel}}\alpha_{ci} + \phi_{\text{ciel}} \frac{\alpha_{ci}\tau_{ci}(1-\alpha_{pi})}{1-\rho_{ci}(1-\alpha_{pi})} + \alpha_{ci}\sigma T_c^4 \frac{\alpha_{ci}(1-\alpha_{pi})}{1-\rho_{ci}(1-\alpha_{pi})} \\ &\quad + \alpha_{pi}\sigma T_p^4 \frac{\alpha_{ci}}{1-\rho_{ci}(1-\alpha_{pi})} - 2\alpha_{ci}\sigma T_c^4 \end{aligned} \quad (4.46)$$

où  $\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann :  $\sigma = 5,6810^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

Bilan convectif

$$\phi_{\text{conv} \rightarrow c} = h_{p-c}(T_p - T_c) - h_{\text{vent}}(T_c - T_{\text{ext}}) \quad (4.47)$$

#### 4.3.3.2 Conservation de l'énergie pour l'Absorbeur

$$\phi_{R \rightarrow p} = \phi_{\text{conv} \rightarrow p}$$

Bilan radiatif [Jan97] :

$$\phi_{R \rightarrow p} = \phi_{s \rightarrow p} + \phi_{\text{ciel} \rightarrow p} + \phi_{c \rightarrow p} + \phi_{p \rightarrow p} + \phi_{b \rightarrow p} - \alpha_{pi}\sigma T_p^4$$

$$\begin{aligned} \phi_{R \rightarrow p} = & G \frac{\alpha_{ps} \tau_{cs}}{1 - \rho_{cs}(1 - \alpha_{ps})} + \phi_{ciel} \frac{\alpha_{ci} \tau_{ci}}{1 - \rho_{ci}(1 - \alpha_{pi})} + \alpha_{ci} \sigma T_c^4 \frac{\alpha_{pi}}{1 - \rho_{ci}(1 - \alpha_{pi})} \\ & + \alpha_{pi} \sigma T_p^4 \frac{\alpha_{ci} \rho_{ci}}{1 - \rho_{ci}(1 - \alpha_{pi})} - \sigma \frac{T_p^4 - T_b^4}{\frac{1}{\alpha_{pi}} + \frac{1}{\alpha_{bi}} - 1} - \alpha_{pi} \sigma T_p^4 \end{aligned} \quad (4.48)$$

#### Bilan convectif

$$\phi_{conv \rightarrow p} = h_{p-c} A_p (T_p - T_c) + \frac{h_i A_p}{2} (T_p - T_b) + \frac{q C p_a}{2} \left[ \frac{T_p + T_b}{2} - T_{a-cap0} \right] \left[ 1 - \exp\left(\frac{-2h_i A_p}{q C p_a}\right) \right] \quad (4.49)$$

$h_i = h_{p \rightarrow a} = h_{b \rightarrow a}$  : coefficient d'échange convectif entre l'absorbeur et l'air et entre le fond et l'air, calculés sur l'annexe 2.

#### 4.3.3.3 Conservation de l'énergie pour le fond du capteur

$$\phi_{R \rightarrow b} = \phi_{conv \rightarrow b-a} + \phi_{cond \rightarrow b-ext}$$

#### Bilan radiatif

$$\phi_{R \rightarrow b} = \phi_{R \rightarrow b} = \sigma \frac{T_p^4 - T_b^4}{\frac{1}{\alpha_{pi}} + \frac{1}{\alpha_{bi}} - 1} A_b \quad (4.50)$$

#### Bilan convectif

$$\phi_{conv \rightarrow b-a} = \frac{h_i A_b}{2} (T_b - T_p) + \frac{q C p_a}{2} \left[ \frac{T_p + T_b}{2} - T_{a-cap0} \right] \left[ 1 - \exp\left(\frac{-2h_i A_b}{q C p_a}\right) \right] \quad (4.51)$$

#### Bilan de transfert de chaleur par conduction

$$\phi_{cond, b-ext} = \frac{T_b - T_{ext}}{\frac{e_i}{\lambda_i A_b}} \quad (4.52)$$

#### 4.3.3.4 Conservation de l'énergie sur l'air

Hypothèse :  $T_p$  et  $T_b$  sont uniformes

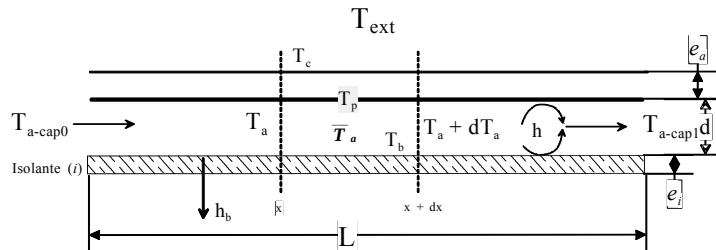


Figure 4.4.20. Volume de contrôle du capteur solaire

$$h_i (T_p + T_b - 2T_a) l dx = q C p_a dT \quad (4.53)$$

Où  $l$  est la largeur du capteur. En intégrant sur la surface du capteur nous avons :

$$T_{a-cap1} = \frac{T_p + T_b}{2} - \left( \frac{T_p + T_b}{2} - T_{a-cap0} \right) \exp\left( \frac{-2h_i A_{cap}}{qCp_a} \right) \quad (4.54)$$

La quantité de chaleur récupérée est donnée par la relation :

$$\phi_u = qCp_a (T_{a-cap1} - T_{a-cap0}) = qCp_a \left( \frac{T_p + T_b}{2} - T_{a-cap0} \right) \left[ 1 - \exp\left( \frac{-2h_i A_{cap}}{qCp_a} \right) \right] \quad (4.55)$$

L'écriture des bilans d'énergie pour chaque composant du capteur et, la linéarisation des équations à l'aide de la température extérieure  $T_{ext}$  (connue), permettent de calculer les coefficients d'échange thermique par convection, conduction et rayonnement ([annexe 2](#)). Ainsi, nous aboutissons à un système de trois équations à trois inconnues de la forme :

$$\begin{aligned} (h_8+h_9+h_{11}-h_{12})(T_p-T_{ext}) + (h_{10}-h_{14})(T_b-T_{ext}) + (h_6+h_7)(T_c-T_{ext}) &= B_2 \quad \text{L'absorbeur} \\ (-h_6-h_2)(T_p-T_{ext}) + 0 + (h_4 + h_6-h_1-h_3)(T_c-T_{ext}) &= B_1 \quad \text{La couverture} \\ (h_{15}-h_{18})(T_p-T_{ext}) + (-h_{16}-h_{17}-h_5)(T_b-T_{ext}) + 0 &= B_3 \quad \text{Le fond} \end{aligned}$$

En résolvant le système, nous pouvons calculer l'évolution de  $T_p$ ,  $T_c$  et  $T_b$ , ainsi nous aurons le flux de chaleur fourni par le capteur à la chambre de séchage. La valeur de  $T_{a-cap1}$  a été estimée d'après l'écriture du flux utile,  $\phi_u$  récupéré depuis le capteur ([relation, 4.54](#)) :

#### 4.3.4 Notion d'efficacité

La modélisation présentée ci-dessus permet la simulation du fonctionnement d'un capteur solaire à air. A partir de cette simulation, nous cherchons un modèle parcimonieux de l'efficacité du capteur, qui puisse s'intégrer facilement dans le code de simulation de séchage.

L'efficacité est un paramètre qui permet de caractériser la performance d'un capteur solaire. Elle dépend principalement des conditions de fonctionnement et des conditions extérieures. En considérant ce qui a été énoncé ci-dessus, nous avons décidé d'utiliser l'efficacité du capteur  $\varepsilon$ , comme le paramètre pertinent de couplage avec le code global de séchage.

Duffie [[Duf06](#)], considèrent que l'efficacité est une mesure de la performance d'un capteur définie comme le rapport entre l'énergie gagnée et l'énergie solaire incidente pour une même période de temps. Cette efficacité moyenne est calculé par :

$$\varepsilon = \frac{\int \phi_u dt}{A_{cap} \int G^* dt} \quad (4.56)$$



En partant du bilan énergétique global du capteur solaire, nous définirons l'efficacité instantanée comme le rapport entre la puissance récupérée par le capteur et le flux solaire incident, soit :

$$\varepsilon = \frac{\phi_s - \phi_p - \phi_{\rho}}{\phi_s} = \frac{\phi_u}{G^* A_{\text{cap}}} \quad (4.57)$$

#### 4.3.4.1 Expression de l'efficacité selon la température de l'absorbeur

Considérons un capteur solaire composé par une vitre (couverture transparente, c) une plaque métallique (l'absorbeur, p), une conduite du passage de l'air et un fond isolé comme le définit la figure (4.21). Nous allons nous placer au niveau de l'absorbeur pour évaluer les transferts à l'intérieur ainsi que vers l'extérieur du capteur.

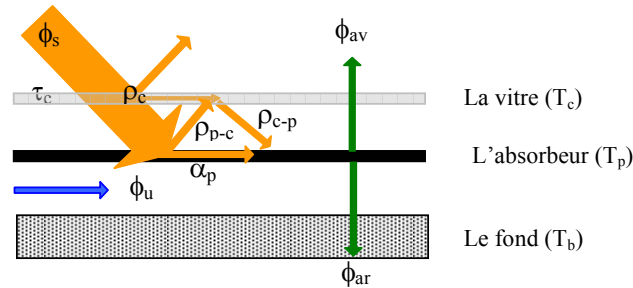


Figure 4.21. Bilan optique du capteur

Le flux solaire net récupéré par l'absorbeur peut s'exprimer sous la forme :

$$\phi_s - \phi_{\rho} = \tau_c \alpha_p G^* A_{\text{cap}} \quad (4.58)$$

$\tau_c$  et  $\alpha_p$  sont respectivement le coefficient de transmission de la couverture transparente et l'absorptivité de l'absorbeur. Le produit  $\tau_c \alpha_p$  est une mesure de l'énergie absorbée par l'absorbeur. Dans la suite, on néglige l'énergie absorbée par la vitre devant l'énergie transmise.

C'est-à-dire que tout rayonnement qui tombe sur la couverture transparente est : soit absorbé ( $\alpha_c$ ), transmis ( $\tau_c$ ) ou réfléchi ( $\rho_c$ ). Néanmoins, pour le rayonnement solaire de courte longueur d'onde,  $\alpha_c$  est faible alors, elle peut être négligée, [Ber04].

Les pertes s'écrivent alors :

$$\phi_p = h_p A_{\text{cap}} (T_p - T_{\text{ext}}) \quad (4.59)$$

$\phi_p$  : puissance totale perdue

Les pertes thermiques à l'avant (av) et à l'arrière (ar) schématisées sur la figure (4.21), sont considérées les plus importantes dans un capteur solaire. On prend en compte les échanges convectifs et rayonnants ainsi que de conduction (au niveau de l'isolant). Les déperditions thermiques vers les côtés sont négligées car elles sont très petites devant les autres. L'expression du bilan de pertes en partant de l'absorbeur s'écrit alors :

$$\phi_p = \phi_{av} + \phi_{ar} \quad (4.60)$$

Où :

$\phi_{av}$  : puissance perdue à l'avant

$\phi_{ar}$  : puissance perdue à l'arrière

Avec :

$$\frac{\phi_{av}}{A_{cap}} = hp_{av}(T_p - T_{ext}) \text{ et } \frac{\phi_{ar}}{A_{cap}} = hp_{ar}(T_p - T_{ext})$$

Où :

$hp_{av}$  : coefficient de pertes thermiques à l'avant

$hp_{ar}$  : coefficient de pertes thermiques à l'arrière

Les pertes thermiques totales s'écrivent sous la forme :

$$\frac{\phi_p}{A_{cap}} = hp(T_p - T_{ext}) \quad (4.61)$$

avec :

$$hp = \frac{1}{\frac{1}{h_{c,p-c} + h_{R,p-c}} + \frac{1}{h_{vent} + h_{R,c-ext}}} + \frac{1}{\frac{1}{h_{c,p-b} + h_{R,p-b}} + \frac{e_l}{\lambda_l} + \frac{1}{h_{vent}}} \quad (4.62)$$

L'expression de l'efficacité instantanée peut maintenant s'exprimer sous la forme :

$$\varepsilon = (\tau_c \alpha_p) - hp \frac{(T_p - T_{ext})}{G^*} \quad (4.63)$$

Dans l'expression précédente, on considère que les valeurs de  $hp$  et de  $\tau_c \alpha_p$  sont indépendantes de la surface du capteur et que les températures  $T_p$  et  $T_{ext}$  sont uniformes.

Si  $hp$  et  $\tau_c \alpha_p$  sont constants et indépendants de la surface du capteur, l'efficacité instantanée définie par l'équation (4.57), peut aussi s'exprimer par la relation (4.64), [Jan03].

$$\varepsilon = B - K T^* \quad \text{où :} \quad (4.64)$$

$$T^* = \frac{(T_p - T_{\text{ext}})}{G^*}$$

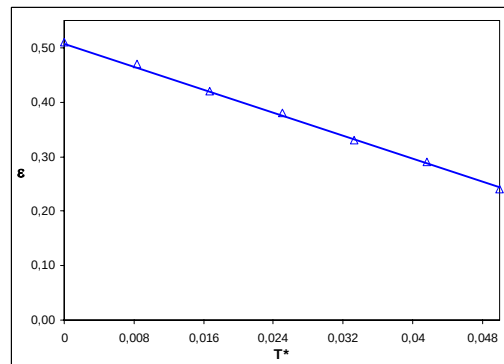
$$B = \tau_c \alpha_p \text{ et } K = h_p$$

Dans la norme française NF P50-501, les grandeurs B et K sont appelées :

B : le facteur optique du capteur,

K: la conductance thermique totale des pertes.

Lorsque le capteur est supposé en régime permanent et la couverture transparente et l'absorbeur isothermes, le facteur optique  $B=\tau_c \alpha_p$  et K ( $K=h_p$ ) sont constants ; on retrouve effectivement la droite de l'efficacité instantanée (figure 4.22), [Ber04].



**Figure 4.22. Droite de l'efficacité d'un capteur solaire**

Nous avons pris comme variable pertinente la température de l'absorbeur  $T_p$  pour le calcul de l'efficacité. Néanmoins, on ne connaît pas sa valeur car  $T_p$  n'est qu'une variable auxiliaire du modèle recherché.

Il faut signaler que d'après la norme [NF P50-501], le modèle de l'efficacité (4.20) considère la température moyenne de l'air  $(T_{a\text{-cap1}} - T_{a\text{-cap0}})/2$  pour le calcul de  $T^*$ . Ce modèle est repris et adapté selon la variable d'entrée disponible. On traite cette approche dans la suite.

#### 4.3.4.2 Expression de l'efficacité selon la température d'entrée du fluide caloporteur

Dans la réalité, les transferts convectifs et rayonnants se font à la température réelle du fluide, donc :  $T_p$  et  $T_{a\text{-cap}}$  varient dans le capteur.  $T_{a\text{-cap}}$  est la variable pertinente pour exprimer l'état de l'air mais, cette donnée d'entrée ne prend pas en compte l'évolution de T dans le capteur.

Duffie [Duf06], ont proposé de pondérer l'écriture du flux utile par un coefficient  $F_R$  qui intègre cette variation. L'écart de température utilisé est alors :  $T_{a\text{-cap0}} - T_{\text{ext}}$ .

Le flux utile gagné sur la surface totale  $A_{\text{cap}} = L /$  de l'absorbeur peut se calculer par :

$$\phi_u = A_{\text{cap}} F_R [\phi_s - hp(T_{\text{a-cap0}} - T_{\text{ext}})] \quad (4.65)$$

Le coefficient  $F_R$  appelé le facteur de conductance de l'absorbeur est obtenu par l'intégration des transferts au long du capteur et s'exprime par :

$$F_R = \frac{q_{\text{cap}} C_p}{A_{\text{cap}} hp} \left[ 1 - \exp\left( \frac{A_{\text{cap}} hp F'}{q_{\text{cap}} C_p} \right) \right] \quad (4.66)$$

Il fait intervenir un facteur d'efficacité de la plaque absorbante  $F'$ , rapport entre la résistance thermique au transfert entre la plaque et l'extérieur et la résistance thermique au transfert entre le fluide et l'extérieur. Ce facteur dépend du type de capteur utilisé, sa valeur est inférieure ou égale à l'unité. Pour le type de capteur étudié,  $F'$  est calculé d'après l'expression :

$$F' = \frac{1}{1 + \frac{hp}{\frac{1}{h_i + \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_{R,p \rightarrow b}}}}}} \quad (4.67)$$

L'efficacité instantanée s'écrit alors :

$$\varepsilon = F_R \left[ (\tau_c \alpha_p) - hp \frac{(T_{\text{a-cap0}} - T_{\text{ext}})}{G^*} \right] \quad (4.68)$$

Si  $\tau_c \alpha_p$  et  $hp$  ne varient pas, alors,  $F_R(\tau_c \alpha_p)$  et  $F_R hp$  sont deux paramètres qui décrivent correctement le fonctionnement d'un capteur.

La représentation de l'efficacité en fonction de  $\frac{(T_{\text{a-cap0}} - T_{\text{ext}})}{G^*}$  est décrite par la droite de pente négative  $F_R hp$  et d'ordonnée à l'origine  $F_R(\tau_c \alpha_p)$  représentée sur la figure (4.23a).

Toujours en considérant l'expression de l'efficacité instantanée (rel. 4.63), Bernard [Ber04] a retrouvé la droite de l'efficacité vue précédemment. Néanmoins, dans la réalité  $\tau_c \alpha_p$  et  $h_p$  varient avec la température de fonctionnement du capteur ainsi qu'avec les conditions climatiques. Il existe donc une déviation de la courbe réelle par rapport à la droite théorique (figure 4.23b).

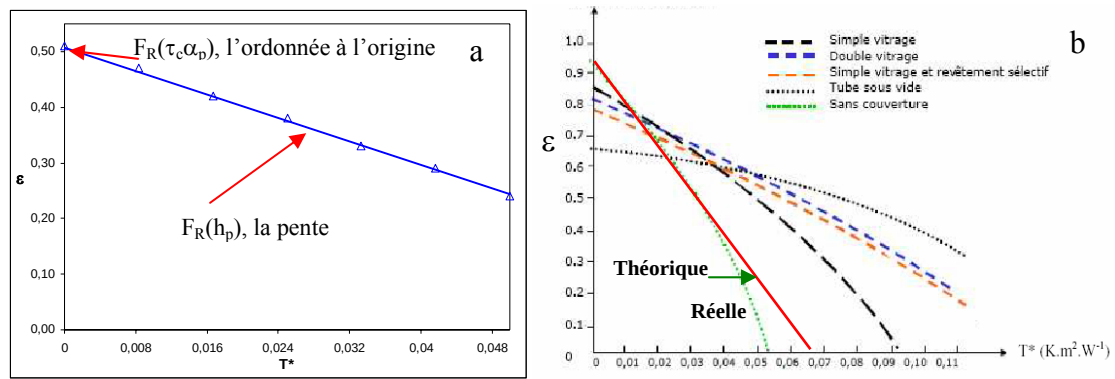


Figure 4.23. Efficacité instantanée d'un capteur solaire en fonction de  $T^* = \frac{T_{a-cap0} - T_{ext}}{G^*}$  [Ade02]

#### 4.3.4.3 Critique

L'expression de l'efficacité  $\epsilon$  (rel. 4.68) fait intervenir le fonctionnement propre du capteur à travers le facteur  $F_R$ . Dans ce facteur, on prend en compte de manière intrinsèque l'évolution des températures du fluide ( $T_a$ ), de l'absorbeur ( $T_p$ ) mais aussi l'évolution des transferts entre absorbeur et fluide ( $F'$ ).

En conception préliminaire, il est important de réduire les variables intervenant dans l'expression de l'efficacité aux seules variables de conception et de pilotage. La variable auxiliaire utilisée étant  $T^*$ .

Dans le paragraphe suivant, on se propose d'exprimer l'efficacité à partir des résultats obtenus par un plan d'expériences numériques en utilisant le code de simulation écrit.

### 4.3.5 Modèle parcimonieux de l'unité de chauffage

#### 4.3.5.1 Variables pertinentes

Nous possédons un code de dimensionnement du capteur utilisant les équations du modèle présenté au paragraphe 4.3. Ce code est relativement lourd à mettre en œuvre dans le cas de données météorologiques et de condition d'entrée d'air variant de manière continue sur une longue période. C'est pourquoi nous avons procédé à une réduction de ce modèle en cherchant une expression de l'efficacité en fonction des variables de conception (VCo) :  $L$  et  $l$ , et de la variable de pilotage (VPi) : le taux de mélange dans le séchoir  $\tau_m$ .

Les variables pertinentes de l'évolution de l'efficacité sont :

- $L$  car la température du fluide évolue selon  $L$ ,  $L$  est donc pertinente par rapport à la température moyenne.

- $U_a$  car la vitesse est une variable qui permet l'analyse du comportement de l'air dans le capteur en termes de mécanique des fluides (Reynolds,  $Re$ ). Les transferts internes entre l'absorbeur et le fluide caloporteur varient aussi selon  $U_a$ .

La variable auxiliaire  $U_a$  est directement liée à la variable de conception  $l$  et à la variable de pilotage  $\tau_m$ , soit :

$$U_a = \frac{\tau_m q_{pb}}{d l} \text{ où :}$$

$q_{pb}$  : débit d'air dans la chambre de séchage

$l$  : largeur du capteur

$d$  : hauteur de passage de l'air (distance entre l'absorbeur et le fond, paramètre fixé)

L'équation recherchée sera de la forme :

$$\varepsilon = (B_o - K_o T^*) f(L, U_a) \text{ avec :} \quad (4.69)$$

$$B(L, U_a) = B_o f(L, U_a) \quad (4.70)$$

$$K(L, U_a) = K_o f(L, U_a) \quad (4.71)$$

avec :  $B_o = \tau_c \alpha_p$  et  $K_o = hp$

où :  $B_o$  et  $K_o$  sont des valeurs constantes pour un capteur préalablement dimensionné.

Alors ;

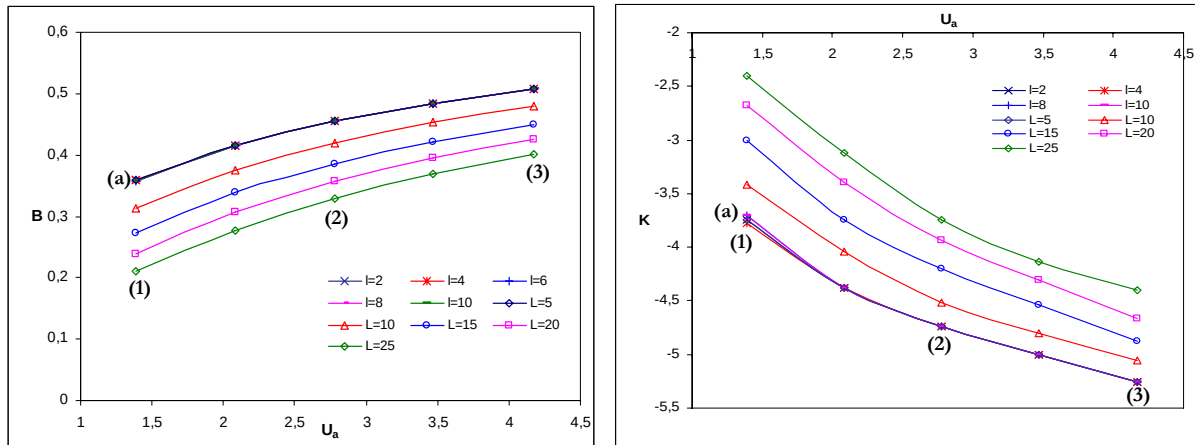
$$\varepsilon = B(L, U_a) - K(L, U_a) T^* \quad (4.72)$$

Les résultats des simulations, (figure 4.24) ont permis de réaliser un paramétrage sur les valeurs de  $B$  et  $K$  en fonction des variables pertinentes  $L$  et  $U_a$  dont la plage de variation est :

$$5 < L < 25 \text{ m ; } 2 < l < 10 \text{ m et } 1,39 < U_a < 4,17 \text{ m/s}$$

Pour le calcul de  $T^*$  ( $T^* = \frac{T_{a\text{-cap}0} - T_{\text{ext}}}{G^*}$ ), nous avons fixé la température  $T_{\text{ext}}$  à 30 °C et

nous avons fait varier la température  $T_{a\text{-cap}0}$  en fonction des températures atteintes à l'entrée du capteur ( $20 < T_{a\text{-cap}0} < 60^\circ \text{C}$ ). La valeur de  $G^*$  est constante et fixée à 600 W.m<sup>-2</sup>.



**Figure 4.24** Variation des paramètres B et K en fonction des dimensions L et l ainsi que de la vitesse de l'air  $U_a$  dans le capteur

On vérifie que pour différentes valeurs de  $l$ , le comportement des paramètres B et K ne varie pas en fonction de la vitesse et on observe que toutes les courbes se superposent. Par contre, pour le cas de L variable, les courbes présentent, comme il était prévisible, un décalage selon la valeur de L et  $U_a$ .

#### 4.3.5.2 Premier dépouillement

Nous recherchons une proportionnalité à une fonction de  $U_a$  (prise en compte du coefficient d'échange) et à une fonction de  $U_a$  et L (pertinente de l'évolution de la température dans le capteur et donc de la température moyenne de l'air) comme exprimé par la relation (4.69).

Nous avons utilisé ces données numériques pour calculer l'efficacité du capteur en dépouillant la valeur de  $B_o = \tau_c \alpha_p$  et  $K_o = hp$  pour L et  $U_a$ . La valeur de  $\tau_c \alpha_p$  est constante et fixée à 0,81 en accord avec les propriétés optiques de la couverture transparente et de l'absorbeur. A partir du dépouillement numérique, nous avons calculé la plage de variation pour hp ( $8,17 < hp < 8,52$ ) avec une moyenne de  $8,34 \text{ W m}^{-2} \text{ C}^{-1}$ . Un calcul de hp instantané selon la relation (4.62), offre une plage de variation plus grande ( $6,9$  et  $10,5 \text{ W m}^{-2} \text{ C}^{-1}$ ), ayant une valeur moyenne de  $8,7 \text{ W m}^{-2} \text{ C}^{-1}$ .

Nous avons alors déterminé les expressions suivantes pour B et K :

$$B(L, U_a) = 0,81(0,1665 \ln U_a + 0,3905) [(0,0037 U_a - 0,0254)L + 1,1036 - 0,0134 U_a] \quad (4.73)$$

$$K(L, U_a) = 8,34(0,1632 \ln U_a + 0,3991) [(0,0037 U_a - 0,0254)L + 1,1036 - 0,0134 U_a] \quad (4.74)$$

On prend des valeurs moyennes pour les coefficients affectés par  $\tau_c \alpha_p = 0,81$  et  $h_p = 8,34$  et on obtient le modèle parcimonieux permettant de calculer l'efficacité instantanée du capteur en fonction de la vitesse de l'air  $U_a$  et de sa longueur  $L$ .

$$\varepsilon = [0,81 - 8,34 T^*] [0,1649 \ln U_a + 0,3948] [(0,0037 U_a - 0,0254)L + 1,1036 - 0,0134 U_a] \quad (4.75)$$

Avec :

$T^* = \frac{T_{a-cap0} - T_{ext}}{G^*}$  ;  $T^*$  calculée à partir des données d'entrée du modèle et des conditions météorologiques.

#### 4.3.5.3 Second dépouillement

A partir du même dépouillement de B et K, nous n'avons pas forcé la proportionnalité des paramètres B et K afin d'améliorer l'exactitude, nous obtenons :

$$B = (0,1349 \ln U_a + 0,3163) [(0,0037 U_a - 0,0254)L + 1,1036 - 0,0134 U_a] \quad (4.76)$$

$$K = (1,3613 \ln U_a + 3,3291) [(0,0037 U_a - 0,0226)L + 1,1086 - 0,0165 U_a] \quad (4.77)$$

L'efficacité du capteur est alors définie par :

$$\varepsilon = \frac{[(0,1349 \ln U_a + 0,3163) - (1,3613 \ln U_a + 3,3291)T^*]}{[(0,0037 U_a - 0,0254)L + 1,1036 - 0,0134 U_a]} \quad (4.78)$$

#### 4.3.6 Qualification du modèle « Capteur Solaire »

Dans la suite, nous qualifions la précision du modèle de référence (code, modèle du capteur) ainsi que, le cas 2 des modèles parcimonieux (4.78) à l'aide des paramètres du PEPS [Ver04].

##### 4.3.6.1 Evaluation de la Parcimonie

Le modèle de l'efficacité prend en compte toutes les variables et relations du fonctionnement du capteur. On considère les différents transferts entre l'absorbeur, le fluide et l'extérieur ainsi que, les variables de conception et de pilotage du capteur. Le modèle est issu du niveau 2 de l'OTé et est représenté par :

- 9 variables et,
- 2 relations ( $\varepsilon = \dots$  et  $T^* = \dots$ )



Tableau 4.7. Identification des variables de conception de l'unité de chauffage (Capteur solaire à air)

| Fonction                                           | Flux                                     | VCo                      | VA                                                                                                       | VPi                  |
|----------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Transformer l'énergie solaire en énergie thermique | Energie solaire<br><br>Energie thermique | <b>L</b><br><br><i>l</i> | <b>U<sub>a</sub></b><br><b>ε</b><br><b>T<sub>ext</sub>, T<sub>a-cap0</sub></b><br><b>T*</b><br><b>G*</b> | <b>τ<sub>m</sub></b> |

La parcimonie est donc de  $\frac{1}{11}$

Par comparaison au modèle classique, notre modèle est construit avec deux relations et avec peu des variables. On parle donc, d'un modèle très parcimonieux.

#### 4.3.6.2 Evaluation de l'Exactitude

Prenant comme référence la simulation d'un capteur solaire avec le modèle classique, nous avons comparé les résultats de l'efficacité du même type de capteur en utilisant le modèle parcimonieux établi précédemment (4.78). Nous considérons une incertitude de  $\pm 0,1 \text{ m.s}^{-1}$  sur la vitesse de l'air  $U_a$ , pour qualifier la précision de la référence et, pour évaluer les comportements de l'efficacité des deux modèles. Sur la figure (4.25), nous présentons l'évolution de l'efficacité en fonction de  $T^*$ , lorsque l'on fait varier la vitesse de l'air entre  $2,78 \pm 0,1 \text{ m.s}^{-1}$ , tenant en compte l'incertitude absolue sur les valeurs obtenues.

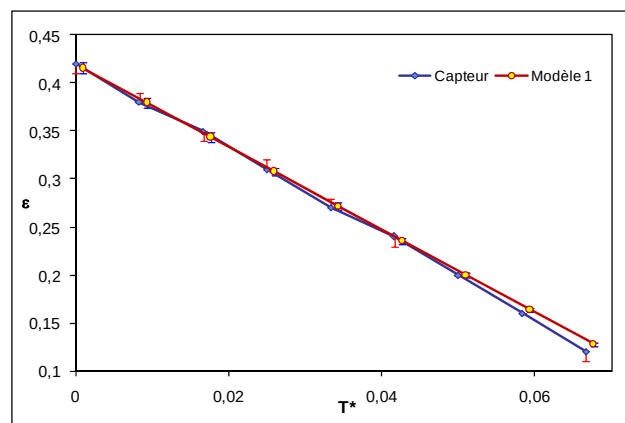


Figure 4.25. Représentation de l'exactitude du modèle « capteur solaire à air » ( $U_a = 2,78 \pm 0,1 \text{ m.s}^{-1}$ )

L'influence de  $U_a$  sur le comportement de l'efficacité du capteur permet de réaliser l'analyse suivante :

Nous constatons un comportement très proche entre les deux séries de points du modèle parcimonieux et le modèle classique. Les écarts calculés sont de l'ordre de moins du 3%, on conclut donc que le modèle présente une forte exactitude. Les écarts calculés pour le modèle parcimonieux, évalués pour  $U_a = 2,78 \pm 0,1 \text{ m.s}^{-1}$  sont présentés dans le tableau 4.8.

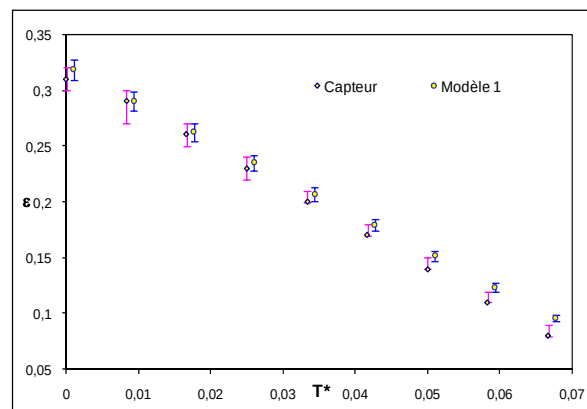
Tableau 4.8. Valeurs de l'efficacité du capteur calculées avec le modèle parcimonieux pour,  $U_a = 2,78 \pm 0,1 \text{ m.s}^{-1}$ .

| $\epsilon_{\text{mod}}$ | $\epsilon_{\text{mod}} (+)$ | $\epsilon_{\text{mod}} (-)$ | $\Delta\epsilon (+)$ | $\Delta\epsilon (-)$ | Ecart + (%) | Ecart - (%) |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|-------------|-------------|
| 0,42                    | 0,43                        | 0,41                        | 0,0113               | 0,0117               | 2,70        | 2,78        |
| 0,38                    | 0,39                        | 0,37                        | 0,0104               | 0,0107               | 2,70        | 2,78        |
| 0,35                    | 0,36                        | 0,34                        | 0,0094               | 0,0097               | 2,70        | 2,78        |
| 0,31                    | 0,32                        | 0,30                        | 0,0084               | 0,0087               | 2,70        | 2,78        |
| 0,28                    | 0,28                        | 0,27                        | 0,0074               | 0,0077               | 2,70        | 2,78        |
| 0,24                    | 0,25                        | 0,23                        | 0,0065               | 0,0067               | 2,70        | 2,78        |
| 0,20                    | 0,21                        | 0,20                        | 0,0055               | 0,0057               | 2,70        | 2,78        |
| 0,17                    | 0,17                        | 0,16                        | 0,0045               | 0,0047               | 2,70        | 2,78        |
| 0,13                    | 0,14                        | 0,13                        | 0,0036               | 0,0037               | 2,70        | 2,78        |

L'évaluation de ce modèle pour une plage de vitesses de l'air de  $1,39 < U_a < 4,17 \text{ m.s}^{-1}$  montre que pour des valeurs faibles de  $U_a$ , le modèle tends à être moins exact. Par contre, pour des valeurs de  $U_a$  plus importantes, le modèle présente des écarts de l'ordre de moins de 2% ce qui prouve son exactitude.

#### 4.3.6.3 Evaluation de la Précision

En considérant la définition de la précision, nous avons identifié comme variable source d'imprécision la vitesse de l'air. L'analyse réalisée ci-dessus, permet d'identifier l'intervalle de variation de l'efficacité pour chacun des modèles lors de la variation de la vitesse de l'air. Sur la figure (4.26), nous représentons la variation de l'efficacité en fonction de  $T^*$  pour une faible vitesse de l'air. Cela montre plus clairement la taille de l'intervalle de variation de  $\epsilon$ .

Figure 4.26. Représentation de l'efficacité du capteur solaire à air, ( $U_a = 1,39 \pm 0,1 \text{ m.s}^{-1}$ )

Notons que l'intervalle des valeurs possibles pour l'efficacité est moins important dans le cas du modèle parcimonieux. En revanche, pour le modèle classique, la plage de variation de  $\epsilon$  est plus importante, ce qui veut dire que, ce modèle est plus sensible aux variations de  $U_a$ . Par conséquent, nous affirmons que le modèle parcimonieux est plus précis que le modèle

classique. Un autre constat que l'on peut en déduire est la diminution de l'exactitude du modèle parcimonieux lorsqu'il est traité pour des vitesses faibles.

Nous pouvons finalement conclure que nous nous trouvons devant un modèle considéré comme exact et précis.

#### **4.3.6.4 Evaluation du niveau de Spécialisation**

Comme nous l'avons déjà énoncé, la spécialisation d'un modèle dépend de son niveau systémique ainsi que des hypothèses sur lesquelles il est basé. Le modèle analysé ici est issu du niveau 2 de modélisation, (niveau systémique de l'organigramme technique).

Nous avons constaté que pour les deux modèles, les paramètres pertinents de l'évolution de l'efficacité sont :

- la longueur du capteur,  $L$ , car la température du fluide évolue selon  $L$  et non selon  $l$  (largeur de capteur)
- la vitesse de l'air,  $U_a$  car la vitesse est une variable qui permet l'analyse du comportement de l'air dans le capteur en termes de mécanique des fluides (Reynolds,  $Re$ ). Les transferts internes entre l'absorbeur et le fluide caloporteur varient aussi selon cette grandeur.

Dans le modèle classique, nous observons que le coefficient de transfert  $h_p$  (K) est une fonction de la surface du capteur  $A_{cap}$  ( $L \times l$ ) et de la vitesse de l'air, ( $U_a$ ). De même, pour le cas du modèle parcimonieux, nous avons exprimé l'efficacité du capteur en fonction de la longueur du capteur  $L$  et de la vitesse de l'air  $U_a$ . Nous retrouvons donc, les mêmes paramètres pertinents dans les deux modèles, néanmoins, le paramètre hauteur du passage d'air «  $d$  » n'a pas été évalué, on a imposé une valeur fixe. D'après cette analyse, nous pouvons finalement dire que, la représentation de l'efficacité du capteur avec le modèle entraîne l'utilisation d'un modèle moyennement spécialisé.

#### **4.3.6.5 Conclusion**

Nous avons qualifié le modèle utilisé pour décrire le comportement du capteur solaire à air à partir des quatre paramètres représentatifs du PEPS. Nous avons abouti à un modèle très parcimonieux, exact par rapport au modèle classique, très précis, surtout pour des valeurs importants de la vitesse de l'air et, moyennement spécialisé car la variable «  $d$  » n'est valide que pour notre cas particulier. L'évaluation de ces paramètres est résumée sur la figure (4.27).

Domaine de validité :  $5 < L < 25$  m et  $1,39 < U_a < 4,17$  m.s<sup>-1</sup>

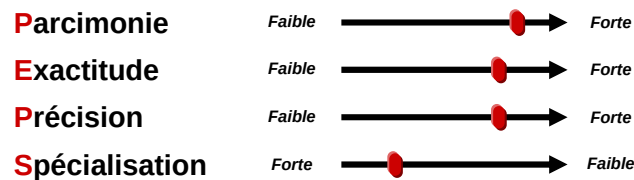


Figure 4.27. Représentation du PEPS du modèle physique du capteur solaire à air [Ver04].

#### 4.3.6.6 Choix du modèle

Après avoir analysé et qualifié deux modèles de comportement d'un capteur solaire, nous possédons les arguments pour réaliser le choix du modèle à intégrer dans le programme global de séchage.

Le modèle parcimonieux (rel. 4.78) présente des caractéristiques acceptables concernant les paramètres du PEPS. Il s'agit donc d'un modèle parcimonieux, exact, très précis et moyennement spécialisé.

Le paramètre pertinent de couplage est donc l'efficacité du capteur représenté avec la relation (4.78).

### 4.4 Modélisation de l'Unité de Stockage d'énergie

Le nouveau concept du système « séchoir solaire », propose l'intégration d'une unité de stockage d'énergie par chaleur sensible. L'unité utilise de l'eau comme fluide de stockage et de l'air comme fluide de déstockage.

L'unité de stockage d'énergie comporte deux composants : l'échangeur-stockeur et l'unité de chauffage. L'unité de chauffage de l'eau comporte un capteur solaire à eau dont la modélisation fait appel à la même logique que pour le capteur solaire à air.

#### 4.4.1 Description de l'Unité de Stockage d'énergie

Les besoins :

Trouver un modèle qui décrive le fonctionnement d'un échangeur-stockeur en situation de vie stockage et déstockage.

##### 4.4.1.1 Description du capteur solaire à eau

Lors du fonctionnement SdV jour, le capteur solaire à eau capte l'énergie solaire, puis, il la transmet à un fluide caloporteur (l'eau), finalement cette énergie va directement à l'échangeur-stockeur, (figure 4.28).

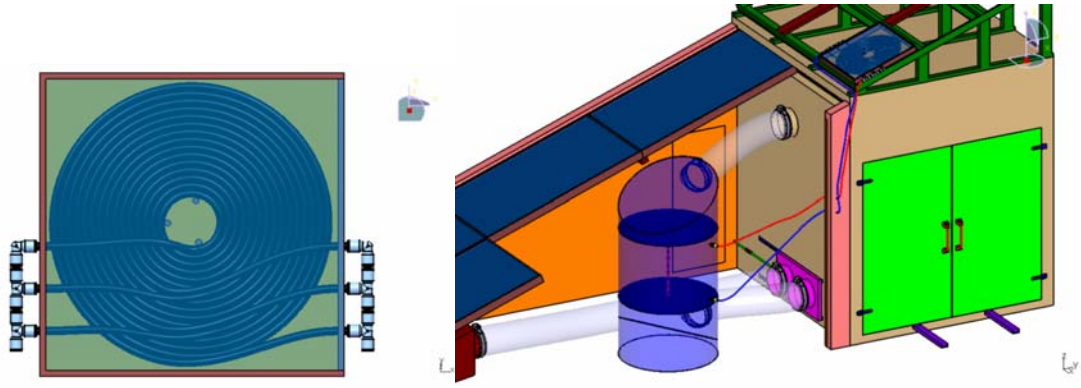


Figure 4.28. Schéma du capteur solaire à eau et son branchement à l'unité de stockage

#### 4.4.1.2 Description du stockeur-échangeur

Le stockeur est un ballon traversé par des tubes poinçonnés (dimpled tubes) pour augmenter les coefficients d'échange sur l'air pour le déstockage comme le montre la figure 4.29.

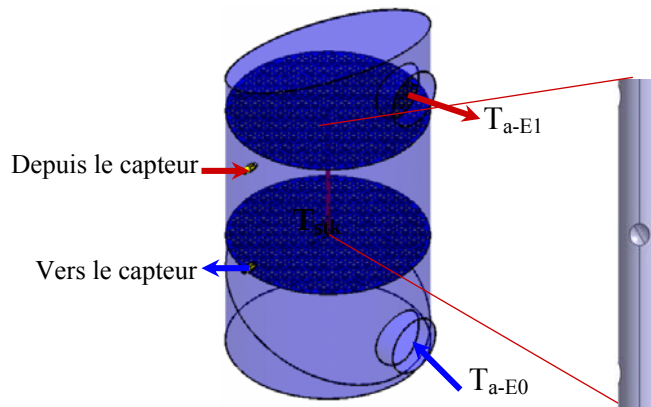


Figure 4.29. Schématisation du stockeur-échangeur

#### 4.4.1.3 Caractéristiques géométriques de l'échangeur

##### 4.4.1.3.1 Caractéristiques géométriques liées au stockage de l'eau

Le diamètre de la calandre  $D$  s'exprime par  $D = 1,25e_T\sqrt{n}$  dans le cas de tubes en réseau carré. On peut alors remarquer que la configuration en quinconce permet de réduire le diamètre de la calandre (au lieu d'un facteur de 1,25 pour le réseau carré, nous avons alors un facteur de 1,15 pour le réseau en quinconce) [LeG80].

On peut ainsi calculer la masse d'eau stockée, par la relation :

$$M_w = \rho_w \frac{\pi}{4} \left[ \left( (1,25)e_T\sqrt{N} \right)^2 - Nd_{\text{ext}}^2 \right] H \quad (4.79)$$

#### 4.4.1.3.2 Caractéristiques géométriques liées au déstockage par air

Dans le tableau 4.9, nous pouvons identifier les constantes du système, sous certaines conditions, ainsi que les différentes variables sur lesquelles nous pouvons intervenir.

Tableau 4.9. Caractéristiques géométriques de l'échangeur - stockeur

|            |                                |                               |
|------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Côté air : |                                | Correspondance :              |
| $d_{hint}$ | Diamètre hydraulique intérieur | $d_{int}$                     |
| $S_{int}$  | Section de passage interne     | $(\frac{1}{4})n\pi d_{int}^2$ |
| $A_{int}$  | Surface d'échange interne      | $Hn\pi d_{int}$               |
| Côté eau : |                                | Correspondance :              |
| $x$        | Caractéristique géométrique    | $H$                           |
| $A_{ext}$  | Surface d'échange externe      | $nH\pi d_{ext}$               |

#### 4.4.2 Etat de l'art sur la modélisation du stockage et du déstockage

Le stockage d'énergie consiste à emmagasiner un maximum d'énergie au moment où elle est disponible, pour la restituer ultérieurement, de la manière la plus efficace possible, [Peu05].

Pour notre cas particulier, l'unité de stockage d'énergie intervient dans deux situations de vie. Elle emmagasine l'énergie solaire lorsqu'elle est disponible (SdV : chauffage d'eau, jour) et la restitue lorsque l'on en a besoin (SdV : chauffage de la chambre de séchage, nuit). Nous présentons quelques modèles de stockage et déstockage d'énergie appliqués au chauffage d'eau sanitaire.

Diffie [Duf06], considèrent que la capacité de stockage de l'eau (ou un autre liquide), à température uniforme est donnée par :

$$\phi_{stk} = (MCp)_{stk} \Delta T_{stk} \quad (4.80)$$

où,  $\phi_{stk}$  est la puissance stockée dans l'eau pour une différence de température  $\Delta T_{stk}$ ,  $M_{stk}$  est la masse du milieu de stockage.

Le bilan d'énergie pour un ballon sans stratification est représenté par l'équation (4.80) :

$$M_w C_p \frac{dT_w}{dt} = \phi_u - L_{stk} - (kA)_{stk} (T_{stk} - T_{ext}) \quad (4.81) \quad \text{où,}$$

$\phi_u$  est la puissance utile récupérée depuis le capteur,  $L_{stk}$  est la puissance utilisée lors du procédé. En intégrant la relation 4.80 sur le temps, on obtient la variation de  $T_{stk}(t+dt)$ .

Kulkarni [Kul07], en s'appuyant sur l'écriture du flux utile récupéré depuis le capteur, proposé par [Duf06], présente le bilan d'énergie d'un ballon d'eau chauffé par un capteur solaire sous la forme :

$$(\rho_w C_{p_w} V_{stk}) \frac{dT_{stk}}{dt} = A_{cap} [G F_R (\tau \alpha) - F_R h_p (T_{stk} - T_{ext})] - \phi_{Lstk} - k A_{stk} (T_{stk} - T_{ext}) \quad (4.82)$$

$$\text{avec : } \phi_{Lstk} = q C_p (T_L - T_R) \text{ (déstockage), si } T_{stk} > T_L \quad (4.83)$$

$$\phi_{Lstk} = q C_p (T_L - T_{stk}), \text{ si } T_{stk} \leq T_L \quad (4.84)$$

$T_R$  est la température maximale atteinte dans le stockeur

$T_L$  est la température désirée

La surface extérieure du ballon de stockage est calculée à partir des variables de conception du stockeur c'est-à-dire, la hauteur « H » et le diamètre « d » du ballon et en fonction du volume d'eau. Cette grandeur a été exprimée par la relation :

$$A_{stk} = 1,845 \left( 2 + \frac{H}{d} \right) V_{stk}^{\frac{2}{3}} \quad (4.85)$$

Badescu [Bad08], reprend le modèle de stockage proposé par Kulkarni [Kul07] (rel. 4.81) pour décrire le comportement d'un stockeur à deux circuits avec serpentin. D'une part, il montre les échanges entre le capteur solaire et le ballon de stockage et d'autre part, il représente la récupération de l'énergie stockée à l'aide d'un serpentin. Le bilan du système est décrit par :

$$\frac{dT_{stk}}{dt} = \frac{A_{cap} F_R (\tau \alpha) G}{(\rho_w C_{p_w})} - \frac{A_{cap} F_R h_{p_{cap}}}{(\rho_w C_{p_w})} (T_{stk} - T_{ext}) - \frac{A_{stk} k}{(\rho_w C_{p_w})} (T_{stk} - T_{int}) - \phi_{Lstk} \quad (4.86)$$

L'expression du déstockage dépendra du fonctionnement du serpentin (sptn), nous avons ainsi :

$\phi_{Lstk} = 0$  pas de récupération d'énergie ;

$$\phi_{Lstk} = \frac{(q_w C_{p_w})_{sptn}}{(M_w C_{p_w})_{stk}} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{(kA)_{sptn}}{(\epsilon q_w C_{p_w})_{sptn}} \right) \right] \text{ récupération d'énergie} \quad (4.87)$$

### 4.4.3 Modèle de l'unité de stockage

Dans le cas de notre stockeur, l'eau du ballon de stockage passe dans les capteurs et se mélange dans le stockeur. Ainsi on fait l'hypothèse qu'il n'y a pas de stratification dans le stockeur. Cette hypothèse est défavorable.

Nous recherchons un modèle parcimonieux, ce modèle est basé sur l'hypothèse que l'eau est parfaitement mélangée et donc à température uniforme dans le stockeur.

#### 4.4.3.1 Conservation de l'énergie pour le stockeur

Hypothèses :

- Eau parfaitement mélangée,  $T_w$  uniforme dans le stockeur,
- Stockeur parfaitement calorifugé.

$$M_w C_{p_w} \frac{dT_{stk}}{dt} = \phi_{u-cap} \quad (4.88)$$

### 4.4.4 Modèle de l'unité de stockage au déstockage

Les variables entrées/sorties du modèle sont définies sur la figure 4.30.



Figure 4.30. Variables entrées/sorties du modèle du stockeur - échangeur

#### 4.4.4.1 Transferts thermiques

Soit  $k$ , le coefficient d'échange global du système, paramètre pertinent donnant l'influence globale de la paroi, dans son environnement, sur le transfert de chaleur [Nad06]. L'hypothèse «  $k$  constant dans l'échangeur » est souvent admise, nous considérerons cette hypothèse comme valable pour la suite de l'étude.

$$d\phi = kdA(T_a(x) - T_w(t)) \quad (4.89)$$

$k$  s'exprime en fonction des transferts sur l'eau et l'air, on peut négliger l'influence de la conduction à travers le tube ( $T_p$  uniforme).

a) Flux thermique échangé par convection naturelle entre un fluide et l'extérieur d'un tube : Avec  $T_p$  : température de la paroi externe.



$$d\phi = h_w dA_{\text{ext}} (T_p - T_w(t))$$

$h_w$  désigne le coefficient d'échange convectif de l'eau avec la paroi (Annexe 3).

b) Flux thermique échangé en convection forcée (entre les tubes et l'air):

$$d\phi = h_a dA_{\text{int}} (T_a(x) - T_p) \quad (4.90)$$

Avec :  $h_a = St_a G_a Cp_a$

$St$  désignant le nombre de Stanton. La corrélation d'échange est fournie et discutée en annexe 3.

#### 4.4.4.2 Conservation de l'énergie dans le stockeur

Hypothèses :

- Eau parfaitement mélangée,  $T_w$  uniforme dans le stockeur,
- Stockeur parfaitement calorifugé.

$$M_w Cp_w \frac{dT_{\text{stk}}}{dt} = \phi_{u-E} = \int k dA (T_a(x) - T_w(t)) \quad (4.91)$$

#### 4.4.4.3 Modèle de l'échangeur-stockeur au déstockage

Dans l'échangeur stockeur, nous pouvons considérer qu'à chaque instant le fluide de stockage est à température uniforme, cela sous-entend que le mélange du fluide est parfait, et l'autre fluide est à température variable.

Afin de faciliter l'étude d'un tel système on introduit les notions adimensionnelles Nombre d'Unités de Transferts thermiques (NUT) et d'efficacité thermique telles que les a exprimées Le Goff [LeG80].

Le NUT est représentatif du pouvoir d'échange de l'échangeur.

L'efficacité d'un échangeur correspond au rapport entre le flux de chaleur effectivement transféré dans l'échangeur et le flux de chaleur maximal qui serait transféré si le fluide à  $q_{\text{Cpmin}}$  sortait à la température d'entrée de l'autre.

Grâce à ces hypothèses, nous pouvons alors établir les expressions généralisées du système étudié :

Expression du Nombre d'Unités de Transfert

$$NUT = \frac{kA}{q_a Cp_a} \quad (4.92)$$

Avec :

$$A = N H \pi d_{\text{int}} \quad (4.93)$$

Expression de l'efficacité instantanée

$$\varepsilon_{a-E} = \frac{(T_w(t) - T_{a-E1})}{(T_w(t) - T_{a-E0})} = 1 - \exp^{-NUT} \quad (4.94)$$

Expression de la puissance utile récupérée par l'air :

$$\phi_{u-E} = q_a C_{p_a} \varepsilon_{a-E} (T_w(t) - T_{a-E0}) \quad (4.95)$$

La variation de la température de l'eau dans le ballon de stockage peut se calculer à partir des expressions (4.91), (4.93) et (4.94) sous les hypothèses suivantes :

- k constant dans l'échangeur,
- $T_{a-E0}$  constante,
- L'échangeur est parfaitement calorifugé,
- $T_w$  uniforme dans l'échangeur à l'instant t.

Evolution de la température de l'eau dans le temps

$$M_w C_{p_w} \frac{dT_w}{dt} = q_a C_{p_a} \varepsilon_{a-E} (T_w(t) - T_{a-E0}) \quad (4.96)$$

La relation permettant de connaître l'évolution de la température de l'eau dans le temps est issue de l'intégration de l'équation (4.95).

$$T_w(t + dt) = T_{a-E0} + (T_w(t) - T_{a-E0}) \exp\left(-\frac{q_a C_{p_a} \varepsilon_a}{M_w C_{p_w}} t\right) \quad (4.97)$$

Avec :

$$M = \rho H \left( \frac{\pi D c^2}{4} - N \pi d_{\text{ext}}^2 \right) \quad (4.98)$$

$$Dc = 1,25 e_T \sqrt{N} \quad (4.99)$$

#### 4.4.5 Qualification du modèle

Le modèle du stockeur échangeur utilisé permet de décrire le comportement de cette unité en utilisant peu de variables et peu de relations, il est donc parcimonieux.

En considérant les hypothèses réalisées lors de l'écriture du modèle de stockage, nous considérerons les variables de conception de cette unité (H, D et N), ainsi que, les relations obtenues d'après les bilans d'énergie écrits, (stockage et déstockage). Le paramètre pertinent de couplage avec le modèle de séchage global sera « l'efficacité de l'échangeur stockeur » réduite.

## 4.5 Construction du modèle global et méthode de résolution

Après avoir étudié le fonctionnement indépendant des unités : le capteur solaire et la chambre de séchage, on s'intéresse maintenant au système couplé. Nous partons d'un système de séchage à deux entrées d'énergie. D'une part, le capteur solaire (fonctionnement jour) et, d'autre part, le système de stockage d'énergie (fonctionnement nuit). Un programme de séchage de base permet d'intégrer ces deux unités en considérant les paramètres de couplage ; les efficacités du capteur et du stockeur respectivement. Par ailleurs, nous prenons en compte les fonctions de  $T$  et de  $HR$  (conditions extérieures) ainsi que, le calcul de  $G^*$ . Cela permettra la simulation de fonctionnement du séchoir pour deux situations de vie : la situation de vie « séchoir sans stockage » et la situation de vie « séchoir avec stockage ».

Le modèle global du séchoir solaire se construit suivant le schéma global sur la [figure 4.31](#).

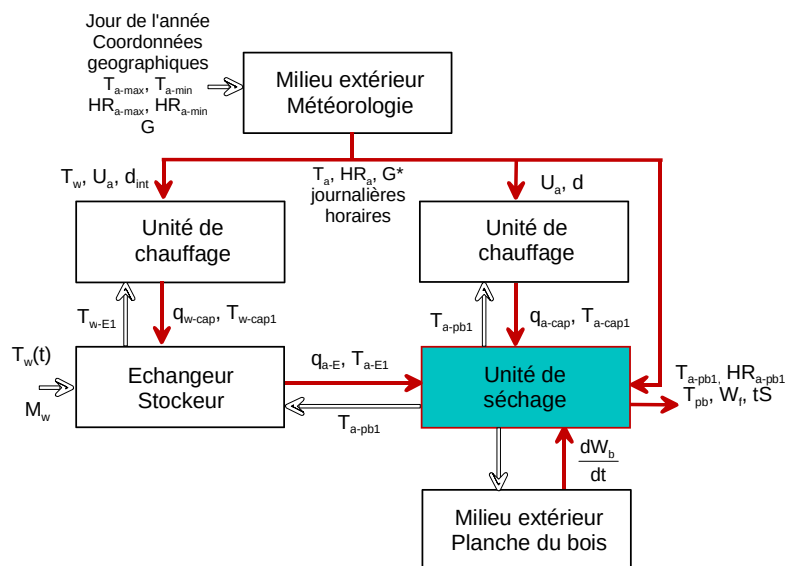


Figure 4.31. Schéma du modèle global du séchoir solaire

On obtient comme résultat un système couplé qui intègre : des conditions météorologiques journalières horaires, l'ensoleillement annuel saisonnier, la cinétique expérimentale de séchage du pin maritime, le capteur solaire à air et l'intégration du échangeur - stockeur. Il permet la variation de quelques paramètres tels que : le jour de l'année, la vitesse de l'air dans la pile de bois,  $U_{a-pb}$  ; les variables de conception du capteur ( $L, l=A_{cap}$ ), et du stockeur ( $Dc$  et  $H$ ) et de l'unité de séchage, (volume de bois). Pour la conduite du séchoir, on propose de jouer sur les variables de pilotage, le taux de mélange  $\tau_m$  et le taux de renouvellement  $\tau_r$  d'air.

## 5 Simulations et optimisation du séchoir solaire

Dans cette partie, nous présentons la simulation de fonctionnement du séchoir solaire à partir du modèle global construit. Nous prenons en compte les deux situations de vie considérées comme structurantes du système, (fonctionnement jour et fonctionnement nuit). Puis, nous réalisons l'optimisation du système à partir des critères de qualification : la qualité du produit sec, le temps de séchage et les coûts de possession du séchoir. L'investissement initial est défini à partir des prix des matériaux de construction au Mexique.

### 5.1 Séchage solaire sans stockage

#### 5.1.1 Modèle

Afin de comparer les deux situations de vie (SdV) du séchoir, nous ferons tout d'abord référence à la situation de vie « fonctionnement jour, séchoir sans stockage ».

La démarche de modélisation réalisée au chapitre 4, permet de simuler le fonctionnement du séchoir solaire pour 3 mois de l'année type.

Le modèle de l'unité de chauffage (capteur solaire) s'exprime d'après la relation (4.57) :

$$\phi_u = q_{\text{cap}} C_p (T_{\text{a-cap1}} - T_{\text{a-cap0}}) = \varepsilon G A_{\text{cap}} = \varepsilon G (L I)$$

Dans notre logique de conception, les variables de pilotage du séchoir (**VPI**), le taux de renouvellement  $\tau_r$  et le taux de mélange  $\tau_m$  agissent directement sur la vitesse de séchage.

#### 5.1.2 Hypothèses de fonctionnement

- La vitesse de l'air est uniforme dans toute la pile de bois.
- La température d'entrée du capteur  $T_{\text{a-cap0}}$  correspond à la température de sortie de la pile de bois  $T_{\text{a-pb1}}$ . La figure (5.1) montre le mélange d'air à l'entrée de la pile de bois.

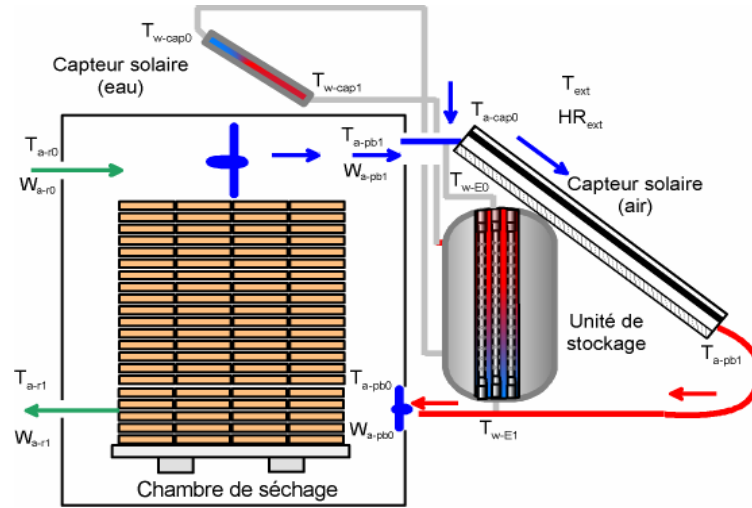


Figure 5.1 . Schéma du couplage capteur solaire à air – séchoir

- On considère un taux de renouvellement d'air  $\tau_r > 0$ , la journée et un  $\tau_r = 0$  la nuit. Le taux de renouvellement d'air  $\tau_r$ , le flux de chaleur venant du capteur  $\phi_u$ , ainsi que le taux de mélange  $\tau_m$  dans la chambre conduisent à une nouvelle expression pour le calcul de la température à l'entrée de la pile de bois de la forme :

$$T_{a-pb0} = \tau_r T_{ext} + \tau_m T_{a-cap1} + (1 - \tau_r - \tau_m) T_{a-pb1} \quad (5.1)$$

- On utilise la relation (5.2) pour calculer les variations de l'humidité de l'air à l'entrée de la pile à chaque instant.

$$W_{a-pb0}(t + dt) = (1 - \tau_r) W_{a-pb1} + \tau_r W_{a-ext} \quad (5.2)$$

### 5.1.3 Description des simulations

Le programme de simulation de séchage solaire permet de calculer la variation des paramètres qui interviennent dans le processus tels que : la vitesse de l'air dans la pile ( $U_{a-pb}$ ), le taux de renouvellement d'air ( $\tau_r$ ), la surface du capteur ( $A_{cap}$ ) et les conditions de température et d'humidité relative selon le jour de l'année. Nous établissons des scénarios de séchage, selon les conditions météorologiques de chaque mois considéré. Lors de l'analyse des cinétiques, on ne parlera que d'un seul scénario de séchage correspondant au mois le plus humide (août), afin d'analyser le fonctionnement du séchoir pour les pires conditions de séchage. Nous traçons les courbes pour 3 mois représentatifs (en considérant le jour 15 de chaque mois). Les conditions de séchage (température et humidité relative moyennes mensuelles) utilisées sont présentées dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1. Conditions météorologiques des mois considérés

| Mois     | Jour de l'année | Caractéristique      | $T_{\max}$<br>(°C) | $T_{\min}$<br>(°C) | $HR_{\max}$<br>(%) | $HR_{\min}$<br>(%) |
|----------|-----------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Avril    | 105             | le plus chaud et sec | 26                 | 12                 | 70                 | 21                 |
| Août     | 227             | le plus humide       | 22                 | 12                 | 81                 | 38                 |
| Décembre | 349             | le plus froid        | 21                 | 4                  | 85                 | 26                 |

Nous avons considéré une pile de bois de pin maritime à 0,94 de teneur en eau initiale. Ses dimensions sont : 0,027 x 1,60 x 2,5 m avec un écartement entre lits de 0,027 m, (baguettage).

#### 5.1.4 Simulation de séchage solaire sans stockage (mois d'août)

Pour les simulations de séchage solaire sans stockage, on utilise les conditions présentées dans le tableau 5.2, ainsi que les conditions météorologiques du mois d'août.

Tableau 5.2. Conditions de séchage

| Mois | $U_{a-pb}$ | $\tau_r$ | $A_{cap}$ | $q_{cap}$   |
|------|------------|----------|-----------|-------------|
| (-)  | $m.s^{-1}$ | %        | $m^2$     | $kg.s^{-1}$ |
| Août | 1          | 30       | 30        | 0,5         |

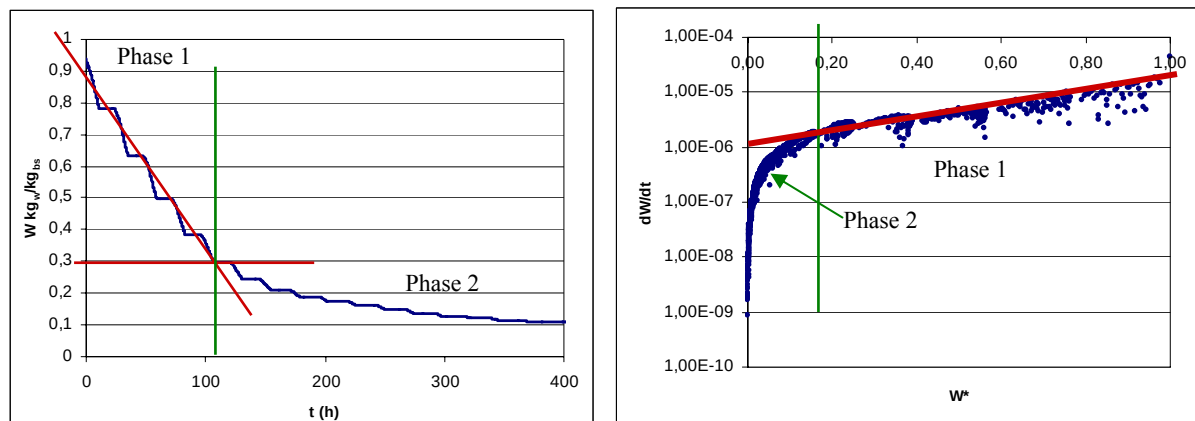


Figure 5.2. Cinétique de séchage d'une pile de bois de pin (mois, le plus humide, août)

Les figures (5.3) et (5.4) montrent, le comportement de la température et de l'humidité relative de l'air correspondantes à la cinétique de séchage décrite ci-dessus.

#### 5.1.4.1 Influence de la Température de l'air

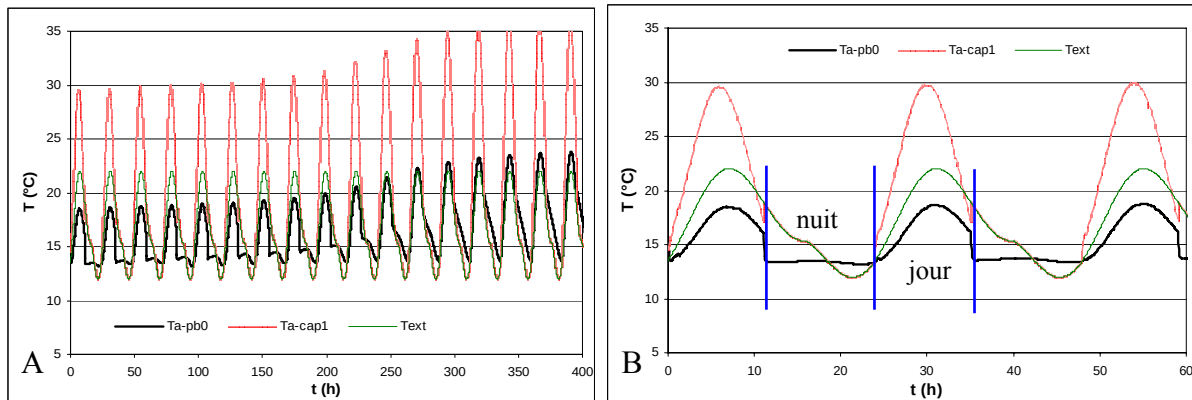


Figure 5.3. Variation de la température de l'air au cours du séchage (mois, le plus humide, août)

On constate sur la figure (5.3) les variations de la température lors de la simulation du séchage. On remarque deux comportements de la température de l'air (jour et nuit). Pour la situation de vie « jour », on observe que la température de l'air dans la pile monte progressivement puis, elle suit la disponibilité d'énergie solaire (figure 5.3 B). La nuit, elle reste constante car, on considère une chambre sans pertes thermiques (bien isolée). A la fin du séchage, on remarque des valeurs plus importantes de la température de l'air à la sortie du capteur ( $T_{a-cap1}$ ), néanmoins, la température de l'air de séchage ( $T_{a-pb0}$ ) ne monte pas autant, car une partie de l'énergie est utilisée pour l'évaporation.

#### 5.1.4.2 Influence de l'Humidité Relative de l'air

La figure (5.4) montre l'évolution de l'humidité de l'air de séchage.

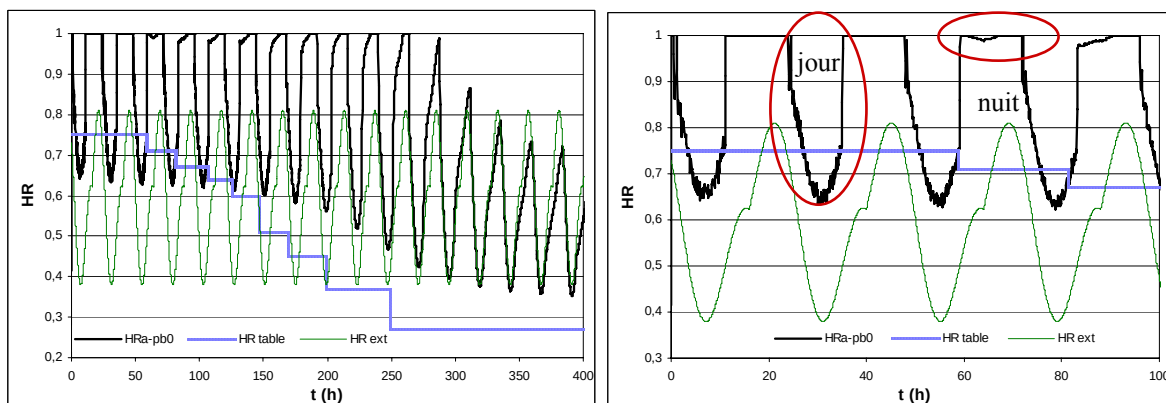
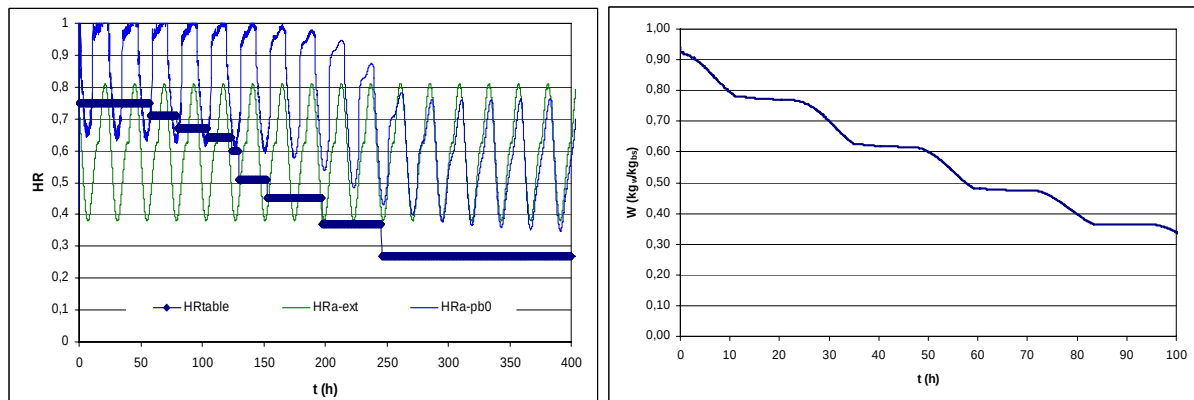


Figure 5.4. Variation de l'humidité relative de l'air au cours du séchage (mois, le plus humide, août)

Remarquons que, pour la situation de vie jour, on observe une chute de l'humidité de l'air à l'entrée de la pile, cette diminution de l'humidité correspond à l'évacuation de la vapeur d'eau vers l'extérieur. Les valeurs minimales de HR correspondent aux températures les plus élevées à midi. Puis, l'humidité de l'air remonte progressivement à cause de la

diminution de la température. La nuit, on constate que l'air à l'intérieur de la chambre se sature rapidement ce qui bloque le séchage nocturne, car  $\tau_r = 0$ .

Sur la figure 5.5 nous représentons une simulation du nocturne en considérant  $\tau_r N = 5\%$ .



**Figure 5.5. Variation de HR considérant un  $\tau_r N = 5\%$ , séchage sans stockage**

Avec un  $\tau_r N = 5\%$ , nous constatons une réduction de temps de séchage de 1 jour et des humidités relatives de l'air moins importantes au début du séchage. On peut dire qu'en situation de vie nuit, l'évacuation de l'humidité permet de continuer à sécher le bois.

En comparant le comportement de l'humidité relative dans la chambre (séchoir solaire) avec l'humidité relative préconisée pour une conduite de séchage convectif, (table de séchage 3F, [Jol80]), on remarque que la valeur de HR simulée respecte les valeurs issues de la table de séchage. En utilisant  $\tau_r$  variable dans la journée, nous pourrions peut-être établir les mêmes conditions d'humidité de l'air dans le séchoir solaire afin d'agir sur la qualité du bois.

### 5.1.3.1 Critique de la courbe de séchage

La simulation du fonctionnement du séchoir sans stockage permet de constater l'évolution de la teneur en eau d'une pile de bois de pin en fonction du temps. On observe deux comportements bien marqués: un fonctionnement diurne et un fonctionnement nocturne (figure 5.6).

Le jour, avec un taux de renouvellement d'air  $\tau_r > 0$ , on crée des conditions d'humidité acceptables pour le séchage. Dans ce cas, la pression de vapeur de l'air à l'intérieur de la chambre reste inférieure à la pression de vapeur à la surface du bois et rend le séchage possible.

La nuit, ces pressions sont inversées, c'est-à-dire que la pression de vapeur de l'air dans la chambre devient supérieure à celle de la surface du bois à cause de l'accumulation de vapeur d'eau dans l'enceinte. Ce phénomène est dû au taux de renouvellement nul pour cette période et provoque un blocage du processus (figure 5.6, nuit). La température de l'air dans la



chambre reste constante (figure 5.3), car, on considère la chambre bien isolée (sans pertes thermiques).

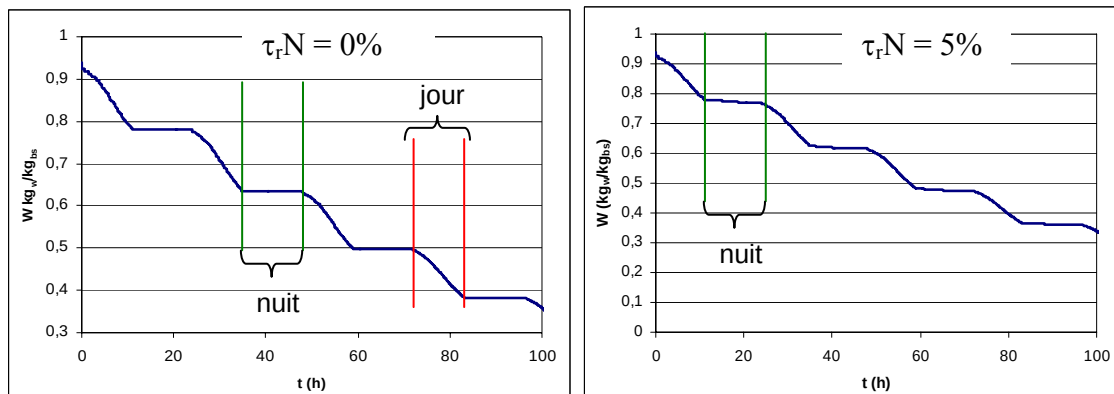


Figure 5.6. Cinétique de séchage d'une pile de bois (mois, le plus humide, août)

La partie correspondant au séchage du bois lors du fonctionnement diurne du séchoir, fait apparaître une diminution rapide de la teneur en eau. Cette diminution est générée par les conditions de température et humidité de l'air adaptées pour cette période. La nuit, le  $\tau_r$  étant nul, il n'existe pas l'échange d'air entre la chambre et l'extérieur, d'ailleurs, il n'y a plus de source d'énergie chauffante, c'est pourquoi, le séchage est nul. Néanmoins, avec un  $\tau_rN$  de 5%, on observe une légère diminution de la teneur en eau due à l'augmentation du pouvoir d'évaporatoire, lié à la baisse d'humidité relative.

#### 5.1.4.3 Fin du séchage

Nous simulons le comportement des courbes de teneur en eau à l'entrée, au milieu et à la sortie de la pile de bois. La fin du séchage est atteinte lorsque les trois courbes sont à la teneur en eau d'usage ( $W_f = 0,12 \text{ kg}_w/\text{kg}_{bs}$ ) tel que le montre la figure 5.7.

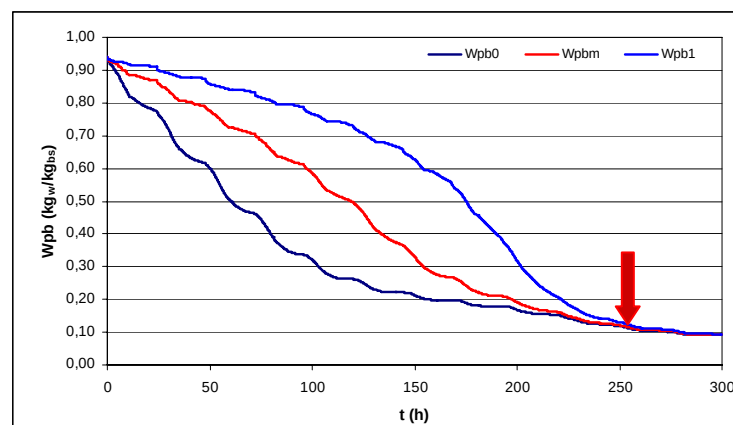


Figure 5.7. Fin du séchage, teneur en eau finale  $W_f$

### 5.1.4 Influence des paramètres sur le temps de séchage

#### 5.1.4.1 Influence saisonnière

Nous avons comparé les cinétiques de séchage pour 3 mois de l'année, afin d'observer les effets saisonniers du fonctionnement du séchoir sur le temps de séchage. Pour le système global, nous fixons les VCo du capteur,  $L$  et  $l$  ( $A_{cap}$ ) ; la VA, vitesse de l'air dans la pile de bois,  $U_{a-pb}$  et la VPi taux de renouvellement,  $\tau_r$  ; (tableau 5.3). Les résultats sont présentés sur la figure (5.8).

Tableau 5.3. Conditions de séchage

| Mois     | Jour de l'année | Caractéristique      | $T_{max}$<br>(°C) | $T_{min}$<br>(°C) | $HR_{max}$<br>(%) | $HR_{min}$<br>(%) | $U_{a-pb}$<br>$m.s^{-1}$ | $\tau_r$<br>% | $A_{cap}$<br>$m^2$ | $q_{cap}$<br>$kg.s^{-1}$ |
|----------|-----------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|---------------|--------------------|--------------------------|
| Avril    | 105             | le plus chaud et sec | 26                | 12                | 70                | 21                | 1                        | 30            | 30                 | 0,5                      |
| Août     | 227             | le plus humide       | 22                | 12                | 81                | 38                |                          |               |                    |                          |
| Décembre | 349             | le plus froid        | 21                | 4                 | 85                | 26                |                          |               |                    |                          |

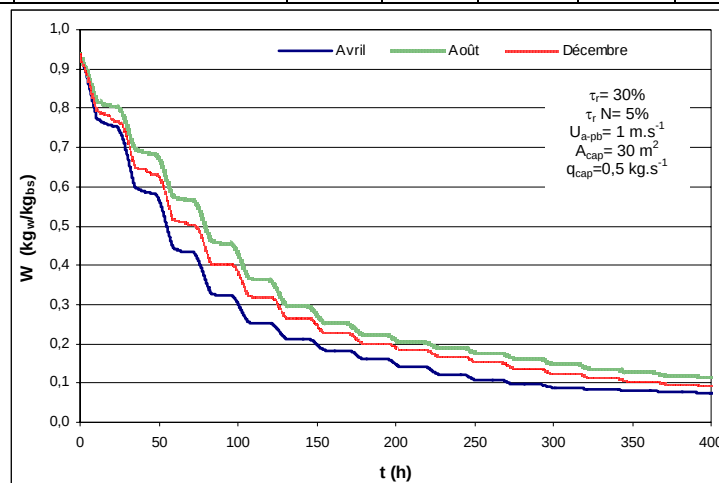


Figure 5.8. Variation saisonnière du temps de séchage d'une pile de bois

Tout d'abord on constate la forte influence de l'humidité relative de l'air sur la vitesse de séchage. Pour le mois d'avril (le plus sec), on observe un séchage plus rapide par rapport au mois d'août (le plus humide), même si les températures sont très proches. Au mois de décembre, on observe un séchage plus rapide par rapport au mois d'août, même si les températures sont plus basses. On remarque encore l'influence de l'humidité de l'air extérieur. Nous recensons dans le tableau (5.4) les temps de séchage nécessaires pour arriver à la teneur en eau d'usage  $W_f = 0,12 \text{ kg}_w/\text{kg}_{bs}$ .

Tableau 5.4. Résultat des conduites de séchage « variation saisonnière » en accord avec le critère d'appréciation temps de séchage  $tS = f(W_f)$  pour 3 mois de l'année type, (fig. 5.7)

| Mois                                     | Avril   | Août     | Décembre |
|------------------------------------------|---------|----------|----------|
| $tS$ (h)                                 | 230 h   | 302 h    | 370 h    |
| $W_f = 0,12 \text{ kg}_w/\text{kg}_{bs}$ | (9,6 j) | (12,6 j) | (15,4 j) |

En considérant la fin du séchage à  $W_f$  d'usage, les temps de séchage pour les mois d'août et décembre sont prolongés au-delà de 10 jours. Alors que les conditions du mois d'avril permettent de sécher le bois en 10 jours. On constate que l'influence de l'humidité de l'air sur les temps de séchage est plus importante pour les mois d'avril et d'août.

#### 5.1.4.2 Influence de la vitesse de l'air dans la pile de bois ( $U_{a-pb}$ )

Pour évaluer l'influence de la vitesse de l'air sur le temps de séchage, nous prenons le mois d'août et nous modifions le paramètre  $U_{a-pb}$ , avec un taux de renouvellement d'air fixé à 30%. A partir des conditions de séchage présentées dans le tableau 5.3, nous avons obtenu les cinétiques de séchage représentées sur la figure 5.9.

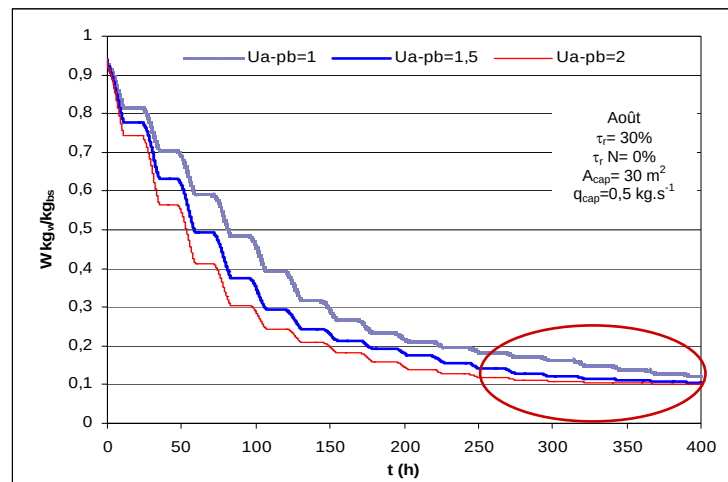


Figure 5.9. Influence de la vitesse de l'air dans la pile sur le temps de séchage (mois d'août)

Joly, [Jol80], mentionne que la vitesse de l'air à la surface des planches, joue un rôle très important surtout au début du séchage. Sur la figure (5.9), on constate cette influence lorsque l'on augmente la vitesse de l'air de 1 à  $2 \text{ m.s}^{-1}$ , le résultat est l'obtention des vitesses de séchage plus rapides surtout effectivement, au début du séchage. On observe qu'il existe une grande différence entre la courbe de séchage à  $1 \text{ m.s}^{-1}$  et la courbe à  $2 \text{ m.s}^{-1}$ . Puis, dans les environs de  $W = 0,30 \text{ kg}_w/\text{kg}_{bs}$ , les courbes se rapprochent, cela veut dire que lors du deuxième ralentissement, la vitesse de l'air de séchage devienne moins influente. Ce qui veut dire qu'à

partir de  $W_{PSF}$  ce sont les transferts internes dans le bois qui conditionnent la vitesse de séchage.

Nous avons analysé les 3 courbes de la figure 5.8. On considère le temps nécessaire pour atteindre la teneur en eau d'usage. Notons que pour une vitesse de l'air de  $1 \text{ m.s}^{-1}$ , il faut compter 17 jours pour atteindre  $W_f = 0,12 \text{ kg}_w/\text{kg}_{bs}$ . Néanmoins, pour une vitesse de  $2 \text{ m.s}^{-1}$ , le temps est réduit jusqu'à 60%. Les résultats sont résumés dans le tableau (5.5).

Tableau 5.5. Résultat des conduites de séchage « variation de  $U_a$  » en accord au critère d'appréciation temps de séchage  $tS = f(W_f)$  pour le mois d'août, (fig. 5.9).

| Critère                                  | $U_{a-pb} (\text{m.s}^{-1})$ |        |        |
|------------------------------------------|------------------------------|--------|--------|
|                                          | 1                            | 1,5    | 2      |
| tS (h)                                   | 393 h                        | 296 h  | 246 h  |
| $W_f = 0,12 \text{ kg}_w/\text{kg}_{bs}$ | (16 j)                       | (12 j) | (10 j) |

#### 5.1.4.3 Influence du taux de renouvellement d'air ( $\tau_r$ )

Une fois que l'air à l'intérieur de la chambre est saturé d'eau, il est nécessaire de le renouveler. Cet air humide doit alors sortir de la chambre et être remplacé par de l'air moins humide (air extérieur). L'air extérieur qui entre dans la chambre est très peu chargé d'humidité. Réchauffé, il possède une humidité relative inférieure à celle de la chambre donc, une grande capacité à se charger en vapeur d'eau. Le taux de renouvellement d'air  $\tau_r$  considéré comme, **la variable de pilotage, VPi** du séchoir permettra, l'établissement des conduites de séchage en fonction de l'humidité de l'air.

Pour l'évaluation de  $\tau_r$ , nous avons réalisé des simulations pour les conditions de séchage mentionnées précédemment (tableau 5.3), et une  $U_{a-pb}$  fixe de  $1 \text{ m.s}^{-1}$ . Les résultats obtenus pour le mois d'août sont présentés sur la figure (5.10).

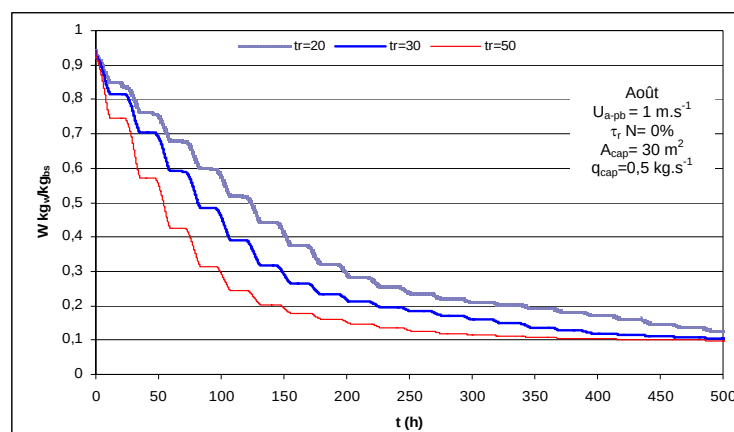


Figure 5.10. Influence du  $\tau_r$  sur le temps de séchage (mois d'août)

Les résultats révèlent que le taux de renouvellement d'air  $\tau_r$ , est un paramètre qui influence de manière importante le temps de séchage du bois. On constate sur la figure (5.10) un séchage plus rapide à un  $\tau_r = 50\%$  qu'à  $\tau_r = 20\%$ . On voit que le gain en temps est de l'ordre de plus de 50% en considérant une teneur en eau finale de  $0,12 \text{ kg}_w/\text{kg}_{bs}$ , (tableau 5.6).

Tableau 5.6. Résultat des conduites de séchage « influence de  $\tau_r$  » en accord au critère d'appréciation temps de séchage  $t_S = f(W_f)$  pour le mois d'août, (fig. 5.10).

| Critère                                | $\tau_r$ (%) |        |        |
|----------------------------------------|--------------|--------|--------|
|                                        | 20           | 30     | 50     |
| $t_S$ (h)                              | 500 h        | 393 h  | 270 h  |
| $W = 0,12 \text{ kg}_w/\text{kg}_{bs}$ | (21 j)       | (16 j) | (11 j) |

## 5.2 Séchage solaire avec stockage

### 5.2.1 Modèles

Dans ce cas l'air va se réchauffer dans l'échangeur-stockeur. La température de sortie de l'échangeur-stockeur  $T_{a-EI}$  va s'exprimer à partir de la relation (4.93) et selon l'évolution de la température de l'eau stockée.

### 5.2.2 Hypothèses de fonctionnement

- La journée, le séchoir fonctionne avec le capteur à air et un taux de renouvellement  $\tau_r > 0$ .
- Le déstockage démarre lorsque l'ensoleillement n'est plus suffisant pour chauffer l'air, ( $G^* < 90 \text{ W.m}^2$ ).
- La nuit, le séchoir fonctionne à un taux de renouvellement nul et avec le by pass du capteur à air.
- Le couplage du stockeur - échangeur à la chambre de séchage a été réalisé tel que le montre la figure (5.11).

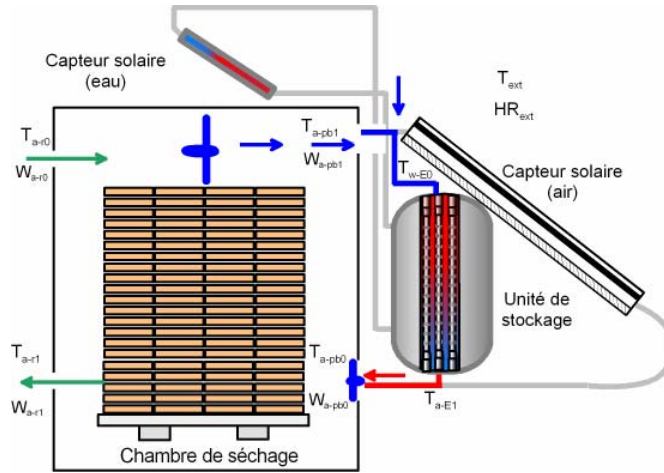


Figure 5.11 . Schéma du couplage échangeur stockeur – séchoir

- La température d'entrée à la pile de bois correspond à la température de sortie du stockeur, ( $T_{a-E1} = T_{a-pb0}$ ) et la température de sortie de la pile équivaut à la température d'entrée au stockeur, ( $T_{a-pb1} = T_{a-E0}$ ). Maintenant pour connaître la température de l'air à l'entrée de la pile, on utilise la relation (5.3).

$$T_{a-pb0} = \tau_r T_{ext} + \tau_m T_{a-E1} + (1 - \tau_r - \tau_m) T_{a-pb1} \quad (5.3)$$

avec,  $\varepsilon_E$  (Eq. 4.93)

La température initiale de l'eau de déstockage correspond à la température atteinte dans le capteur à eau durant la journée.

- La température de l'eau  $T_w$  est uniforme dans l'échangeur à chaque instant.

On calcule la température de l'air à la sortie de l'échangeur à l'aide de la relation (5.4).

$$T_{a-E1} = T_{a-pb1} + \varepsilon_E [T_w(t) - T_{a-pb1}] \quad (5.4)$$

### 5.2.3 Description des simulations

En partant des données météorologiques du tableau (5.3), nous avons simulé le fonctionnement du séchoir avec l'unité de stockage d'énergie intégrée.

Nous avons établi des scénarios de séchage correspondant à trois mois représentatifs de l'année. Pour l'analyse de la cinétique de séchage, on ne présente que la simulation pour le mois le plus humide (août), c'est-à-dire pour les conditions les moins favorables pour le séchage du bois.

Le code permet la variation de plusieurs paramètres du stockeur tels que : les variables auxiliaires (VA) ; la masse d'eau,  $M_w$  et le débit d'air qui le traverse,  $q_E$  ainsi que des variables de conception (VCo) : le nombre de tubes,  $N$ , la hauteur du ballon,  $H$  et le diamètre de calandre  $D_c$ .

#### 5.2.4 Simulation de séchage solaire avec stockage (mois d'août)

Dans la suite, nous analysons le fonctionnement du séchoir avec l'intégration de l'unité de stockage d'énergie. Sur la figure (5.12), nous présentons la cinétique de séchage d'une pile de bois de pin sous les conditions du mois d'août. Les données d'entrée sont :  $U_{a-pb} = 1 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $\tau_j = 30\%$  (jour),  $\tau_n = 5\%$  (nuit),  $M_w = 1000 \text{ kg}$ , et le débit d'air dans l'échangeur,  $q_E = 0,5 \text{ kg.s}^{-1}$ .

La figure (5.12) montre la variation de la teneur en eau du bois en fonction du temps (5.12a) et la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau réduite ( $W^*$ ), (5.12b).

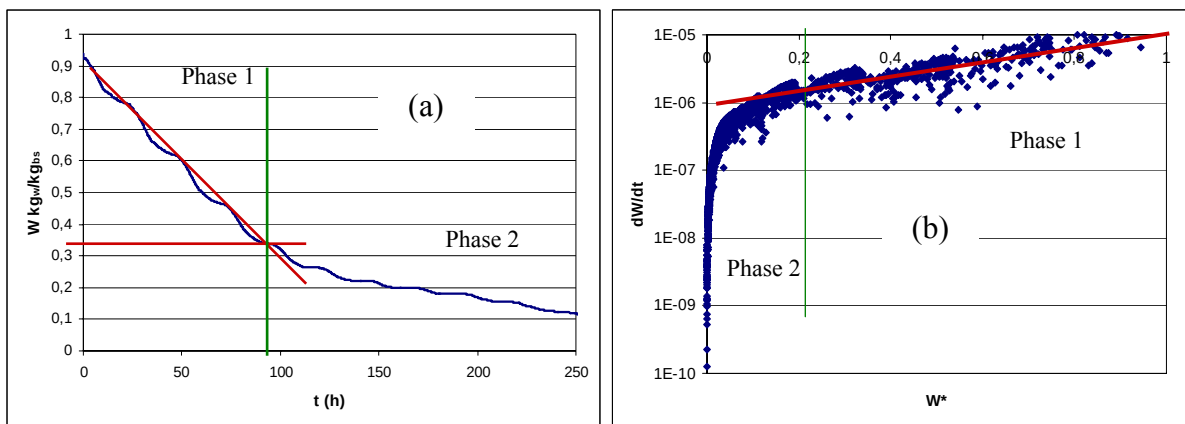
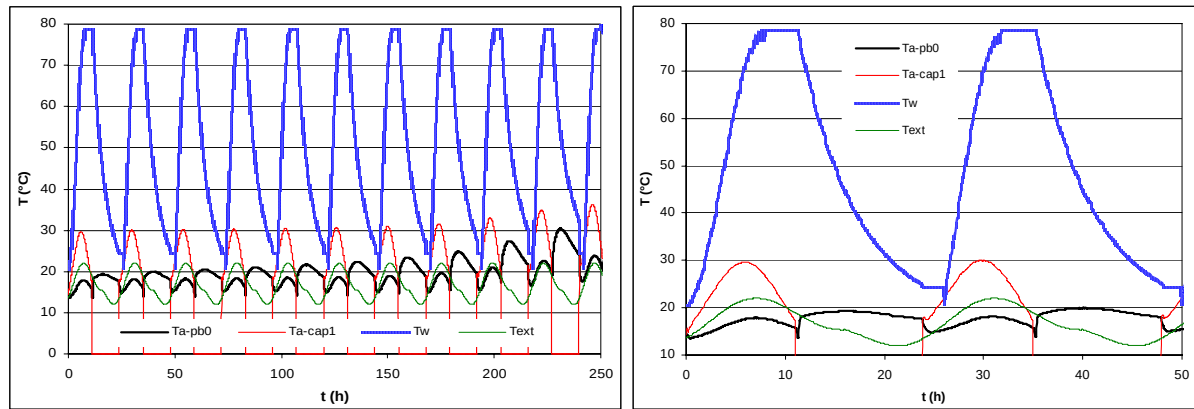


Figure 5.12. Cinétique et vitesse de séchage, fonctionnement séchoir avec stockage (août)

##### 5.2.4.1 Influence de la Température de l'air

Le comportement de la température de l'air pour cette simulation est bien différent de celui observé dans un séchoir sans stockage. On constate sur la figure (5.13), l'importance de l'unité de stockage.



**Figure 5.13. Variation de la température de l'air au cours du séchage + stockage (août)**

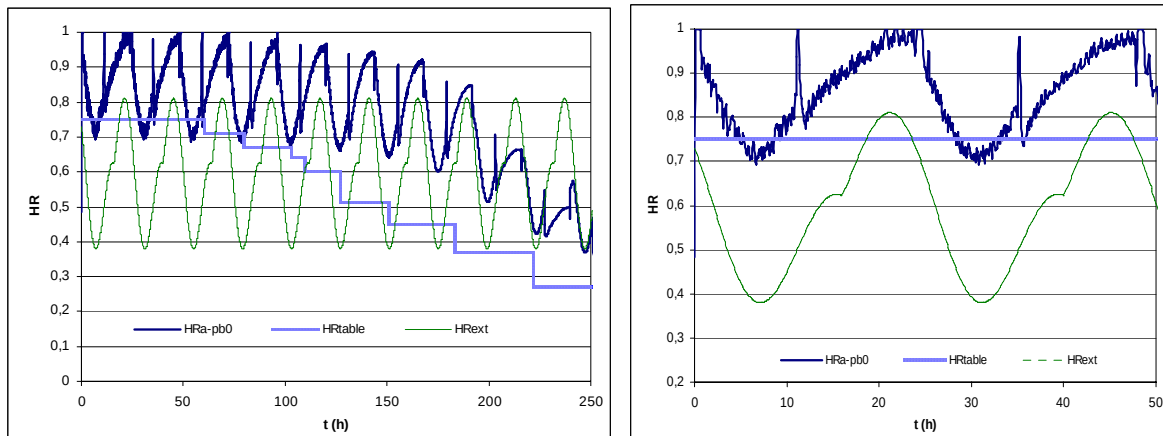
La journée, la température de l'air, ne monte pas de manière importante puisque, le séchoir échange de l'air avec l'extérieur. Par contre, lors du fonctionnement nocturne, on remarque que la température à l'entrée de la pile de bois monte, surtout au début lors de la mise en marche de l'échangeur. La montée de température entraîne une augmentation du pouvoir d'absorption de l'air, elle est alors un facteur d'accélération de l'évaporation, [Jol80]. Le résultat est alors, une diminution quasiment continue de la teneur en eau du bois, tel que le montre la figure (5.12). Skaar [Ska88], mentionne que la montée de la température de 1 °C dans une enceinte de séchage fermé peut faire varier l'humidité relative jusqu'au 3%. Néanmoins, dans notre cas, le fait de travailler la nuit avec un  $\tau_r > 0$ , déclenche un déstockage rapide.

Lors du déroulement du séchage, en situation de vie nuit, on remarque une augmentation de la température de l'air à l'entrée de la pile. On observe, au début du séchage des températures de l'air en dessous de 20 °C alors qu'à la fin, on constate des valeurs de  $T_{a-pb1}$  de l'ordre de 25 °C de même, des températures supérieures à celles de la journée.

#### 5.2.4.2 Influence de l'Humidité Relative de l'air

Sur la figure (5.14), nous représentons l'évolution de l'humidité relative de l'air, HR en fonction du temps. Etant donné que le déstockage a lieu la nuit, nous ferons référence au comportement de l'humidité relative nocturne dans le séchoir.



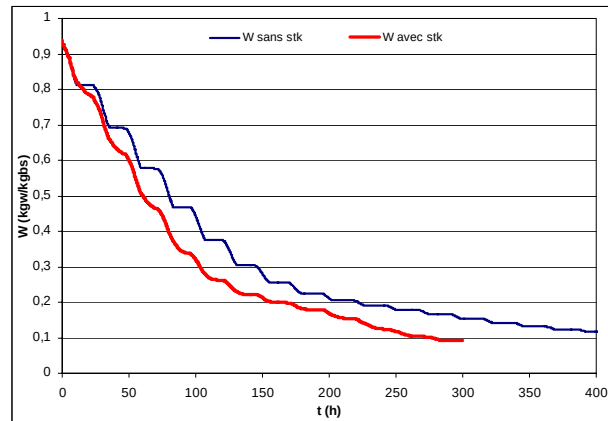


**Figure 5.14. Variation de l'humidité relative de l'air au cours du séchage + stockage (août)**

Lors de la mise en marche de l'échangeur, on constate une chute de HR à l'entrée de la pile de bois causée par le réchauffement de l'air lors du passage dans l'échangeur. On remarque très bien l'effet du taux de renouvellement nocturne, car HR remonte progressivement à cause des échanges avec l'extérieur et à l'évacuation de l'eau depuis le bois. Dans les premiers jours du processus, HR atteint la saturation, puisque la quantité d'eau disponible dans le bois est importante (évacuation de l'eau libre). Alors qu'à la fin, HR n'atteint plus la saturation car, le bois contient très peu d'eau (évacuation de l'eau liée). Finalement, on remarque qu'au début de la journée avec l'augmentation du taux de renouvellement de l'air et la montée de la température, l'humidité relative HR diminue. Le mois d'août présente des valeurs de HR élevées, ce qui entraîne des conduites de séchage relativement longues.

#### 5.2.4.3 Influence du stockage

On sait bien que la source d'énergie thermique utilisée pour le séchage solaire est intermittente, alors que l'on veut un séchage continu. L'intégration du stockage d'énergie permet de réaliser un séchage sans interruption. Sa fonction est d'emmagasinier l'énergie solaire pendant la journée et de la restituer lorsque le système en a besoin. Pour montrer l'influence du stockage, nous avons comparé deux simulations de séchage (avec la même surface globale de capteurs) : une cinétique sans stockage en considérant un capteur solaire à air de  $40 \text{ m}^2$ ,  $U_{a-pb}=1 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $\tau_r=30\%$  et  $\tau_r N=5\%$ . Une autre avec l'unité du stockage intégré et les paramètres suivants :  $A_{cap}=30 \text{ m}^2$ ,  $A_{capw}=10 \text{ m}^2$ ,  $\tau_r$  et  $\tau_r N$  égaux au cas précédent. Les résultats sont présentés sur la [figure \(5.15\)](#).



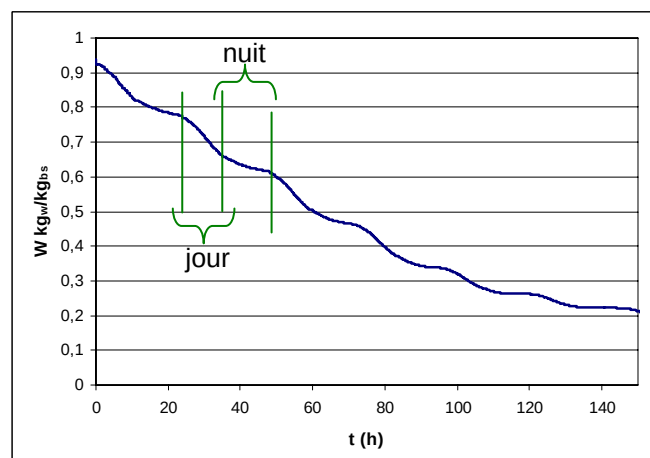
**Figure 5.15 Influence du stockage d'énergie sur le temps de séchage (mois d'août)**

Pour le cas du fonctionnement avec stockage, on a considéré une masse d'eau de 1000 kg et un débit d'air dans le stockeur de  $0,5 \text{ kg.s}^{-1}$ . Les données pour le fonctionnement sans stockage correspondent à ceux du [tableau 5.3](#).

On constate sur la figure (5.15), une réduction importante du temps de séchage issue de l'intégration du stockage lors du fonctionnement du séchoir. Le gain de temps est de l'ordre de 30% pour le mois d'août en considérant la teneur en eau d'usage. A terme, il faudra gérer ce temps gagné afin d'établir une conduite correcte de séchage pour accomplir les objectifs envisagés.

#### 5.2.4.4 Critique de l'évolution de la teneur en eau du bois

Nous montrons sur la figure (5.16) une analyse particulière de la cinétique de séchage. Cette simulation permet de réaliser les remarques suivantes :



**Figure 5.16. Cinétique de séchage d'une pile de bois, fonctionnement avec stockage, (août)**

- Pour le séchage diurne, on distingue une diminution relativement rapide de la teneur en eau, surtout, au début du séchage lorsque la quantité d'eau libre est

importante. Après le point de saturation des fibres, on remarque le ralentissement de la courbe.

- Nous différencions le séchage nocturne par le ralentissement de la courbe. Ce comportement est moins marqué au début du processus mais, après le passage du point de saturation des fibres, on constate un ralentissement plus accentué. De même, on observe un blocage du séchage nocturne, lorsque le bois est dans le domaine hygroscopique.
- Concernant le taux de renouvellement de l'air, on constate qu'il s'agit d'un paramètre très important pour l'établissement des conduites de séchage. En ce qui concerne le  $\tau_r$ , on remarque une accélération de la vitesse de séchage grâce aux conditions de température et humidité relative de l'air générées dans le séchoir. Pour le cas de  $\tau_r N$ , on remarque un déstockage rapide (cf évolution de la température de l'eau, figure 5.13). On constate que l'énergie stockée (masse d'eau de 1000kg) pendant la journée est adéquate pour le séchage nocturne.

L'utilisation d'une source d'énergie nocturne permet de réduire les temps de séchage mais aussi, il représente une possibilité de maîtriser la qualité du bois lors de l'établissement des conduites de séchage.

#### 5.2.4.5 Influence saisonnière

Sur la figure (5.17), nous présentons trois simulations de la cinétique de séchage d'une pile de bois, en considérant un séchoir solaire avec stockage d'énergie. Nous avons considéré les conditions de séchage :  $U_{a-pb}=1 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $\tau_j=30\%$ ,  $\tau_r N=5\%$ ,  $M_w = 1000 \text{ kg}$ ,  $A_{cap} = 30 \text{ m}^2$ ,  $A_{capw} = 10 \text{ m}^2$ .

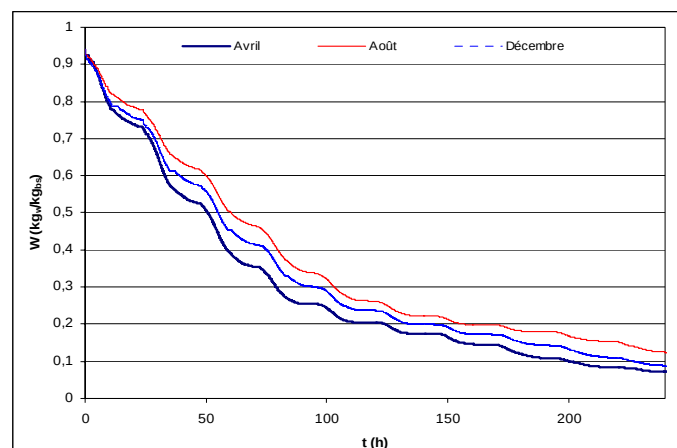


Figure 5.17. Variation saisonnière du temps de séchage d'une pile de bois (avec stockage)

Les mois d'août et décembre (respectivement le plus humide et le plus froid) présentent des temps de séchage plus longs par rapport au mois d'avril. On voit que le temps de séchage est plus affecté par la quantité d'humidité de l'air du mois d'août que pour les basses températures du mois de décembre. Néanmoins, le temps de séchage est pratiquement le même pour ce deux mois. Le gain en temps de séchage pour le mois d'avril, est de l'ordre de plus de 20% par rapport à août et décembre à la teneur en eau d'usage. Le tableau 5.7 résume les temps de séchage obtenus.

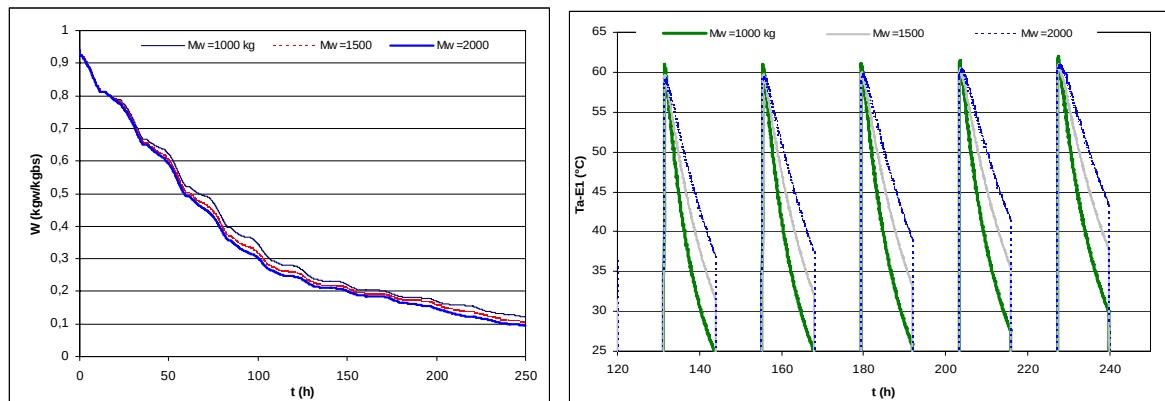
Tableau 5.7. Temps de séchage selon la saison de l'année.

| Critère                                | Avril   | Août     | Décembre |
|----------------------------------------|---------|----------|----------|
| tS avec stk (h)                        | 180     | 240      | 205      |
| $W_f=0,12 \text{ kg}_w/\text{kg}_{bs}$ | (8 j)   | (10 j)   | (9 j)    |
| tS sans stk (h)                        | 230     | 302      | 370      |
| $W_f=0,12 \text{ kg}_w/\text{kg}_{bs}$ | (9,6 j) | (12,6 j) | (15,4 j) |

#### 5.2.4.6 Influence de la masse d'eau

Maintenant, nous représentons sur la figure (5.18) l'influence de la masse d'eau de stockage sur les températures de sortie de l'échangeur et sur les temps de séchage. Nous considérons les pires conditions de séchage (mois d'août) et les paramètres suivants :

$$U_{a-pb}=1 \text{ m.s}^{-1}, \tau_r=30\%, \tau_r N=5\%, A_{cap}=30 \text{ m}^2, A_{capw}=10 \text{ m}^2.$$

Figure 5.18. Influence de la masse d'eau de stockage sur  $T_{a-E1}$ 

La variation de la masse de stockage est un paramètre influent sur le temps de séchage. Nous constatons un gain de temps de 1 jour pour l'utilisation d'une masse d'eau de 2000 kg au lieu de 1000 kg. Il reste à vérifier si le gain de temps de séchage est suffisant pour justifier le surcoût induit par l'utilisation de deux échangeurs stockeurs et par le doublement des capteurs à eau.

En ce qui concerne la température de sortie de l'échangeur ( $T_{a-E1}$ ), nous allons considérer la fin du séchage car, c'est à ce moment là que la température de l'air joue un rôle plus important. En se plaçant au 6<sup>ème</sup> jour de séchage, nous constatons que la température de sortie de l'échangeur est de l'ordre de 60% plus importante à une masse d'eau de 2000 kg par rapport à une  $M_w=1000$  kg.

Les VCo imposées du stockeur amènent à une masse de stockage de 1000 kg et que le gain de temps est d'un jour en utilisant une  $M_w = 2000$  kg, ce qui correspond à l'utilisation de deux échangeurs-stockeurs de 1000 kg. Nous considérons un investissement initial du séchoir de \$320000 ( $M_w=1000$ kg). Le surcoût pour une masse de 2000 kg est de \$12800. Nous analysons la possible rentabilité de cette configuration en conclusion de la partie 5.3.5.

## 5.3 Conduite optimisée du séchoir

### 5.3.1 Séchoir de référence

Le séchoir que nous venons de simuler a été fixé à partir des VCo, des VA et VPi suivantes :

Unité de séchage (pile de bois) :  $L_{pb}=1,6$  m,  $l_{pb}=2,5$  m,  $H_{pb}=2,16$  m.

Unité de chauffage (capteur solaire à air) :  $L=10$  m,  $l=3$  m,  $A_{cap}= 30$  m<sup>2</sup>

Unité de stockage (échangeur stockeur) :  $D_c= 1$  m,  $H=1$  m,  $N_t=700$ ,  $M_w =1000$  kg,  $A_{capw}= 10$  m<sup>2</sup>

Les VA :  $U_{a-pb}= 1$  m.s<sup>-1</sup>

Les VPi :  $\tau_r = 30\%$ ,  $\tau_r N= 5\%$  (cas du stockage)

### 5.3.2 Qualité de séchage

Comme on l'avait déjà évoqué au chapitre 1, la **qualité de séchage** peut se définir comme, l'absence des fentes (internes et externes) et déformations (tuilage, voilement, gauchissement, etc.) sur le bois. On peut agir sur la qualité par la maîtrise des conditions d'air de séchage.

Dans notre cas de séchage solaire, on utilise les variables de pilotage (VPi) à savoir ; le taux de renouvellement d'air,  $\tau_r$  et le taux de mélange dans le séchoir,  $\tau_m$  pour agir sur les conditions de température et humidité relative de l'air lors du processus.

#### 5.3.2.1 Notion de Point de Saturation des Fibres, PSF

Dans le domaine du séchage, nous considérons trois formes d'eau contenue dans les cellules du bois : de l'eau liquide, en remplissant partiel ou totalement les espaces vides,

appelée couramment de *l'eau libre* ; de la vapeur d'eau dans les cavités vides et, de l'eau contenue dans les parois cellulaires aussi connue comme de *l'eau liée*, [Sia84].

La variation de la teneur en eau dans le domaine de l'eau libre ( $W_i$  à 0,30 kg<sub>w</sub>/kg<sub>bs</sub>) n'a aucune influence sur les propriétés du bois, alors que, l'évacuation de l'eau liée ( $W \leq 0,30$  kg<sub>w</sub>/kg<sub>bs</sub>) entraîne, le retrait des fibres du bois et la possibilité d'apparition des défauts liés au séchage. Cette teneur en eau critique est appelée communément le point de saturation des fibres, PSF.

Le point de saturation des fibres, PSF, correspond à la teneur en eau où les cavités cellulaires du bois sont vidées d'eau liquide alors que, les parois sont saturées en humidité, [Ska84]. Cela entraîne que la présence ou absence d'eau liquide dans les cavités cellulaires n'affecte pas les propriétés mécaniques du bois. Selon l'essence de bois la valeur de la teneur en eau au point de saturation des fibres, peut varier entre, 0,20 et 0,40 kg<sub>w</sub>/kg<sub>bs</sub>, [Ska98] et entre 0,25 et 0,35 kg<sub>w</sub>/kg<sub>bs</sub> [Jol80]. Stamm cité par Siau, [Sia84] interprète le PSF comme la teneur en eau à laquelle, les propriétés physiques du bois sont sévèrement affectées, (manifestation du retrait, des contraintes mécaniques, affectation de la conductivité électrique, thermique et d'humidité). Dans ce contexte, Siau, [Sia84] propose de considérer une teneur en eau moyenne de 0,30 kg<sub>w</sub>/kg<sub>bs</sub> pour les bois des régions tempérés, (cas du pin).

Sachant que le bois est un matériau très hétérogène, la distribution de l'eau dans celui-ci est irrégulière, d'ailleurs, on sait que lors de l'évaporation de l'eau, les planches n'atteignent pas le PSF au même moment.

### 5.3.2.2 Relation air de séchage et qualité

#### 5.3.2.2.1 Température de l'air de séchage

Une température de l'air trop élevée peut être la cause de l'apparition des défauts prématurés de séchage, à savoir, les fentes à la surface, le collapse et la cémentation lorsque le bois est dans le domaine de l'eau libre. En séchage solaire, le paramètre température de l'air ne peut être contrôlé que via l'utilisation de l'unité de stockage d'énergie ou par le taux de renouvellement d'air.

##### 5.3.2.2.1.1 Humidité relative de l'air de séchage

En première phase de séchage, il est très important d'utiliser des humidités de l'air importantes afin de ne pas créer des conditions trop rigoureuses. Il faut rappeler que des faibles humidités confèrent à l'air un pouvoir d'évaporation important donc, la surface du produit va sécher très rapidement, cette surface durcie peut provoquer un blocage de la circulation de l'eau (défaut de cémentation). Puis, le front de séchage se déplace vers le centre

du matériau et la production de vapeur augmente la pression interne en provoquant l'effondrement des parois (défaut de collapse), [Nad95]. En deuxième phase de séchage, il convient de maintenir l'humidité relative de l'air élevée tant que le centre des planches n'a atteint le PSF.

### 5.3.2.3 Relation conduite de séchage et qualité du bois

La conduite de séchage fait référence à une série d'étapes permettant de gérer les conditions de température et d'humidité de l'air dans le séchoir, afin de faciliter la circulation de l'eau contenue dans le bois. Des courts temps de séchage entraînent des conditions sévères de séchage qui sont l'origine fréquente des défauts. Néanmoins, la conduite optimale considère un compromis entre temps de séchage et dégradation minimale. Le résultat, est la définition de la cinétique de séchage, réalisée sous des conditions « maîtrisées ».

Du point de vue qualité de séchage, nous étudions les relations existantes entre les différentes étapes de la conduite et les phases de la cinétique de séchage. Cette dernière est donc décrite, en considérant les phénomènes qui ont lieu dans le bois lors du séchage.

**Phase 1.** La surface des planches est alimentée en eau liquide. Il n'y a pas de contraintes de séchage. Les contraintes de séchage sont la conséquence de la rétractabilité du bois. Ce phénomène ne se produit qu'en-dessous du PSF. Néanmoins, l'application de températures de l'air trop élevées et d'humidités peu importantes causerait des défauts prématurés à savoir la cémentation et le collapse. Ces anomalies peuvent être évitées en imposant des températures faibles et des humidités importantes au moins jusqu'au PSF.

**Phase 2.** La zone d'évaporation « front de séchage » se déplace de la surface vers l'intérieur du matériau. Il n'y a plus d'eau liquide en surface, mais il en reste encore au centre des pièces. Les zones périphériques sont soumises au retrait, alors que, les zones internes subissent peu de changement. Ces zones internes ne permettent pas d'exercer le retrait librement aux zones externes. En deuxième phase de séchage on trouve alors les zones périphériques soumises à des contraintes de traction alors que, les zones internes sont en compression. Pendant cette phase, il est très important de maintenir des humidités de l'air importantes tant que le centre du matériau n'a pas atteint le PSF. Si les contraintes de traction sont supérieures à la résistance à la traction du bois, il se produira la formation des fentes en surface.

**Phase 3.** Inversion de contraintes, les zones internes sont maintenant soumises à des contraintes de traction. Si celles-ci sont supérieures à la résistance à la traction de bois, il se produit des fentes internes, résultat de l'utilisation d'un air très sec en deuxième phase de

séchage avant que le centre du matériau atteigne le PSF. Il est alors très important d'utiliser de l'air très humide jusqu'à ce que les zones internes atteignent le PSF, en deuxième phase, [Ale02].

### **5.3.3 Optimisation de la qualité de séchage solaire**

#### **5.3.3.1 Logique de conduite du séchoir**

Dans notre logique, nous utilisons la variable de pilotage, taux de renouvellement de l'air  $\tau_r$ , pour gérer les conditions d'humidité et température de l'air à l'intérieur du séchoir. Selon la teneur en eau de la pile de bois, nous agissons sur  $\tau_r$  afin d'humidifier ou de déshumidifier l'air de la chambre. L'utilisation de l'unité de stockage d'énergie permet la gestion de la température de l'air de séchage principalement la nuit. La conduite ainsi estimée prend en compte 3 phases de séchage : une phase correspondante à l'évacuation de l'eau libre ( $W > \text{PSF}$ ) ; une phase lors du passage par le PSF ( $0,25 < W < 0,35 \text{ kg}_w/\text{kg}_{bs}$ ) et la phase d'élimination de l'eau liée.

Etant donné que les conditions de l'air dans un séchoir solaire sont très douces, on part de la conduite de séchage la plus rapide. Puis, on ralentit le séchage dans la plage  $0,25 < W < 0,35 \text{ kg}_w/\text{kg}_{bs}$ . Pour cela, on fixe une vitesse de séchage pour laquelle, nous considérons que les contraintes de séchage dans le bois ne l'endommagent pas.

Nous estimons la valeur de cette vitesse en considérant, plusieurs cinétiques expérimentales appliquées au bois du pin maritime, [Nad95, Col93]. Puis, nous vérifions que la valeur obtenue tombe dans la plage des essais utilisés pour la détermination de la CCS. Le seuil de la vitesse de séchage, garant de la qualité, ainsi calculé, vaut :

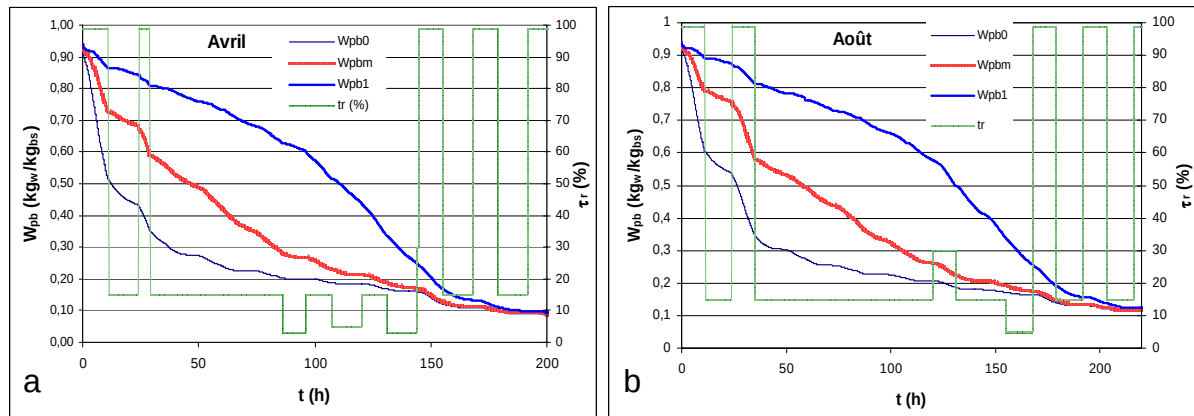
$$\frac{dW}{dt} = 0,01 \text{ kg}_w \cdot \text{kg}_{bs}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}.$$

#### **5.3.3.2 Conduite pour un séchage de qualité en Avril et Août**

Les figures 5.19 et 5.20, présentent deux scénarios de séchage. On montre le résultat de deux conduites simulées pour deux mois représentatifs, (avril et août). La première conduite considère le fonctionnement du séchoir solaire sous des conditions de  $\tau_r$  variables ainsi que le déstockage nocturne. La deuxième, considère un déstockage journalier et nocturne (15h et 8h) et le taux de renouvellement d'air variable.

Les simulations ont été réalisées avec :  $A_{\text{cap-a}}=30 \text{ m}^2$ ,  $A_{\text{cap-w}}=10 \text{ m}^2$ ,  $M_w=1000 \text{ kg}$  et  $U_{a-pb}=1 \text{ m.s}^{-1}$ .





**Figure 5.19. Simulation du séchage solaire, prise en compte de la qualité de séchage, ( $\tau_r$  var + stk,N)**

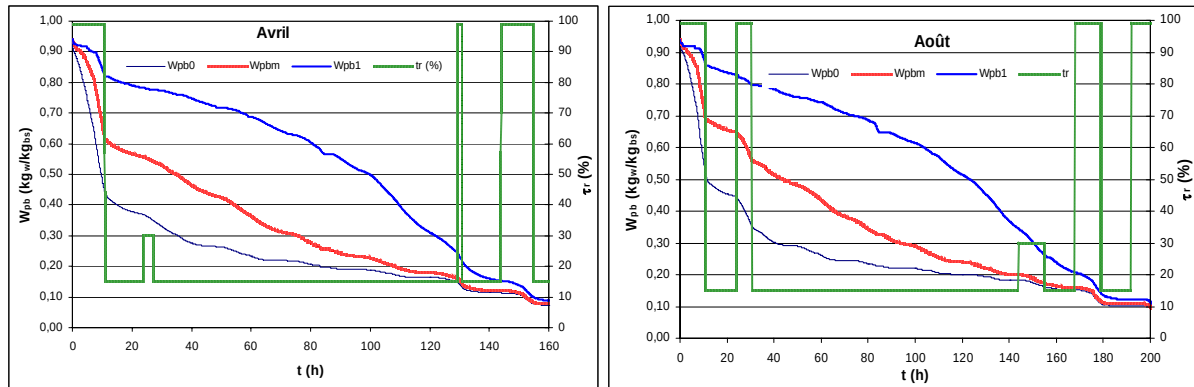
Au début du séchage, on impose des conditions sévères. On rappelle que dans cette phase, il peut se manifester les défauts prématurés de séchage. Néanmoins, les températures atteintes dans un séchoir solaire ne sont pas assez importantes pour nuire au bois.

Entre 0,25 et 0,35  $\text{kg}_w/\text{kg}_{bs}$ , on respecte le seuil de qualité imposé. On gère  $\tau_r$  pour que la vitesse de séchage ne dépasse pas la valeur de 0,01  $\text{g}_w/\text{kg}_{bs}.\text{h}$ . La fermeture partielle des trappes empêche l'échange d'air avec l'extérieur en générant une réduction de la vitesse de sortie de l'eau. Ce ralentissement permettra au bois d'exercer les contraintes de séchage sans que cela représente un risque pour sa qualité. A  $W=0,25 \text{ kg}_w/\text{kg}_{bs}$ , nous considérons que toute la pièce de bois est dans le domaine hygroscopique. L'augmentation de  $\tau_r$  permettra une accélération de la vitesse de séchage.

A la fin du processus, on accélère la vitesse de séchage en établissant des fortes conditions de l'air. Dans cette phase finale, le taux de renouvellement est de 100% le jour. Les importants taux de renouvellements utilisés à la fin du séchage permettent l'établissement des conditions de l'air de séchage proches des conditions de l'humidité d'équilibre du bois.

On n'utilise pas le déstockage lors du passage par PSF. On ne se sert que de  $\tau_r$  afin de créer des conditions d'humidité de l'air en accord avec le seuil de qualité.

Le cas 2 montre deux scénarios de séchage (figure 5.20) dans lesquels nous considérons le début du déstockage à partir de 15h et jusqu'à 8h du lendemain.



**Figure 5.20. Simulation du séchage solaire, prise en compte de la qualité de séchage, ( $\tau_r$  var +  $\tau_r$  N + stk j, N)**

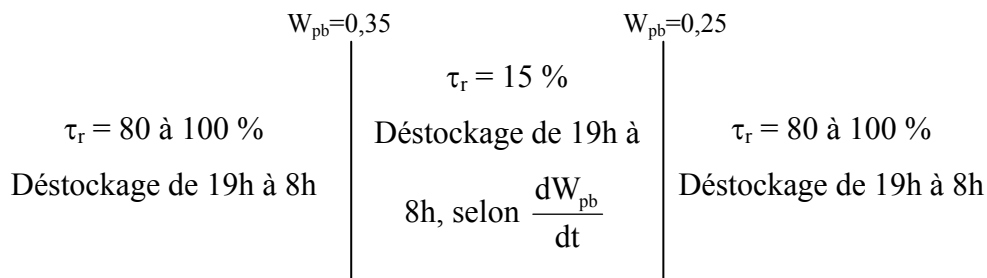
Le déstockage journalier est utilisé au début et à la fin du séchage pendant cette période, on observe un séchage rapide puis, le déstockage journalier est utilisé selon la teneur en eau de la pile dans la plage de teneur en eau critique. La conduite est plutôt gérée à l'aide de  $\tau_r$ . La maîtrise de l'humidité relative de l'air lorsque le bois atteint le PSF permet de sécher le bois en respectant le seuil de qualité considérant toutes les planches de la pile.

Dans les deux cas, on remarque que lors du passage par la plage de teneur en eau critique ( $0,25 < W_{pb} < 0,35 \text{ kg}_w/\text{kg}_{bs}$ ) le taux de renouvellement d'air reste quasiment constant. Le ralentissement du séchage des premières planches prolonge le temps de séchage. On propose comme solution, la variation du débit d'air dans l'échangeur afin de contrôler les conditions de l'air et en même temps, la gestion de la conduite par le biais de  $\tau_r$  et du déstockage.

### 5.3.3.3 Tables de conduite de séchoir pour la qualité

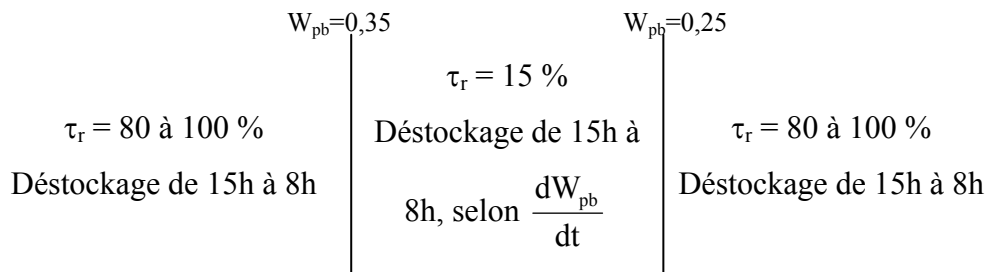
On a établi deux conduites avec lesquelles on réussit à imposer des conditions douces lors du séchage de bois afin de respecter le seuil de qualité de séchage. La première correspond à l'utilisation du  $\tau_r$  variable (jour et nuit) et le déstockage nocturne (début à 19h). Cette conduite a été nommée  **$\tau_r$  et  $\tau_r$ N var + stk(N)**. La seconde conduite utilise aussi des  $\tau_r$  variables et un démarrage du déstockage à partir de 15h et jusqu'à 8h du lendemain. Il s'agit de la conduite  **$\tau_r$  et  $\tau_r$ N var+stk(j,N)**.

Conduite de séchage  $\tau_r$  et  $\tau_r N$  var + stk(N).



Cette conduite est applicable aux deux mois représentatifs. Les modifications de  $\tau_r$  dans la plage de 0,25 à 0,35 dépendent de la teneur en eau de la rangée correspondante et des conditions météorologiques du mois choisi.

Conduite de séchage  $\tau_r$  et  $\tau_r N$  var + stk(j,N).



Dépendant du mois en question, on peut accélérer ou ralentir la vitesse de séchage en modifiant la valeur de  $\tau_r$  dans le but d'atteindre le seuil de qualité imposé. Il peut arriver que dans la plage critique de teneur en eau (0,25 à 0,35) les conditions de l'air obligent à arrêter le déstockage car son utilisation, rend la vitesse de séchage au dessus de seuil de qualité.

### 5.3.4 Optimisation du temps de séchage

L'optimisation du temps de séchage consiste à trouver la conduite la plus rapide pour sécher le bois. Cela entraîne de mettre en place des conditions de séchage très sévères, afin d'accélérer au maximum la vitesse de sortie de l'eau.

Sur la figure 5.21, nous présentons deux simulations (première rangée de planches) issues de deux conduites différentes pour le mois d'août. Dans un premier temps, on simule le séchage sans considérer le critère d'appréciation qualité de séchage. Puis, nous comparons cette courbe avec les simulations « séchage avec qualité », (figures 5.21a et 5.21b). Les simulations ont été réalisées avec :  $A_{cap-a}=30 \text{ m}^2$ ,  $A_{cap-w}=10 \text{ m}^2$ ,  $M_w=1000 \text{ kg}$  et  $U_{a-pb}=1 \text{ m.s}^{-1}$ .

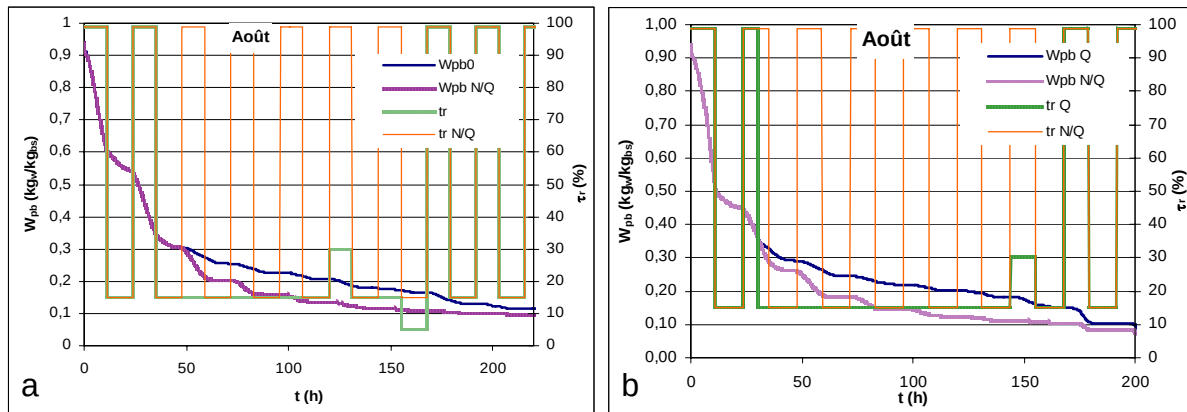


Figure 5.21. Optimisation du temps de séchage, mois d'août

Dans les deux cas, le séchage démarre sous des fortes conditions de séchage. Puis, on note le ralentissement de la vitesse lorsque l'on considère le critère « qualité de séchage ». Il est moins évident pour le cas « a » à la fin du processus on note que les deux courbes se rapprochent. Cela veut dire, que grâce à l'unité de stockage d'énergie, on réussit à rattraper le temps perdu lors du ralentissement. L'utilisation des conditions sévères de l'air, permet de réduire jusqu'à 17% le temps de séchage pour le mois d'août alors que pour avril il n'y a pas de différence. On réduit alors le temps de séchage mais, on dégrade la qualité du bois.

Sur la figure 5.21b, le ralentissement est plus évident. L'utilisation du déstockage journalier et des  $\tau_r$  variables en première et dernière phase, réduit les temps de séchage jusqu'à 30%, bien sur, au détriment de la qualité du bois. On définit un temps moyen de séchage comme étant la moyenne des temps obtenus en Avril et Août. Le tableau 5.8 recense les temps de séchage globaux obtenus lors des simulations.

Tableau 5.8. Temps de séchage moyen pour différentes conduites du séchoir solaire

| Conduite de séchage |         | Séchage sans stk             | Séchage stk (N) + $\tau_r$ var      | Séchage stk (j-N) + $\tau_r$ var      |
|---------------------|---------|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| VPI                 |         | $\tau_r$ fixe $\tau_r N = 0$ | $\tau_r$ et $\tau_r N$ var + stk(N) | $\tau_r$ et $\tau_r N$ var + stk(j,N) |
| tS <sub>Q</sub>     | (jours) |                              | 7,4                                 | 6,9                                   |
| tS <sub>N/Q</sub>   | (jours) | 13                           | 4,4                                 | 4                                     |

tS : temps de séchage, Q : qualité, N/Q : non qualité, j : jour, N : nuit

L'estimation des temps de séchage permet d'évaluer le séchoir du point de vue économique, en considérant, un certain volume de bois à sécher, un prix de vente du bois sec, en fonction des investissements initiaux.

L'optimisation du temps de séchage est bien évidente lorsque l'on utilise le déstockage journalier et des  $\tau_r$  variables. Ainsi, on réussit à sécher le bois en quelques jours néanmoins, on obtient un séchage sans qualité.

### 5.3.5 Optimisation des coûts de possession du séchoir solaire

#### 5.3.5.1 Temps moyen de séchage et volume annuel séché

On a défini un temps moyen de séchage comme étant la moyenne des temps obtenus en Avril et Août, on peut ainsi évaluer le volume annuel séché. Ces temps et volumes sont récapitulés dans le tableau 5.9 :

Tableau 5.9. Temps de séchage moyen et volume annuel séché

|                                                                                     | tS        | Piles par an | Volume annuel séché |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------|---------------------|
| Séchage qualité<br>1000 kg<br>$\tau_r$ et $\tau_r N \text{ var} + \text{stk}(N)$    | 7,4 jours | 49           | 212 m <sup>3</sup>  |
| Séchage qualité<br>1000 kg<br>$\tau_r$ et $\tau_r N \text{ var} + \text{stk}(j, N)$ | 6,9 jours | 53           | 223 m <sup>3</sup>  |
| Séchage qualité<br>2000 kg                                                          | 6,4 jours | 57           | 247 m <sup>3</sup>  |
| Non qualité                                                                         | 4,4 jours | 83           | 359 m <sup>3</sup>  |

#### 5.3.5.2 Rentabilité de la qualité

Si on estime, comme précisé en annexe 4, que l'on peut vendre une pile de bonne qualité 15% plus cher, on s'aperçoit qu'il est difficile de rentabiliser le séchage de bonne qualité.

En effet, la sous production est de 112 m<sup>3</sup> (31%) pour un stockage de 2000 kg et de 147 m<sup>3</sup> (41%) pour un stockage de 1000 kg ce qui n'est pas récupéré par le surplus de marge de 15%.

Il faudrait évaluer le taux de rebut et comparer les volumes de bois hors qualité.

#### 5.3.5.3 Durée de récupération des investissements

Nous analysons les deux cas étudiés précédemment (optimisation des temps de séchage) et un cas où le séchoir n'est pas optimisé (séchage sans stockage).

Dans un premier temps, nous considérons le fonctionnement du séchoir solaire sans unité de stockage d'énergie. Le temps moyen de séchage sous ces conditions est de 13 jours, soit 120 m<sup>3</sup> de bois séché par an. Cette simulation ne prend pas en compte la gestion de la

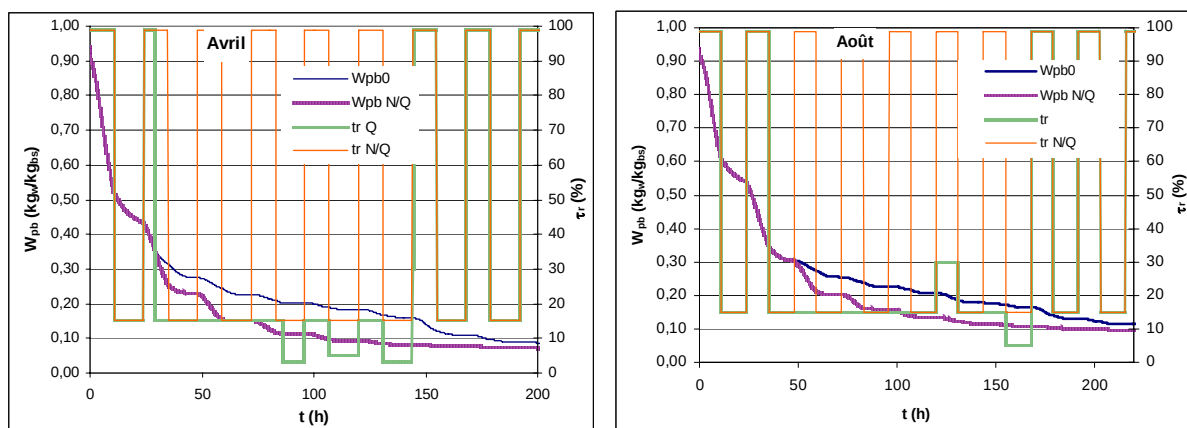
qualité du bois. On trouve alors un temps de récupération sur les investissements de 16,35 ans si l'investissement initial est de \$273000 pesos mexicains, (16700 €). Le système est alors estimé **non rentable**.

Nous partons des scénarios de séchage définis dans le paragraphe 5.3.3. Nous présentons deux simulations pour chacun des mois représentatifs, (avril et août). Pour l'analyse de la rentabilité du séchoir, nous prenons en compte le temps de fonctionnement du séchoir ainsi que, le volume et qualité du bois séché par an.

Pour l'optimisation des coûts, nous considérons :

- Un séchoir solaire avec une capacité utile de 4,32 m<sup>3</sup> de bois de 27 mm.
- Le nombre de piles séchées par an.
- Un investissement initial en fonction des coûts de construction et d'opération.
- Une augmentation annuelle du prix du bois et des charges variables de 10%.

On prend en compte la gestion de la qualité de séchage et l'optimisation des temps de séchage. Deux simulations sont analysées sous les conditions de fonctionnement du séchoir : Conduite  $\tau_r \text{ var} + \tau_r N \text{ var} + \text{stk } N$ , (figure 5.22).



**Figure 5.22. Rentabilité du séchoir et temps de séchage,  $\tau_r \text{ var} + \tau_r N \text{ var} + \text{stk } N$**

Le respect du seuil de qualité et la considération d'un temps moyen annuel de séchage sous cette conduite, nous amène à :

- pour la situation de séchage avec qualité (stockage 1000kg), le temps de retour sur les investissements est de l'ordre de  $\text{DRI}_Q = 4$  ans et 6 mois si l'on tient compte d'un investissement initial de \$320000 (pesos mexicains). Le seuil de rentabilité est atteint autour du sixième mois.

- maintenant, si l'on ne tient pas compte de la qualité du produit, considérant un prix de vente du bois sans qualité de 15% de moins par rapport au bois de qualité, nous obtenons :  $\text{DRI}_{N/Q} = 1$  ans et 11 mois.

La figure 5.23 montre la conduite de séchage  $\tau_r \text{ var} + \tau_r N \text{ var} + \text{stk } j, N$  pour les mois représentatifs.

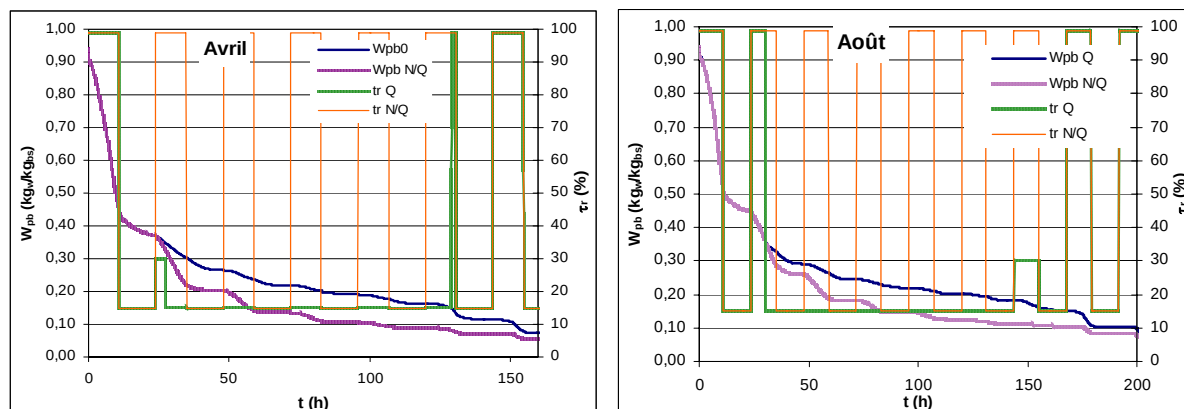


Figure 5.23. Rentabilité du séchoir et temps de séchage,  $\tau_r \text{ var} + \tau_r N \text{ var} + \text{stk } N, j$

Ces conditions permettent d'encore augmenter la rentabilité du séchoir par rapport au cas précédent. En considérant des temps de séchage globaux (6,9 jours) et le respect de la qualité du produit, on obtient un DRI de 3 ans. C'est-à-dire, on réalise le séchage de 53 piles de bois soit un volume de 229 m<sup>3</sup>. Le seuil de rentabilité est atteint en 5 mois. Pour la non qualité le DRI est réduit à 1 an 4 mois malgré la réduction du prix de vente. Le séchoir est donc extrêmement rentable si l'on sèche sans qualité.

Le tableau 5.10 résume les temps de séchage globaux et les variables économiques obtenues.

Tableau 5.10. Résumé des temps de séchage globaux et les variables économiques considérées.

| Conduite de séchage |         | Séchage sans stk                    | Séchage Stk (N) + $\tau_r \text{ var}$          | Séchage stk (j-N) + $\tau_r \text{ var}$                       |
|---------------------|---------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| VPI                 |         | $\tau_r \text{ fixe } \tau_r N = 0$ | $\tau_r + \tau_r N \text{ var} + \text{stk}(N)$ | $\tau_r \text{ var} + \tau_r N \text{ var} + \text{stk}(j, N)$ |
| I                   | (\$)    | 273000                              | 320000                                          | 320000                                                         |
| tS <sub>Q</sub>     | (jours) |                                     | 7,4                                             | 6,9                                                            |
| SR <sub>Q</sub>     | (mois)  |                                     | 6                                               | 5                                                              |
| DRI <sub>Q</sub>    | (ans)   |                                     | 4,5                                             | 3                                                              |
| tS <sub>N/Q</sub>   | (jours) | 13                                  | 4,4                                             | 4                                                              |
| SR <sub>N/Q</sub>   | (mois)  | 17,32                               | 3,18                                            | 2,83                                                           |
| DRI <sub>N/Q</sub>  | (ans)   | 16,35                               | 1,92                                            | 1,33                                                           |

I : investissement, SR : seuil de rentabilité ; DRI : temps de récupération sur les investissements

### 5.3.5.4 Conclusion sur la rentabilité

Du point de vue économique, une conduite de séchage n'est optimisée que si le temps de séchage et la DRI sont minorés. Il s'agit de maîtriser les variables de pilotage du séchoir ( $\tau_r$  et  $\tau_r N$ ), ainsi que le déstockage d'énergie, pour améliorer nos indicateurs.

L'étude des DRI montre que l'utilisation du stockage, malgré un surinvestissement, permet de rapidement récupérer son investissement. En effet, selon la conduite, les DRI sont réduits de 8 à 12 fois, ce qui est vraiment important.

Par contre, on ne peut jouer sur l'amélioration de la qualité pour diminuer encore ce temps de retour. Cependant, pour réduire le temps de séchage dans ce cas, nous avons proposé de doubler la masse d'eau stockée et de la porter à 2000 kg, soit 2 échangeurs-stockeurs que nous pouvons toujours placer sous le capteur à air. Le temps de récupération des investissements est alors réduit comme le montre la figure 5.24.

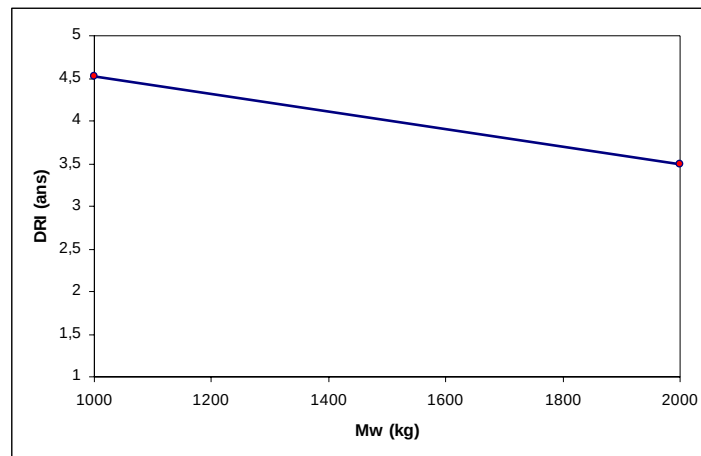


Figure 5.24. Durée de récupération des investissements du échangeur-stockeur

Le DRI d'un seul échangeur-stockeur est de 4 ans 6 mois, considérant que cette solution permet le séchage de 49 piles de bois dans l'année. Nous constatons que l'utilisation de deux échangeur-stockeurs est justifiée car le DRI calculé pour une masse de 2000 kg se réduit à 3 ans, 6 mois et que cette solution permet le séchage de 57 piles de bois. Sous ces conditions, le séchoir peut devenir rentable si l'on compare le nombre de planches récupérées (taux de rebut) par rapport à un séchage rapide.

## 5.4 Conclusion

Les simulations réalisées permettent de tirer les conclusions suivantes :

Tout d'abord, pour le fonctionnement du séchoir solaire sans stockage, on a constaté un séchage rapide la journée. La nuit, le séchage est ralenti à cause de la faible température de l'air et au  $\tau_r N$  nul. Néanmoins, la période nocturne pourrait servir à libérer les contraintes de



séchage causées pendant la journée. Le lendemain, la température de l'air dans la chambre est relativement basse ce qui entraîne, une période de réchauffage au début de la journée et ce qui causerait une prolongation du temps de séchage.

En revanche, pour le fonctionnement du séchoir avec stockage, on voit que la courbe de la teneur en eau descend de manière relativement uniforme. L'intégration de l'unité de stockage permettra alors la diminution des temps de séchage et en même temps d'envisager la maîtrise de la qualité du bois à travers son pilotage.

On aboutit à la simulation de fonctionnement du séchoir solaire pour ces deux situations de vie pertinentes. Cela a permis l'établissement de scénarios de séchage en fonction des conditions météorologiques saisonniers et des variables de conception et de pilotage imposées.

Nous constatons que l'utilisation du stockage permet des temps de séchage plus courts par rapport au séchage sans stockage, pour le mois d'août le gain est de 6 jours. La masse de stockage considérée est suffisante pour sécher le volume de bois envisagé lors des simulations, néanmoins, avec une masse de 2000 kg, les temps sont encore réduits.

La gestion de la conduite de séchage est possible par le biais du taux de renouvellement d'air  $\tau_r$ , cette variable de pilotage permet aussi la gestion de la qualité de séchage. La qualité de séchage est atteinte lorsque l'on arrive à adoucir les conditions de séchage lors du passage de teneur en eau du bois ( $0,25 < W_{pb} < 0,35 \text{ kg}_w/\text{kg}_{bs}$ ) zone de risque pour l'apparition des défauts de séchage.

L'optimisation du temps de séchage peut se réaliser en jouant sur les paramètres  $\tau_r$  et  $\tau_r N$  ainsi que sur l'utilisation du déstockage journalier et nocturne. En contrepartie, on dégrade la qualité du bois car les temps les plus courts sont obtenus avec des fortes conditions de séchage.

Le séchage sans stockage induit des DRI très longues ce qui fait que le séchoir solaire n'est pas rentable avec cette solution. Par contre, l'utilisation du stockage réduit la DRI d'un facteur 8 à 12 en réduisant un temps global de séchage (avec stockage) à 4,4 jours, on réussit à récupérer les investissements au bout de 1 ans et 11 mois et même avec une conduite plus rude jusqu'à 1 an et 4 mois.

La maîtrise de la qualité ne peut permettre d'améliorer la rentabilité, nous proposons alors de d'aller plus loin en rentabilisant sur le nombre de planches de bonne qualité et non sur une augmentation forfaitaire du prix de vente.

## 6 Conclusion Générale

### 6.1 La démarche de conception

Le document issu de cette étude, décrit le fonctionnement d'un séchoir solaire conçu à partir de l'application d'une démarche globale de conception, en partant de la conception préliminaire (recherche de concepts et conception architecturale) jusqu'à l'obtention d'un concept détaillé du système. Le résultat concerne un séchoir solaire à bois dimensionné et validé à partir de la modélisation et de la simulation de chacune de ses unités et d'un système global.

La première phase de cette recherche a permis de réaliser une étude détaillée des concepts existants dans le marché du bois (70 références). Puis nous avons analysé les évolutions du séchoir solaire, à partir des *lois d'évolution des systèmes techniques*. Nous proposons, à partir de cette analyse, un concept innovant qui regroupe toutes les possibilités d'amélioration du système. Nous définissons le système retenu à l'aide de l'OTé. Cet outil nous a permis d'identifier les différentes interactions du système avec son milieu environnant et entre les unités elles mêmes. Les unités pertinentes retenues concernent : l'unité de séchage (chambre), l'unité de chauffage (capteur à air), l'unité de stockage (échangeur stockeur) et l'unité de commande. Les milieux extérieurs pertinents sont la météorologie et la planche de bois. Les composants d'interaction sont identifiés, le ventilateur qui relie la chambre de séchage et le capteur et/ou l'échangeur stockeur, une pompe, les conduites et les trappes de renouvellement d'air. La conception détaillée du système est récapitulée sur la figure 6.1.

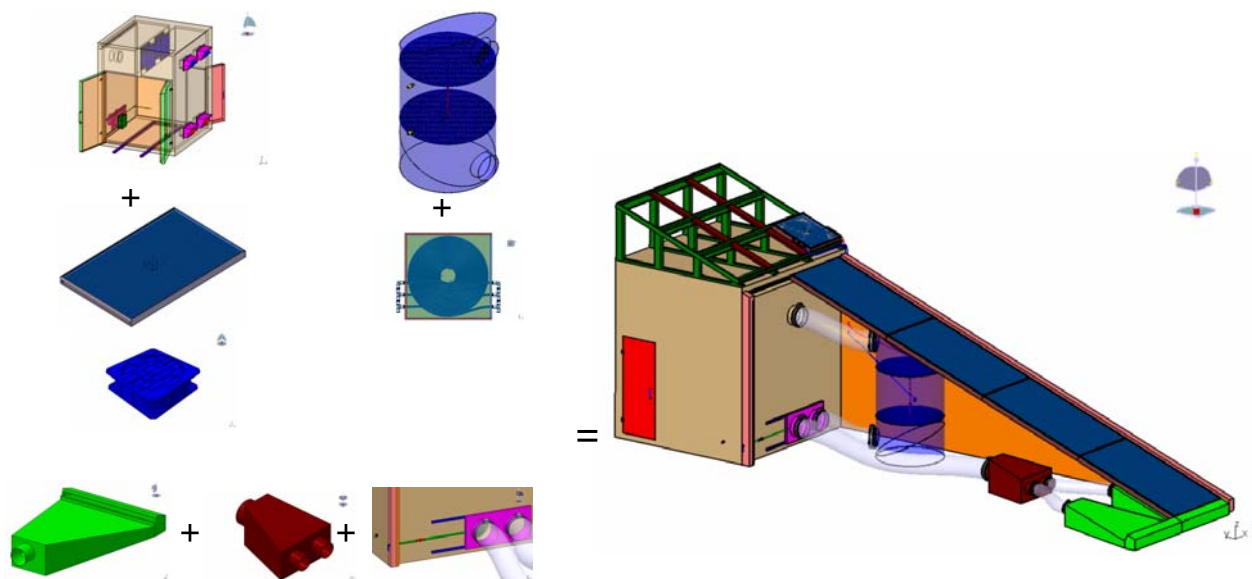
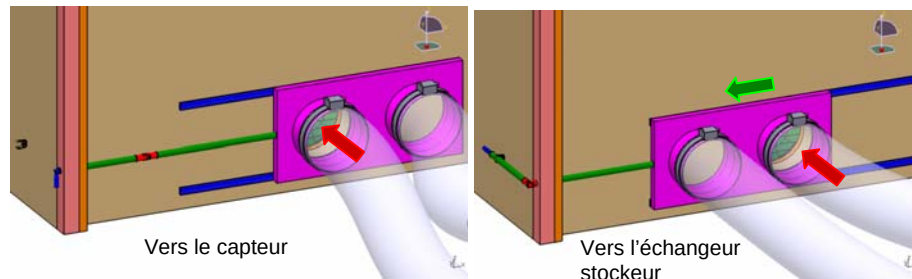


Figure 6.25. Conception détaillée du séchoir solaire

Un détail intéressant mis en place lors du couplage des unités concerne un système glissière qui permet d'envoyer le débit d'air soit vers le capteur à air ou soit vers l'échangeur stockeur. Ce dispositif permet de réaliser ce changement selon les besoins du séchoir, le détail est montré sur la figure 6.2.



**Figure 6.26. Conception détaillée du système « glissière »**

La contribution de cette recherche à la démarche de conception concerne, l'identification des variables de pilotage du système, **V<sub>Pi</sub>**. Elles sont associées aux interactions entre unités ou entre unité et milieu extérieur. Les variables de pilotage sont pertinentes des composants d'interaction. Dans le cas du séchoir solaire, les V<sub>Pi</sub> permettent de gérer la conduite, elles sont dans notre cas le taux de renouvellement d'air  $\tau_r$  et le taux de mélange dans la chambre,  $\tau_m$ . La maîtrise des V<sub>Pi</sub> par les composants d'interaction (ventilateur et trappe) va permettre d'optimiser le temps de séchage, la qualité finale des planches de bois et la durée de retour des investissements.

## 6.2 La modélisation et les résultats

Le fonctionnement de chaque unité du séchoir a été décrit, par des modèles individuels. Le modèle de l'unité de séchage est classique ainsi que le modèle de milieu extérieur « planche de bois ». Ce modèle a été obtenu à partir d'essais de laboratoire et dépouillé selon la technique de la courbe caractéristique de séchage. Pour les autres modèles, nous avons recherché des modèles parcimonieux faisant intervenir les variables de conception du système. Le cas du capteur solaire est intéressant car deux modèles ont été construits, un classique et un parcimonieux à partir du modèle classique. Ce dernier modèle intègre les variables de conception du capteur sa longueur et sa largeur au travers de la variable auxiliaire vitesse de l'air. Le modèle de l'unité de stockage fait intervenir 2 modèles, le modèle de capteur à eau, identique au capteur à air, et le modèle de l'échangeur stockeur dont l'écriture est parcimonieuse par l'utilisation des nombres d'unités de transfert et de l'efficacité de chauffage.

Les modèles parcimonieux sont qualifiés par leur PEPS selon les techniques du TREFLE.

Dans le cas du modèle du milieu extérieur « météorologie », nous avons réussi à représenter les variations de la température et de l'humidité relative journalières horaires à partir de données réelles (Mexico). L'ensoleillement a été calculé à partir des coordonnées géographiques du site et des caractéristiques géométriques des rayonnements solaires.

Ces modèles individuels ont servi à la construction d'un modèle global permettant de constater et simuler le fonctionnement du séchoir solaire pour ses deux situations de vie identifiées lors de l'analyse de besoin.

Du point de vue du fonctionnement du séchoir solaire, la simulation globale permet de tirer les conclusions suivantes :

- Le séchage solaire dépend très fortement des conditions météorologiques extérieures.
- La gestion de la conduite de séchage est possible par le biais des variables de pilotage, taux de renouvellement d'air  $\tau_r$ , et taux de mélange,  $\tau_m$ .
- La masse de stockage considéré (1000 kg) est dans les limites d'être suffisant pour sécher le volume de bois envisagé, néanmoins, avec une masse de 2000 kg d'eau, on réussit à réduire les temps de séchage et à récupérer les investissements en un temps plus court.
- L'utilisation du déstockage jour et nuit ainsi que, des  $\tau_r$  et  $\tau_r N$  variables selon la teneur en eau du bois, permettent de réduire le temps global de séchage jusqu'à 4 jours en respectant les critères d'appréciation imposés mais pas la qualité.

Du point de vue économique, la solution de conception envisagée représente un investissement initial de **\$320000** (19700 €), considérant un seul échangeur stockeur. Cet investissement est récupéré en 4 ans et 6 mois concernant le séchage avec stockage et une conduite de séchage gérant la qualité mais on peut le récupérer en 1 an et 4 mois si l'on ne tient pas compte de la qualité. En revanche, pour le cas du séchoir sans stockage, même si, l'investissement est inférieur au cas précédent, le système est considéré comme non rentable. Le DRI est prolongé jusqu'à 16 ans ce qui représente plus de huit fois le DRI d'un séchoir avec stockage, sans gestion de la qualité et trois fois avec gestion de la qualité.

Le séchoir conçu lors de ces travaux est innovant, rentable et utilisable dans le domaine de séchage de bois au Mexique. Les tables de conduite proposées permettent de

s'assurer la qualité des planches de bois (maîtrise des fentes). Pour le moment, on ne peut assurer la rentabilité de cette conduite particulière sauf si l'on ne peut imposer une méthode de vente qui permet une marge globale de 30% en intégrant la notion de taux de rebut.

### 6.3 Perspectives du projet

Nous devons étudier *l'intégration d'un deuxième échangeur stockeur* car, comme on l'a déjà montré lors de l'analyse de rentabilité du séchoir, il est possible de récupérer les investissements en une période plus courte si le volume de bois séché dans l'année est plus important. Il est alors très intéressant d'évaluer cette solution de conception, par ailleurs, les dimensions du système proposé permettent d'intégrer l'échangeur stockeur 2 sous le capteur à air sans que cela représente un surcoût de terrain. Il reste aussi à résoudre le problème de branchement entre les unités. Concernant la conduite, il est possible d'utiliser chaque échangeur successivement, les deux en même temps (en série ou en parallèle) ou le capteur solaire combiné avec les échangeurs stockeurs. A cette fin, il est nécessaire de réaliser d'autres simulations pour comparer les différentes possibilités.

Ensuite il faut procéder à *la recherche de financement* pour la construction du séchoir solaire. Il faudra chercher des investisseurs privés ou bien des programmes gouvernementaux qui s'intéressent par l'utilisation de l'énergie solaire thermique appliquée à des procédés industriels tels que le séchage du bois.

*La construction et validation expérimentale* du système de séchage doit être réalisée. On mettra en place les conduites de séchage établies lors de la simulation de fonctionnement du séchoir. On réalisera des comparaisons entre les cinétiques expérimentales sur le pilote et le modèle théorique construit. Selon les résultats, nous adapterons les modèles et ainsi, nous contribuerons à la base de connaissances dans le domaine de séchage solaire du bois au Mexique. Etant donné que les conditions de séchage solaire sont très douces, on utilisera cette méthode de séchage pour les essences de bois qui présentent des inconvénients aux températures élevées (cas du chêne et de quelques bois précieux).

Finalement, pour *la commercialisation du séchoir solaire*, il faudra étudier les canaux potentiels de commercialisation du système vers l'industrie du sciage dans le pays.

On peut évoquer d'autres secteurs industriels pour commercialiser notre système. On pourra éventuellement envisager le séchage des produits agroalimentaires avec la solution proposée.

## Nomenclature

| Symboles         | Désignations                                                          | Unités                              |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| A                | Surface d'échange                                                     | $m^2$                               |
| a                | Azimut                                                                | $^\circ$                            |
| B                | Facteur optique du capteur                                            | (-)                                 |
| Cp               | Chaleur massique                                                      | $J.kg^{-1}.^\circ C^{-1}$           |
| d                | Diamètre, <i>Durée du jour</i> , <u>hauteur du passage du capteur</u> | m, h, <u>m</u>                      |
| Dc               | Diamètre de la calandre de l'accumulateur                             | m                                   |
| e                | Epaisseur                                                             | m                                   |
| e <sub>T</sub>   | Espacement transverse des tubes                                       | m                                   |
| ET               | Equation du temps                                                     | h                                   |
| F'               | Facteur d'efficacité du capteur                                       | (-)                                 |
| F''              | Facteur de transfert thermique                                        | (-)                                 |
| F <sub>R</sub>   | Facteur de conductance de l'absorbeur                                 | (-)                                 |
| G                | Irradiation solaire journalière globale                               | $J.m^{-2}.j^{-1}$                   |
| G*               | Densité du flux solaire                                               | $W.m^{-2}$                          |
| G <sub>0</sub>   | Irradiation solaire journalière globale hors atmosphère               | $J.m^{-2}.j^{-1}$                   |
| h                | Coefficient d'échange convectif, <i>Hauteur du Soleil</i>             | $W.m^{-2}.^\circ C^{-1}$ , $^\circ$ |
| H                | Hauteur                                                               | m                                   |
| h <sub>C</sub>   | Coefficient d'échange massique                                        | $m.s^{-1}$                          |
| hp               | Coefficient global de pertes                                          | $W.m^{-2}.^\circ C^{-1}$            |
| HR               | Humidité relative                                                     | %                                   |
| h <sub>r</sub>   | coefficient de transfert radiatif                                     | $W.m^{-2}.^\circ C^{-1}$            |
| i                | Inclinaison du capteur solaire                                        | $^\circ$                            |
| I                | Flux solaire incident sur le capteur, <i>Investissement</i>           | $W.m^{-2}.j^{-1}$ , \$              |
| j                | n° du jour de l'année                                                 | (-)                                 |
| K                | Conductance thermique totale des pertes                               | $W.m^{-2}.^\circ C^{-1}$            |
| k                | Coefficient global d'échange                                          | $W.m^{-2}.^\circ C^{-1}$            |
| L                | Longueur                                                              | m                                   |
| l                | Largeur                                                               | m                                   |
| l <sub>réf</sub> | Longitude de référence du fuseau horaire                              | $^\circ$                            |
| M                | Masse                                                                 | kg                                  |

|                 |                                             |                                                  |
|-----------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| n               | Nombre de tubes                             | (-)                                              |
| NUT             | Nombre d'Unités de Transfert                | (-)                                              |
| p               | Pression                                    | Pa                                               |
| q               | Débit massique                              | kg.s <sup>-1</sup>                               |
| S               | Section de passage                          | m <sup>2</sup>                                   |
| SS              | Durée journalière d'ensoleillement          | h                                                |
| SS <sub>0</sub> | Durée journalière maximale d'ensoleillement | h                                                |
| T               | Température                                 | °C                                               |
| t               | Temps                                       | s                                                |
| TCF             | Temps civil du fuseau                       | h                                                |
| TL              | Temps légal                                 | h                                                |
| TS              | Temps solaire                               | h                                                |
| TU              | Temps universel                             | h                                                |
| U               | Vitesse                                     | m.s <sup>-1</sup>                                |
| V               | Volume                                      | m <sup>3</sup>                                   |
| W               | Teneur en eau                               | kg <sub>w</sub> .kg <sup>-1</sup> <sub>sec</sub> |

| Symboles       | Désignation                                         | Unités                              |
|----------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------|
| β              | Dilatation volumique                                | °C <sup>-1</sup>                    |
| α              | Coefficient d'absorption                            | (-)                                 |
| δ              | Déclinaison                                         | °                                   |
| γ              | Angle d'orientation du capteur solaire avec le Sud  | °                                   |
| σ              | Taux d'ensoleillement                               |                                     |
| ω              | Angle solaire                                       | °                                   |
| ΔH             | Chaleur latente                                     | J.kg <sup>-1</sup>                  |
| ω <sub>l</sub> | Angle solaire au lever du jour                      | °                                   |
| μ              | Viscosité cinématique                               | kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> |
| ρ              | Masse volumique, coefficient de réflexion (capteur) | kg.m <sup>-3</sup>                  |
| Φ              | Densité du flux de chaleur                          | W.m <sup>-2</sup> .°C <sup>-1</sup> |
| φ              | Flux de chaleur                                     | W.m <sup>-2</sup>                   |
| Δp             | Pertes de charge                                    | Pa                                  |
| ε              | Porosité volumique, Efficacité                      |                                     |

|           |                             |                                  |
|-----------|-----------------------------|----------------------------------|
| $\lambda$ | Conductivité thermique      | $\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ |
| $\tau$    | Coefficient de transmission | (-)                              |
| $\tau_r$  | Taux de renouvellement      | %                                |
| $\tau_m$  | Taux de mélange             | %                                |

## Nombre

### adimensionnels

|                    |                                                   |
|--------------------|---------------------------------------------------|
| Module de Colburn  | $J = St Pr^{2/3}$                                 |
| Facteur de Fanning | f                                                 |
| Grashof            | $Gr = \frac{\beta g \rho^2 x^3 (T_p - T)}{\mu^2}$ |
| Nusselt            | $Nu = \frac{hx}{\lambda}$                         |
| Reynolds           | $Re = \frac{Gdh}{\mu}$                            |
| Prandtl            | $Pr = \frac{\mu Cp}{\lambda}$                     |
| Stanton            | $St = \frac{h}{GCp}$                              |

## Indices

|      |                       |
|------|-----------------------|
| 0    | Entrée                |
| 1    | Sortie                |
| a    | Air                   |
| b    | Bois, Fond du capteur |
| c    | Couverture du capteur |
| cap  | Capteur               |
| ch   | Chambre de séchage    |
| cond | Conduction            |
| conv | Convection            |
| E    | Echangeur - Stockeur  |
| ext  | Extérieur             |



|     |                       |
|-----|-----------------------|
| i   | Infrarouges           |
| I   | Isolant               |
| int | Intérieur             |
| p   | Absorbeur             |
| pb  | Pile de bois          |
| r   | Air de renouvellement |
| R   | Radiatif              |
| s   | Radiation solaire     |
| sat | Saturation            |
| stk | Stockage              |
| t   | tubes                 |
| u   | utile                 |
| v   | Vapeur                |
| w   | Eau                   |

## Bibliographie

- [Ade02] ADEME. Manuel pour la conception, le dimensionnement et la réalisation des installations collectives. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. 2002. [http://www.solarmed.net/Training\\_manuals/Manuel\\_formation\\_all.pdf](http://www.solarmed.net/Training_manuals/Manuel_formation_all.pdf)
- [Aha07] Aharwal, K.R.; Gandhi, B.K.; Saini, J.S. Experimental investigation on heat-transfer enhancement due to a gap in an inclined continuous rib arrangement in a rectangular duct of solar air heater. *Renewable Energy*, 2007, in press.
- [Ahm01] Ahmed-Zaïd, A. ; Moulla, A. ; Hantala1, M. S. ; Desmons; J.Y. Amélioration des Performances des Capteurs Solaires Plans à Air: Application au Séchage de l'Oignon Jaune et du Hareng. *Rev. Energie Renouvelable* 2001, 4 (2001), 69-78.
- [Ahm95] Ahmad, A.; Saini, J. S.; Varma, H. K. Effect of geometrical and thermophysical characteristics of bed materials on the enhancement of thermal performance of packed bed solar air heaters. *Energy Convers. Mgmt*, 1995, 36(12), 1185-1195.
- [Ale02] Aleon, D.; Chanrion, P.; Negrie, G.; Perré, P. *Le séchage du bois*. CTBA, 2002. CD-ROM PC.
- [Alk97] Al-Kamil, M., T.; Al-Ghareeb, A. A. Effect of thermal radiation inside solar air heaters. *Energy Convers. Mgmt.*, 1997, 38(14)1451-1458.
- [Aln98] Al-Nimr, M. A.; Damseh, R. A. Dynamic behaviour of baffled solar air heaters. *Renewable Energy*, 1998, 13(2), 153 163.
- [Alm03] Almanza, R.; Callejas, O.; Correa, G.; Flores, V.; Jiménez, G.; Lentz, A.; Martínez, I.; Mazari, L.; Silva, G. *Ingeniería de la energía solar II*. Serie investigación y desarrollo. Instituto de ingeniería de la UNAM. México, D.F. 2003.
- [Alt06] Altuntop, N.; Kilik, Z.; Ozceyhan, V.; Kincay, O. Effect of water inlet velocity on thermal stratification in a mantled hot water storage tank. *Int. Journal Energy Res.*, 2006, 30(2006)163–176.
- [ANES07] Asociación Nacional de Energía Solar. Las Energías Renovables en México. Potencial, Retos y Oportunidades. Foro Consultivo Científico Tecnológico Veracruz, Ver. Nov.16, 2007.
- [Amm03] Ammari, H. D. A mathematical model of thermal performance of a solar air heater with slats. *Renewable Energy*, 2003, 28 (2003), 1597–1615.
- [Ano82] Anon. Solar kiln can dry 3000 bd ft of lumber. *Timber/West*, March, 1982, 2627.

- [Apu07] Apurba, L.; Sainib, J.S.; Solankib S.C. Second law optimization of a solar air heater having chamfered rib–groove roughness on absorber plate. *Renewable Energy*, 2007, 32 (2007), 1967–1980.
- [Are04] Aregba, A.,W.; Nadeau, J.-P. *Evolution des échangeurs AQP*, Rapport interne laboratoire TREFLE-ENSAM, Bordeaux.
- [Bac07] Bacha, H. Ben; Dammakc, T.; Abdalaha, A.A. Ben; Maaleja, A.Y.; Dhiab, H. Ben. Desalination unit coupled with solar collectors and tank: modeling and simulation. *Desalination*, 2007, 206(2007)341–352.
- [Bad08] Badescu V. Optimal control of flow in solar collector systems with fully mixed water storage tanks. *Energy Conversion and Management* 2008, 49 (2), 169–184.
- [Ben03] Benmansour, A. ; Hamdan, M.A.; Bengeud, A. Etude des spécifications d’une unité de stockage d’énergie thermique utilisant un matériau de changement de phase. 16<sup>ème</sup> congrès français de mécanique. Septembre 1-5, 2003.
- [Ber04] Bernard, J. *Génie Energétique. Energie Solaire: Calculs et optimisation*. Ed. Ellipses. 2004.
- [Bia08] Biaoua, A.L.; Bernier, M.A. Achieving total domestic hot water production with renewable energy. *Building and Environment*, 2008, 43(4)651-660.
- [Boi77] Bois, P.J. Constructing and Operating a Small Solar-Heated Lumber Dryer. *Forest Products Utilization: Technical Report No. 7*. USDA Forest Service, Madison, Wisconsin. 1977.
- [Bon07] Bony, J.; Citherlet, S. Numerical model and experimental validation of heat storage with phase change materials. *Energy and Buildings*, 2007, 39(2007)1065–1072.
- [Bud] <http://www.buderus.es>, Espagne
- [Bus01] Buscarlet, C. Chauffe-eau solaire à faible état de l'art. Département développement durable. *Systèmes Énergétiques et Solaires*. Rapport, décembre, 2001.
- [Can05] Canbazoglu S.; Sahinaslan, A.; Ekmekyapar, A.; Aksoy, Y. G.; Akarsu, F. Enhancement of solar thermal energy storage performance using sodium thiosulfate pentahydrate of a conventional solar water-heating system. *Energy and Buildings*, 2005, 37 (2005) 235–242.
- [Cha91] Chanrionn, P. ; Davense, A. *Le séchage des feuillus, une nécessité économique*. CTBA. 1991.
- [Che82] Chen, P. Y. S.; Helmer, W. A.; Roen, H. N.; Barton, D. J.. Experimental solar-dehumidifier kiln for lumber drying. *Forest Products Journal* 1982, 32 (9), 35-41.

- [Cho95] Choudhury C., Chauhan, P. M.; Garg, H. P. Economic Desing of a Rock Bed Storage Divice for storing solar thermal energy. *Solar Energy*, 1995, 55(1) :29-37
- [Cho95] Choudhury, C.; Chauhan, P. M.; Garg, H. P. Desing Curves for Conventional Solar Air Heaters. *Renewable Enery*, 1995, 6(7), 73-749.
- [Col88] Collignan, A. Elaboration et utilisation d'une cinétique de séchage, application au pin maritime. Thèse Université de Bordeaux I, 1998. 139 p.
- [Col93] Collignan, A. ; Nadeau, JP.; Puiggali, JR. Description et analysis of timber drying kinetics. *Drying technology*, 1993. 11(3)489-506.
- [Cou92] Coulibaly, F. B. M.; Amouroux, M. Optimisation de la commande d'un séchoir solaire à bois. *Journal Physique* 1992, 2(1992), 701-714.
- [Cou95] Couture, F. Modélisation fine d'un problème de séchage : Développement et d'outils adaptés. Thèse Université de Bordeaux I, 1995, 121 p.
- [Cro96] Cronin, K.; Norton, B.; Taylor, J. Development of a Simulation Tool to Enable Optimisation of the Energy Consumption of the Industrial Timber-Drying Process. *Applied Energy* 53 (1996) 325-340.
- [Dag85] Daguinet, M. *Les séchoirs solaires : théorie et pratique*. Unesco. 1985
- [Dah98] Dahm, J.; Bales, C.; Lorenz, K.; Dalenback, J.-O. Evaluation of storage configurations with internal heat exchangers. *Solar Energy*, 1998, 62(6)407-417.
- [Day97] Dayan, M. High Performance In Low-Flow Solar Domestic Hot Water Systems. Ph. D. Thesis, University of Wisconsin-Madison, 1997.
- [Dev99] De Vore, J. B.; Denny, G. S.; Harper, T. S. A commercially viable solar wood drying kiln system. *Drying technology*, 1999, 17(1-2), 271-283.
- [Din99] Dincer, I. Evaluation and selection of energy storage systems for solar thermal applications. *International Journal Energy Res.*, 1999, 23(1999)1017-1028.
- [Duf06] Duffie, J.A.; Bechman, W.A. *Solar engineering of thermal processes*, 3rd Ed., John Wiley and Sons, Inc. New Jersey, 2006.
- [Eke99] Ekechukwua, O. V.; Norton, B. Review of solar-energy drying systems III: low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications. *Energy Conversion & Management* 1999, 40 (1999), 657-667.
- [EPA01] Environmental Protection Agency, 2001, <http://www.epa.gov>

- [Ese07] Esen, H. Experimental energy and exergy analysis of a double-flow solar air heater having different obstacles on absorber plates. *Building and Environment*. 2007, in press.
- [Fou93] Fournier, M.; Maurissen, Y. Simulation du fonctionnement de capteurs solaires à air de type tôle et de type absorbeur poreux. *Journal de physique*, 1993, 3(1993), 2249-2260.
- [Fre-s/d] Frei, U. Solar thermal Collectors, state of the art and further development. SPF. s/d.
- [Fre-s/d] Frei, U.; P., Vogelsanger. s/d. Solar thermal system for domestic hot water and space heating. SPF Institut für Solartechnik Prüfung Forschung. <http://www.solarenergy.ch>.
- [Fur05] Furbo, S.; Andersen, E.; Thür, A.; Shah, L. J.; Andersen, K. D. Performance improvement by discharge from different levels in solar storage tanks. *Solar Energy*, 2005, 79 (2005)431–439.
- [Fur05] Furbo, S.; Andersen, E.; Knudsen, S.; Vejen, N. K.; Shah, L. J. Smart solar tanks for small solar domestic hot water systems. *Solar Energy*, 2005 78 (2005) 269–279.
- [Fuwa95] Fuwape, I.A.; Fuwape, J.A. Construction and evaluation of a timber drying solar kiln. *Bioresource technology* 1995, 52(1995), 283-285.
- [Gao07] Gao, W.; Lin, W.; Liu, T.; Xia, C. Analytical and experimental studies on thermal performance of cross-corrugated and flat-plate solar air heaters. *Applied Energy*, 2007, 84 (2007), 425–441.
- [Gou80] Gough, D.K. Timber Seasoning in a Solar Kiln. *Sunworld*, 1980, 4(6), 204-207.
- [Haq01] Haque, M. N.; Langrish, T. A. G. Stack-Wide in the modelling of solar kilns for drying timber. *Drying technology*, 2001, 19(1), 99-114.
- [Haq02] Haque, M.N. Modelling of Solar Kilns and the Development of an Optimised Schedule for Drying Hardwood Timber. PhD Thesis, University of Sydney. Sydney Australia 2002.
- [Heg00] Hegazy, A. A. Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal Solar Air Collectors. *Energy Conversion & Management* 2000, 41(2000), 861-881.
- [Heg99] Hegazy A. A. Optimizing the thermohydraulic performance of flat-plate solar air heaters operating with fixed/variable pumping power. *Renewable Energy*, 1999, 18(1999): 283-304.
- [Heg99] Hegazy, A. A. Optimum channel geometry for Solar Air Heaters of conventional design and constant flow operation. *Energy Conversion & Management* 1999, 40(1999), 757-774.

- [Hom00] Ho-Ming, Y.; Chii-Dong H.; Chi-Yen L. Effect of collector aspect ratio on the collector efficiency of upward type baffled solar air heaters. *Energy Conversion & Management*, 2000, 41 (2000), 971-981.
- [Hov] <http://www.hoval.fr/docs/FR/PdfsInternet/Prosp.SolKit.fr.qxd.pdf>, Suisse
- [lap] <http://www.lapesa.es/pdfs/acsfgaiser.pdf>
- [Iba06] Ibañez, M.; Cabeza, L. F.; Solé, C.; Roca, J.; Nogués, M. Modelization of a water tank including a PCM module. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26 (2006)1328–1333.
- [Ism99] Ismail, K.A.R.; Stuginsky, R. A parametric study on possible fixed bed models for PCM and sensible heat storage. *Applied Thermal Engineering*, 1999, 19 (1999):757-788.
- [Jan03] Jannot, Y. 2003. Thermique solaire. <http://www.librecours.org>
- [Jan06] Jannot, Y. Du séchage des produits alimentaires tropicaux à la caractérisation thermophysique des solides. HDR. Université de Bordeaux I, 2006, 118 p.
- [Jan97] Jannot, Y.; Coulibaly, Y. Radiative heat transfer in a solar air heater Covered with a Plastic Film. *Solar Energy*, 1997, 60(1)35-40.
- [Jof] Joffre, A. Énergie solaire thermique dans le bâtiment. *Chauffe-eau solaires. Techniques de l'ingénieur*, BE 9 164, s/d.
- [Jol80] Joly, P.; More-Chevalier, F. *Théorie, Pratique & Economie du Séchage des Bois*, Editions H.Vial. 1980.
- [Jon] <http://www.jonathan-guest.co.uk/>
- [Kal04] Kalogirou, S. A. Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, 30 (2004) 231–295.
- [Kar01] Karwa, R.; Solanki, S. C.; Saini, J. S. Thermo-hydraulic performance of solar air heaters having integral chamfered rib roughness on absorber plates. *Energy*, 2001, 26(2), 161-176.
- [Kar04] Karim, M.A.; Hawlader, M.N.A. Development of solar air collectors for drying applications. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45 (2004), 329–344.
- [Kha04] Khater, H. A.; Helwa, N. H.; Enayet, M. N.; Hashish, M.I. Optimisation of Solar Kiln for Drying Wood. *Drying Technology*, 2004, 22(4):677-701.
- [Kou07] Kousksou, T.; Strub, F.; Castaing Lasvignottes, J.; Jamil, A.; Bédécarrats, J.P. Second law analysis of latent thermal storage for solar system. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2007, 91 (2007)1275–1281.

- [Koy06] Koyuncu, T. Performance of various design of solar air heaters for crop drying applications. *Renewable Energy*, 2006, 31 (7) 1073–1088.
- [Kul07] Kulkarni, G. N.; Kedare, S. B.; Bandyopadhyay, S. Determination of design space and optimization of solar water heating systems. *Solar Energy*, 2007, 81(8), 958-968.
- [Kum81] Kumar, S. Utilization of solar energy in India. *Forest Products Journal*, 1981, 31(9), 10-12.
- [Laf01] Lafri, A. Le stockage thermique par chaleur sensible d'une installation de chauffage solaire d'eau à usage domestique. *Bulletin des Energies Renouvelables*, 2005. Centre des Energies Renouvelables. Alger, Algerie. <http://www.cder.dz>
- [Lar87] Lartigue, C. Mécanismes élémentaires mis en jeu lors du séchage du pin maritime. Thèse. Université de Bordeaux I, 1987.
- [LeG80] Le Goff, P. *Énergie industrielle*. Vol. 3. Technique et documentation. 1980.
- [Lib04] <http://www.librecours.org/documents/13/1393.pdf>
- [Lum79] Lumley, G.T.; Choong, E.T. Technical and economic characteristics of two solar kiln designs. *Forest Products Journal*, 1979, 29(7):49-56.
- [Lun02] Luna, D. Construcción y validacion de un Secador Solar para madera aserrada. Tesis Maestría. Universidad Autonoma Chapingo. Chapingo, México, 2002.
- [Lun04] Lund, P.D. Sizing and applicability considerations of solar combisystems. *Solar Energy*, 2004, 78(1)59-71.
- [Mal62] Maldonado, E. D.; Peck, E. C. Drying by solar radiation in Puerto Rico. *Forest Products Journal*, 1962, 12(10), 487-488.
- [Mar95] Martin, M.; Perré, P.; Moser, M. La perte de température à travers la charge : intérêt pour le pilotage d'un séchoir à bois à haute température. *International journal of heat and mass transfer*, 1995, 38(6)1075-1088.
- [Mar97] Martínez-Pinillos, C. E. Diseño y ensayo de un secador solar para Madera. *Madera y Bosques* 1997. 3(2), 13-28.
- [McC80] McCormic, P.O. Solar heating system for kiln drying lumber. *Sunworld*, 1980, 4(6), 204-207.
- [Med07] Medinelli Sanino, Luis A.; Rojas Reischel, Ricardo A.. Modeling and identification of solar energy water heating system incorporating nonlinearities. *Solar Energy*, 2007, 81(2007) 570–580.
- [Mee58] Van Meel D.A. Adiabatic conversion batch drying with recirculation of a chemical, *Eng. Sci.*, 1958, 9(1958) 36-44.

- [Min] Minisol, [www.rueschsolar.ch](http://www.rueschsolar.ch), Suisse
- [Mit06] Mittal, M.K.; Varshney, L. Optimal thermohydraulic performance of a wire mesh packed solar air heater. *Solar Energy*, 2006, 80 (2006), 1112–1120.
- [Mit07] Mittal, M.K.; Varun; Saini, R.P.; Singal, S.K. Effective efficiency of solar air heaters having different types of roughness elements on the absorber plate. *Energy*, 2007, 32 (2007), 739–745.
- [Moh97] Mohamad, A. A. High Efficiency Solar Heater. *Solar Energy*, 1997, 60(2) 71-76.
- [Nad92] Nadeau J.-P., "*Aide au diagnostic énergétique des entreprises et à l'utilisation du logiciel CETIM-MINERG*", Collection PULPE, ADEME
- [Nad06] Nadeau J.-P. ; Sebastian P. *Energétique Industrielle*. Cours polycopié 2006, ENSAM CER de Bordeaux
- [Nad06a] Nadeau, J-P.; Pailhes, J. Intégration de l'innovation et des sensations utilisateur en conception préliminaire par le biais de l'analyse fonctionnelle. In *Ingénierie de la conception et cycle de vie du produit* ; Roucoules, L., Yannou, B., Benoît, E., Ed. Hermès : Paris, 2006 ; 43-62.
- [Nad95] Nadeau J-P.; J-R., Puiggali. *Séchage, des processus physiques aux procédés industriels*. Ed. Lavoisier Tec & Doc. Paris, France. 1995.
- [Nal07] Nallusamya, N.; Sampatha, S.; Velraj, R. Experimental investigation on a combined sensible and latent heat storage system integrated with constant/varying (solar) heat sources. *Renewable Energy*, 2007, 32 (2007)1206–1227.
- [Nap03] Naphon, P.; Kongtregool, B. Theoretical study on heat transfer characteristics and performance of the flat-plate solar air heaters. *Heat Mass Transfer*, 2003, 30(8), 1125-1136.
- [Nap05] Naphon, P. Effect of porous media on the performance of the double-pass flat plate solar air heater. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2005, 32 (2005), 140–150.
- [Nij02] Nijdam, J. J. et Keey, R. B. An experimental study of airflow in lumber kilns. *Wood Science and Technology* 36 (2002) 19–26
- [Njo00] Njomo, D. Unglazed selective absorber solar aircollector: Heat exchange analysis. *Heat and Mass Transfer*, 2000, 36(2000), 313-317.
- [Njo06] Njomo, D.; Daguinet, M. Sensitivity analysis of thermal performance of flat plate solar air heaters. *Heat Mass Transfer*, 2006, 42, 1065-1081.
- [Ong95] Ong K. S. Thermal performance of Solar Air Heaters experimental correlation. *Solar Energy*, 1995, 55(3), 209-220.



- [Ong95] Ong, K.S. Thermal Performance of Solar Air Heaters: Mathematical Model and solution procedure. *Solar Energy*, 1995, 55(2) 93-109.
- [Pai07] Pailhes, J.; Sallaou M.; Nadeau J. P. Knowledge base formulation for aided design tool, in *Trends and Recent Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering II*, edited By Serge Tichkiewitch, Michel Tollenaere et Pascal Ray, pp 231-243, Springer Verlag, 2007.
- [Peu05] Peuser, F. A.; Remmers, K. H. ; Schnauss, M. *Installations solaires thermiques : Conception et mise en œuvre*. Le Moniteur. 2005.
- [Plu83] Plumtre, R. A. Some thoughts on design and control of solar timber kilns. IUFRO Division V Conference. Madison. 1983
- [Plu96] Plumtre, R.A.; Jayanetti, D.L. Solar Heated Timber Drying Kilns: A manual on their design and operation. TRADA Technology Ltd., Bucks. 1996.
- [Pot00] Pottler, K.; Dippel, C.M.; Beck, A.; Fricke, J. Optimized finned absorber geometries for solar air heating collectors. *Solar Energy*, 2000, 67(1-3), 35-52.
- [Puc05] Pucar, M.; Despic, A. The effect of diffuse/indirect light on the energy gain of solar thermal collectors. *Renewable Energy*, 2005, 1–10.
- [Qui] Quicksol, [http://www.soltop.ch/produkte\\_sys\\_quicksol.htm](http://www.soltop.ch/produkte_sys_quicksol.htm), Suisse
- [Raj06] Raji, S., Jannot, Y.; Lagièrre, P. Caractérisation Hygro-Thermique Multi Echelle et Analyse de mur en Bois massif. 2006.
- [Ram07] Ramadan, M.R.I.; El-Sebaï, A.A.; Aboul-Enein, S.; El-Bialy, E. Thermal performance of a packed bed double-pass solar air heater. *Energy*, 2007, 32 (2007), 1524–1535.
- [Rea74] Read, W. R.; Choda, A.; Copper, P. I. A solar timber kiln. *Solar Energy*, 1974, (15), 309-316.
- [Reu97] Reuss, M.; Benkert, ST.; Aeberhard, A.; Martina, P.; Raush, G.; Rentzell, B.V.; Sogari, N. Modelling and experimental investigation of a pilot plant for solar wood drying. *Solar Energy* 1997, 59(4-6), 259-270.
- [Rob83] Robbins, A. M. Solar lumber kilns: design ideas. New Mexico Energy Research and Development Institute, University of New Mexico 1983.
- [Ros80] Rosen, H. N.; Chen, P. Y. S. Drying lumber in a kiln with external solar collectors. *New Process Alternatives In the Forest Products Industries*. American Institute of Chemical Engineers Symposium series 1980, 76(200):82-89.

- [San81] Santini, E. J. Secagem de Madeira serrada em estufa solar e sua comparacao com os metodos convencionais. *Revista Floresta*, 1981, 5-13.
- [Sav00] Savransky, S. D. Engineering of creativity, Introduction to TRIZ methodology of inventive problem solving, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2000.
- [Sca04] Scaravetti, D. 2004 Formalisation préalable d'un problème de conception pour l'aide à la décision en conception préliminaire, mémoire du Doctorat ENSAM 2004.
- [Sca05] Scaravetti, D.; Pailhes, J.; Nadeau, J.-P.; Sébastien, P. Aided decision-making for an embodiment design problem. In *Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*; Bramley, A., Brissaud, D., Coutellier, D., McMahon, C., Ed. Springer, Dordrecht: 2005; 159-172.
- [Sca05a] Scaravetti, D.; Nadeau, J.-P.; Pailhes, J.; Sébastien, P. Structuring of embodiment design problem based on the product lifecycle. *Int. J. Product Development*, 2005, 2(1/2), 47-70.
- [SEM04] Anuario Forestal 2004. <http://www.semarnat.gob.mx>
- [Sen04] SENER, Secretaría de Energía, Mexique. <http://www.energia.gob.mx>
- [Sha02] Shariah, A.; Al-Akhras, M. A.; Al-Omari, I.A. Optimizing the tilt angle of solar collectors. *Renewable Energy* 2002, 26(2002), 587–598.
- [Sia84] Siau, J., F. Transport Processes in Wood. *Springer Series in Wood Science*. Springer-Verlang. 1984. 245 p.
- [Sim84] Simpson, W.T.; Tschernitz, J.L. Solar Dry Kiln for tropical latitudes. *Forest Products Journal* 1984, 34(5), 25-34.
- [Sim92] Simpson, W. T. Drying Technology issues in Tropical Countries. International Union of Forestry Research Organizations. Conference (IUFRO), Nancy, France. August 23-28, 1992, 497-507.
- [Ska88] Skaar, C. Wood-Water Relations. *Springer Series in Wood Science*. Springer-Verlang. 1988. 279 p.
- [Sol] <http://www.solvis-solar.de>, Allemagne
- [Sol79] Solano R. Construcción de una secadora solar para maderas. Primer Simposio: Energía Solar, Fundamentos y Aplicaciones. Editorial Tecnológica de San José, Costa Rica. 313 p. 1979.
- [Son] Sonnenklar Nova, <http://kheops.champs.cstb.fr>, France
- [SPFt35] <http://www.solarenergy.ch>, Frei s/d, Suisse

- [Ste80] Steinmann, D. E.; Vermaas, H. F.; Forrer, J. B. Solar timber drying kilns: Part I: Review of previous system and control measures and description of an automated solar kiln. *J of Institute and Wood Science* 1980, 48, 254-257.
- [Ste80] Steinmann, D. E.; Vermaas, H. F.; Forrer, J. B. Solar timber drying kilns: Part II: Microprocessor control of a solar kiln. *J of Institute of Wood Science*, 1980, 49, 27-31.
- [Tsi00] Tsilingiris, P.T. Heat transfer analysis of low thermal conductivity solar energy absorbers. *Applied Engineering*, 2000, 20(2000), 1292-1314.
- [Var98] Varshney, L.; Saini, J. S. Heat transfer and friction factor correlations for rectangular solar air heater duct packed with wire mesh screen matrices. *Solar Energy*, 1998, 62(4), 255-262.
- [Ver04] Vernat Y. "Formalisation et qualification de modèles par contraintes en conception préliminaire ", Thèse de doctorat, ENSAM. 2004.
- [Ver06] Vernat, Y. ; Nadeau J.-P. ; Sebastian P. ; Fisher X. Démarche de formalisation de modèles adaptés à la conception préliminaire, de *Evaluation et Décision dans le Processus de Conception*, Chapitre 1, Hermès, Paris, 2006
- [Vie97] Viehbeck, P.; Viehbeck, G. Solar Drying of sawn timber in Kingston, Jamaica. German Appropriate Technology Exchange. 1997.
- [Wel04] Welwa, H. N.; Khater, H. A.; Enayet, M. M.; Hashish, M. I. Experimental Evaluation of Solar Kiln for Drying Wood. *Drying Technology* 2004. 22(4), 703-717.
- [Wen92] Wengert, M. E.; Meyer, D. A. Processing trees to Lumber for the Hobbyst and Small Business. University of Wisconsin-Madison. USA. August 1992.
- [Whi77] Whitaker, S. Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media: a theory of drying, *Adv. Heat Transfer*, 1977, 13(1977), 119–203.
- [Wun] [www.espanol.wunderground.com](http://www.espanol.wunderground.com), (données météorologiques).
- [Yad95] Yadav, Y. P.; Sharan, Ashok kumart L. B.; Srivastava, V. P. Parametric Analysis of a Suspended Flat Plate Solar Air Heater. *Energy Convers. Mgmt.*, 1995, 36(5) 325-335.
- [Yan80] Yand, K. C. Solar kiln performance at a high latitude, 48 N. *Forest Products Journal*, 1980, 30(3) 37-40.

## ANNEXES

### Annexe 1. Calcul du coefficient de transfert de chaleur « h » entre les planches de bois

Tout d'abord, considérons le cas d'une plaque plane rugueuse en contact avec un écoulement turbulent. Nous voulons calculer le coefficient d'échange moyen sur la longueur  $L$  d'une planche ou d'un lit de planches. Cela nous amène au calcul du nombre de Nusselt ( $Nu$ ) en accord avec la théorie de la couche limite [Ale02] :

$$Nu = 0,037 Re_L^{0,8} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (A1.1)$$

Maintenant, si l'on prend un écoulement entre deux planches (ou entre deux lits de planches), on peut l'assimiler à l'écoulement entre deux plaques parallèles en cours d'établissement. On utilisera donc la corrélation applicable au régime établi à laquelle on appliquera une correction pour prendre en compte l'effet d'établissement, [Mar95] :

$$Nu = 0,023 Re_{dH}^{0,8} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (A1.2)$$

Où  $d_H$  est le diamètre hydraulique  $d_H = 2a$  de l'espace entre planches ( $a$ ) ou entre lits de planches.

En considérant le transfert moyen sur la longueur  $L$ , on peut introduire un facteur correctif qui met en évidence l'effet d'établissement.

$$\frac{\bar{Nu}}{Nu} = 1 + \frac{C}{L/d_H} \quad (A1.3)$$

Où  $C$  est une constante empirique égale à 1,4 en écoulement turbulent incident.

On a donc :

$$\bar{Nu} = Nu \left[ 1 + \frac{C}{L/d_H} \right] \quad (A1.4)$$

Finalement on obtient  $h$  à partir de :

$$h = \frac{\bar{Nu} \lambda}{d_H} \quad (A1.5)$$

Si nous considérons une largeur de pile  $L = 1,6$  m avec un écartement entre deux lits de planches  $a = 0,027$  m nous pouvons connaître : le régime de l'écoulement dans le passage (Re) et le coefficient de transfert de chaleur par convection. En sachant que la vitesse de l'air dans les passages des planches varient entre 2 et 6  $\text{m.s}^{-1}$  selon [Cro96], entre 4 et 7  $\text{m.s}^{-1}$  selon [Nij02], et une moyenne de 6  $\text{m.s}^{-1}$  selon [Mar95], nous allons considérer une plage de vitesse entre 3 et 6  $\text{m.s}^{-1}$ .

Pour notre cas particulier, nous allons calculer le nombre de Reynolds pour un écoulement entre deux plaques parallèles. Ensuite nous allons le corriger en accord à la méthodologie proposé par Martin [Mar95].

Les valeurs de  $h$  sont présentées dans le tableau 2.

Tableau A.1.1. Valeurs du coefficient d'échange thermique

| $U_{pb}$          | $d_H$ | $Re_{dH}$ | Pr   | $Nu_{dH}$ | $\overline{Nu}$ | $h$                              |
|-------------------|-------|-----------|------|-----------|-----------------|----------------------------------|
| $\text{m.s}^{-1}$ | m     | (-)       | (-)  | (-)       | (-)             | $\text{W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ |
| 1                 | 0,054 | 3560      | 0,71 | 13,3      | 14              | 6,3                              |
| 2                 |       | 7121      |      | 23,2      | 24,3            | 11,0                             |
| 3                 |       | 10681     |      | 32,1      | 33,6            | 15,6                             |
| 4                 |       | 14242     |      | 40,4      | 42,3            | 19,2                             |
| 5                 |       | 17802     |      | 48,3      | 50,6            | 22,9                             |

## Annexe 2. Calcul des coefficients d'échange thermique dans le capteur solaire à air

Afin de connaître les flux thermiques échangés entre l'air et les différents composants du capteur solaire, il nous faut calculer les coefficients de transfert convectif, radiatif et de conduction.

D'après les bilans d'énergie écrits pour chacun des composants, nous calculons leurs coefficients  $h_R$  et  $h_c$ .

Pour la linéarisation des équations nous faisons apparaître de manière formelle le terme  $T_{ext}$  température extérieure dans chaque expression de flux de chaleur de la manière suivante :

$$\begin{aligned}\phi &= C T_p^4 = C (T_p^4 - T_{ext}^4) + C T_{ext}^4 \\ &= C (T_p^2 + T_{ext}^2) (T_p + T_{ext}) (T_p - T_{ext}) + C T_{ext}^4 = h_R (T_p - T_{ext}) + C T_{ext}^4\end{aligned}\quad (A2.1)$$

Nous avons alors un terme constant  $C T_{ext}^4$  et un terme qui dépend de la température multipliée par un coefficient de transfert par rayonnement.

Nous avons considéré comme constants les termes dépendants de la température extérieure, nous obtenons ainsi :

### La couverture transparente :

On définit les constantes suivantes :

$$\begin{aligned}P_1 &= G \alpha_{cs} + \frac{G \alpha_{cs} \tau_{cs} (1 - \alpha_{ps})}{1 - \rho_{cs} (1 - \alpha_{ps})} + \phi_{ciel} \alpha_{ci} + \frac{\phi_{ciel} \alpha_{ci} \tau_{ci} (1 - \alpha_{pi})}{1 - \rho_{ci} (1 - \alpha_{pi})} \\ R_1 &= \frac{\alpha_{ci}^2 (1 - \alpha_{pi}) \sigma T_{ext}^4}{1 - \rho_{ci} (1 - \alpha_{pi})} \\ R_2 &= \frac{\alpha_{ci} \alpha_{pi} \sigma T_{ext}^4}{1 - \rho_{ci} (1 - \alpha_{pi})} \\ R_3 &= -2 \alpha_{ci} \sigma T_{ext}^4\end{aligned}\quad (A2.2, A2.3, A2.4, A2.5)$$

D'après la linéarisation des équations, nous prenons les termes qui dépendent des températures du capteur ainsi que une constante  $C$  qui dépend du rayonnement solaire absorbé, réfléchi et/ou transmis dans le capteur, pour le calcul des coefficients radiatifs [Jan03].

$$h_1 = \frac{\alpha_{ci}^2 (1 - \alpha_{pi}) \sigma}{1 - \rho_{ci} (1 - \alpha_{pi})} (T_c^2 + T_{ext}^2) (T_c + T_{ext}) \quad (A2.6)$$

$$h_2 = \frac{\alpha_{ci} \alpha_{pi} \sigma}{1 - \rho_{ci} (1 - \alpha_{pi})} (T_p^2 + T_{ext}^2) (T_p + T_{ext}) \quad (A2.7)$$

$$h_3 = -2\alpha_{ct}\sigma(T_c^2 + T_{ext}^2)(T_c + T_{ext}) \quad (A2.8)$$

$$\phi_{r \rightarrow c} = P_1 + R_1 + R_2 + R_3 + (h_1 + h_3)(T_c - T_{ext}) + h_2(T_p - T_{ext}) \quad (A2.9)$$

Pour le coefficient convectif entre l'air et la couverture nous avons utilisé l'expression :

$$h_4 = h_{vent} = 5,7 + 3,8U_{vent} \quad (A2.10)$$

Calcul du coefficient d'échange convectif entre la couverture et l'absorbeur ( $h_{p-c}$ ) à travers une couche d'air confiné :

$$h_6 = h_{p-c} = \frac{\lambda_a Nu}{e_a} \quad (A2.11)$$

avec Nu [Dag85] ;

$$Nu = \left[ \frac{Gr_a}{Gr_c} \right]^{0,3} \quad (A2.12)$$

avec :

$$Gr_a = \frac{g(T_p - T_c)\rho_a^2 d^3}{T_a \mu^2} \text{ et } Gr_c = 1060 + 0,32(\beta - 10)^{2,23} \quad (A2.13)$$

le calcul de Pr avec :

$$Pr = \frac{Cp_a \mu_a}{\lambda_a} \quad (A2.14)$$

$$\phi_{conv \rightarrow c} = h_4(T_c - T_{ext}) + h_6(T_c - T_p)$$

En prenant le bilan général de la couverture nous avons :

$$\phi_{R \rightarrow c} = \phi_{conv \rightarrow c}$$

nous avons alors ;

$$P_1 + R_1 + R_2 + R_3 + h_1(T_c - T_{ext}) + h_2(T_p - T_{ext}) + h_3(T_c - T_{ext}) = h_4(T_c - T_{ext}) + h_6(T_c - T_p) \quad (A2.15)$$

Donc l'équation pour la couverture transparente est:

$$(h_4 + h_6 - h_1 - h_3)(T_c - T_{ext}) + (-h_6 - h_2)(T_p - T_{ext}) = B_1 \quad (A2.16)$$

$$\text{Où : } B_1 = P_1 + R_1 + R_2 + R_3$$

### **L'absorbeur :**

Bilan radiatif:

On définit les constantes suivantes :

$$\begin{aligned}
C_1 &= G \frac{\alpha_{ps} \tau_{cs}}{1 - \rho_{cs}(1 - \alpha_{ps})} + \phi_{ciel} \frac{\alpha_{ci} \tau_{ci}}{1 - \rho_{ci}(1 - \alpha_{pi})} \\
R_4 &= \frac{\alpha_{ci} \alpha_{pi} \sigma T_{ext}^4}{1 - \rho_{ci}(1 - \alpha_{pi})} \\
R_5 &= \frac{\alpha_{pi} \alpha_{ci} \rho_{ci} \sigma T_{ext}^4}{1 - \rho_{ci}(1 - \alpha_{pi})} \\
R_6 &= -\alpha_{pi} \sigma T_{ext}^4
\end{aligned} \tag{A2.17, A2.18, A2.19, A2.20}$$

Les coefficients radiatifs s'écrivent:

$$h_7 = \frac{\alpha_{ci} \alpha_{pi} \sigma}{1 - \rho_{ci}(1 - \alpha_{pi})} (T_c^2 + T_{ext}^2) (T_c + T_{ext}) \tag{A2.21}$$

$$h_8 = \frac{\alpha_{pi} \alpha_{ci} \rho_{ci} \sigma}{1 - \rho_{ci}(1 - \alpha_{pi})} (T_p^2 + T_{ext}^2) (T_p + T_{ext}) \tag{A2.22}$$

$$h_9 = -\sigma \frac{(T_p^2 + T_{ext}^2) (T_p + T_{ext})}{\frac{1}{\alpha_{pi}} + \frac{1}{\alpha_{bi}} - 1} \tag{A2.23}$$

$$h_{10} = \sigma \frac{(T_b^2 + T_{ext}^2) (T_b + T_{ext})}{\frac{1}{\alpha_{pi}} + \frac{1}{\alpha_{bi}} - 1} \tag{A2.24}$$

$$h_{11} = -\alpha_{pi} \sigma (T_p^2 + T_{ext}^2) (T_p + T_{ext}) \tag{A2.25}$$

$$\phi_{R \rightarrow p} = C_1 + R_4 + R_5 + R_6 + h_7(T_c - T_{ext}) + (h_8 + h_9 + h_{11})(T_p - T_{ext}) + h_{10}(T_b - T_{ext}) \tag{A2.26}$$

Le flux convectif s'écrit :

$$\phi_{conv \rightarrow p} = \phi_{p \rightarrow a} + h_6(T_p - T_c)$$

$$\phi_{p \rightarrow a} = \frac{h_i A_p}{2} (T_p - T_b) + \frac{q C p_a}{2} \left[ \frac{T_p + T_b}{2} - T_{cap0} \right] \left[ 1 - \exp\left(\frac{-2h_i A_p}{q C p_a}\right) \right] \tag{A2.27}$$

$$\text{On pose : } C_2 = 1 - \exp\left(\frac{-2h_i A_p}{q C p_a}\right)$$

$$\phi_{p \rightarrow a} = \frac{h_i A_p}{2} (T_p - T_{ext}) - \frac{h_i A_p}{2} (T_b - T_{ext}) + \frac{q C p_a C_2}{4} [T_p - T_{ext} + T_b - T_{ext} + 2T_{ext}] - \frac{q C p_a C_2}{2} T_{cap0}$$

$$\phi_{p \rightarrow a} = \frac{h_i}{2} (T_p - T_{ext}) - \frac{h_i}{2} (T_b - T_{ext}) + \frac{q C p C_2}{4 A_p} (T_p - T_{ext}) + \frac{q C p_a C_2}{4 A_p} (T_b - T_{ext}) + \frac{q C p_a C_2 T_{ext}}{2 A_p} - \frac{q C p_a C_2 T_{cap0}}{2 A_p}$$

$$\text{On peut poser : } C_3 = \frac{q C p_a C_2 T_{ext}}{2 A_p} - \frac{q C p_a C_2 T_{cap0}}{2 A_p} \text{ qui est une constante}$$



Le bilan convectif total pour l'absorbeur s'écrit alors :

$$\begin{aligned}\phi_{conv \rightarrow p} &= \frac{h_i}{2}(T_p - T_{ext}) - \frac{h_i}{2}(T_b - T_{ext}) + \frac{qC_p C_2}{4A_p}(T_p - T_{ext}) \\ &\quad + \frac{qC_p C_2}{4A_p}(T_b - T_{ext}) + C_3 + h_6(T_p - T_{ext}) - h_6(T_c - T_{ext}) \\ \phi_{conv \rightarrow p} &= \left[ h_6 + \frac{h_i}{2} + \frac{qC_p C_2}{4A_p} \right] (T_p - T_{ext}) - h_6(T_c - T_{ext}) + \left[ \frac{qC_p C_2}{4A_p} - \frac{h_i}{2} \right] (T_b - T_{ext}) + C_3\end{aligned}\quad (A2.28)$$

et les coefficients convectifs pour l'absorbeur s'écrivent :

$$h_{12} = h_6 + \frac{h_i}{2} + \frac{qC_p C_2}{4A_p} \quad (A2.29)$$

$$h_{13} = -h_6$$

$$h_{14} = \frac{qC_p C_2}{4A_p} - \frac{h_i}{2} \quad (A2.30)$$

$$\phi_{c \rightarrow p} = h_{12}(T_p - T_{ext}) - h_6(T_c - T_{ext}) + h_{14}(T_b - T_{ext}) + C_3$$

Donc ;

$$\begin{aligned}\phi_{R \rightarrow p} &= \phi_{conv \rightarrow p} \\ C_1 + R_4 + R_5 + R_6 + h_7(T_c - T_{ext}) + (h_8 + h_9 + h_{11})(T_p - T_{ext}) + h_{10}(T_b - T_{ext}) \\ &= h_{12}(T_p - T_{ext}) - h_6(T_c - T_{ext}) + h_{14}(T_b - T_{ext}) + C_3\end{aligned}$$

L'équation de l'absorbeur s'écrit finalement:

$$(h_6 + h_7)(T_c - T_{ext}) + (h_8 + h_9 + h_{11} - h_{12})(T_p - T_{ext}) + (h_{10} - h_{14})(T_b - T_{ext}) = B_2$$

$$B_2 = C_3 - (C_1 + R_4 + R_5 + R_6)$$

### **Le fond du capteur:**

Les coefficients radiatifs s'écrivent :

$$\phi_{r \rightarrow b} = \sigma \frac{(T_p^2 + T_b^2)(T_p + T_b)}{\frac{1}{\alpha_{pi}} + \frac{1}{\alpha_{bi}} - 1} \quad (A2.31)$$

$$h_{15} = \sigma \frac{(T_p^2 + T_{ext}^2)(T_p + T_{ext})}{\frac{1}{\alpha_{pi}} + \frac{1}{\alpha_{bi}} - 1} \quad (A2.32)$$

$$h_{16} = -\sigma \frac{(T_b^2 + T_{ext}^2)(T_b + T_{ext})}{\frac{1}{\alpha_{pi}} + \frac{1}{\alpha_{bi}} - 1} \quad (A2.33)$$

$$\phi_{R \rightarrow b} = h_{15}(T_p - T_{ext}) - h_{16}(T_b - T_{ext})$$

Les coefficients convectifs s'écrivent :

$$\phi_{b \rightarrow a} = \frac{h_i A_b}{2} (T_b - T_p) + \frac{q C p_a}{2} \left[ \frac{T_p + T_b}{2} - T_{cap0} \right] \left[ 1 - \exp\left(\frac{-2h_i A_b}{q C p_a}\right) \right]$$

On pose :  $F_1 = 1 - \exp\left(\frac{-2h_i A_b}{q C p_a}\right)$

$$\phi_{b \rightarrow a} = \frac{h_i A_b}{2} (T_p - T_{ext}) - \frac{h_i A_b}{2} (T_b - T_{ext}) + \frac{q C p_a F_1}{4} [T_p - T_{ext} + T_b - T_{ext} + 2T_{ext}] - \frac{q C p_a F_1}{2} T_{cap0}$$

$$\phi_{b \rightarrow a} = \frac{h_i}{2} (T_b - T_{ext}) - \frac{h_i}{2} (T_p - T_{ext}) + \frac{q C p F_1}{4 A_b} (T_p - T_{ext}) + \frac{q C p_a F_1}{4 A_b} (T_b - T_{ext}) + \frac{q C p_a F_1 T_{ext}}{2 A_b} - \frac{q C p_a F_1 T_{cap0}}{2 A_b}$$

On pose :  $F_2 = \frac{q C p_a F_1 T_{ext}}{2 A_b} - \frac{q C p_a F_1 T_{cap0}}{2 A_b}$  qui est une constante

$$\phi_{conv \rightarrow b} = \frac{h_i}{2} (T_b - T_{ext}) - \frac{h_i}{2} (T_p - T_{ext}) + \frac{q C p_a F_1}{4 A_b} (T_p - T_{ext}) + \frac{q C p_a F_1}{4 A_b} (T_b - T_{ext}) + F_2$$

$$\phi_{conv \rightarrow b} = \left[ \frac{h_i}{2} + \frac{q C p_a F_1}{4 A_b} \right] (T_b - T_{ext}) + \left[ \frac{q C p_a F_1}{4 A_b} - \frac{h_i}{2} \right] (T_p - T_{ext}) + F_2 \quad (A2.34)$$

En fait :  $F_1 = C_2$  et  $F_2 = C_3$

Et on peut écrire :

$$h_{17} = \frac{h_i}{2} + \frac{q C p_a F_1}{4 A_b} \quad (A2.35)$$

$$h_{18} = \frac{q C p_a F_1}{4 A_b} - \frac{h_i}{2} \quad (A2.36)$$

$$\phi_{conv \rightarrow b} = h_{17} (T_b - T_{ext}) + h_{18} (T_p - T_{ext}) + F_2$$

Le flux de conduction s'écrit :

$$\phi_{cond \rightarrow b} = h_5 = \frac{\lambda_i A_b}{e_i} (T_b - T_{ext}) \quad (A2.37)$$

$$\phi_{R \rightarrow b} = \phi_{conv \rightarrow b} + \phi_{cond \rightarrow b}$$

$$h_{15} (T_p - T_{ext}) - h_{16} (T_b - T_{ext}) = h_{17} (T_b - T_{ext}) + h_{18} (T_p - T_{ext}) + h_5 (T_b - T_{ext}) + F_2$$

L'équation pour le fond du capteur s'écrit finalement :

$$(h_{15} - h_{18}) (T_p - T_{ext}) + (-h_{16} - h_{17} - h_5) (T_b - T_{ext}) = B_3$$

Avec :  $B_3 = F_2$



### Annexe 3. Echangeur-stockeur, calcul du coefficient global d'échange en Situation de vie « Déstockage »

#### Echangeur stockeur

L'échangeur est constitué de tubes poinçonnés (figure A3.1) en arrangement carré de côté  $e_T$ , l'eau stockée est à l'extérieur des tubes, donc dans le faisceau et à l'intérieur d'une calandre.

Les contraintes de conception pour cet échangeur sont de 2 sortes :

- la longueur  $H$  des tubes doit être un sous-multiple de 6 m pour éviter les chutes lors du débit,
- l'échangeur stockeur doit pouvoir être installé sous le capteur à air pour, à la fois, réduire l'occupation de surface de terrain et pour éviter l'isolation de la calandre.

Cela conduit à une longueur de tube de 1 m et à un écart transversal de 0,0408 m pour pouvoir utiliser une masse d'eau de stockage de 1000 kg. On en déduit alors, d'après la relation (4.99) du chapitre 4 soit  $Dc = 1,25 e_T \sqrt{n}$ , un diamètre de calandre  $Dc$  de 1,35m.

Tableau A3.1. Variables de conception de l'échangeur – stockeur (Inox : 304L)

| $d_e$ | $d_i$ | $e_p$ | $Dc$ | $e_T$  | Nb tubes | $H$                  |
|-------|-------|-------|------|--------|----------|----------------------|
| (m)   | (m)   | (m)   | (m)  | (m)    | (-)      | (m)                  |
| 0,028 | 0,026 | 0,001 | 1,35 | 0,0408 | 700      | 1 pour 1000 kg d'eau |

#### Calcul de la surface d'échange extérieure

$$A_e = 2\pi \times r_e \times H \quad (\text{pour la partie circulaire de la conduite}) \quad (\text{A3.1})$$

#### Expression du coefficient global d'échange

On peut négliger la conduction dans le cas d'un corps thermiquement mince (tube).

D'où l'expression ci-dessous :

$$\frac{1}{kA} = \frac{1}{h_w A_e} + \frac{1}{h_a A_i} \quad (\text{A3.2})$$

## Evaluation du coefficient d'échange convectif sur l'air

L'air à réchauffer passe dans des tubes poinçonnés ( $d_i = 26$  mm) en orthoregard comme le montre la figure A3.1.

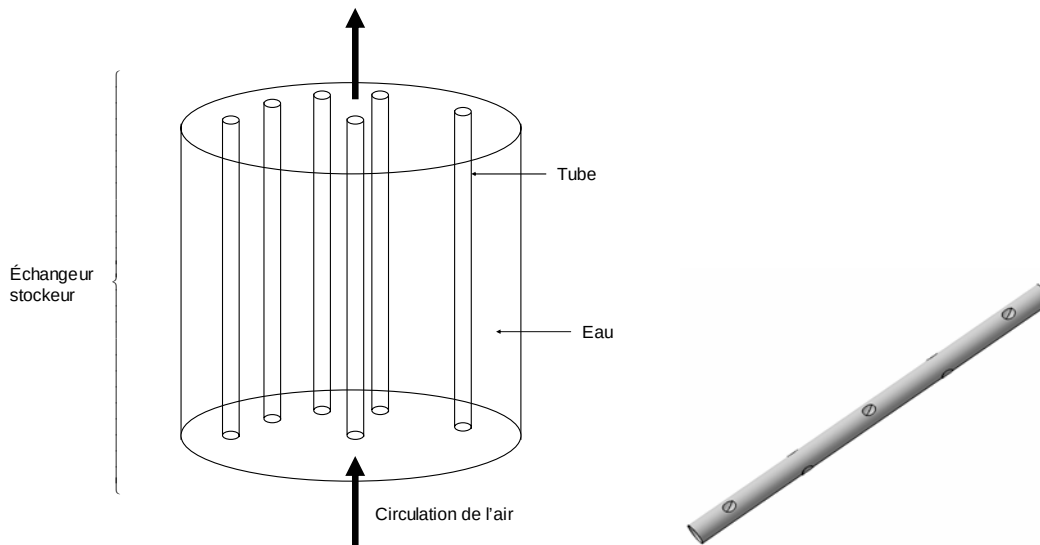


Figure A3.1 : Echangeur-stockeur et tube en orthoregard, pas 120 mm

Le flux thermique échangé en convection forcée s'écrit :

$$\varphi_{\text{paroi} \rightarrow \text{air}} = h_a \times A_{\text{int}} (T_a(x) - T_{p,\text{int}}) \quad (\text{A3.4})$$

Les corrélations du coefficient d'échange sont sous la forme ci-dessous :

$$h_a = G_a C p_a St = \left( \frac{q_a}{S_{\text{passage}}} C p_a \right) a \text{Re}^b \left( \frac{T_{a-E0}}{T_p} \right)^c \quad (\text{A3.5})$$

Les valeurs des paramètres  $a$ ,  $b$  et  $c$  pour un tube en configuration en regard au plan perpendiculaire (ortho regard) sont définies ci-dessous dans le tableau A3.2. :

Tableau A3.2. Valeurs des paramètres  $a$ ,  $b$ ,  $c$  pour un tube en orthoregard.

| Pas / $d_i$ | $a$            | $b$             | $c$            |
|-------------|----------------|-----------------|----------------|
| 2,30        | 0,15187        | -0,33088        | 0,15037        |
| <b>3,46</b> | <b>0,08933</b> | <b>-0,27874</b> | <b>0,15006</b> |
| 4,61        | 0,09071        | -0,28477        | 0,15006        |
| 5,76        | 0,07092        | -0,26253        | 0,14988        |

Les valeurs de ces paramètres pour cette configuration de tubes sont issus de travaux d'identification à partir d'essais [Are04].

### Pertes de charge sur l'air dans le tube poinçonné

Il est important de connaître l'ordre de grandeur des pertes de charge car de cela dépendra le choix de la puissance du ventilateur à utiliser. Les pertes de charge s'écrivent classiquement :

$$\Delta p = f \cdot \frac{4H}{d_i} \rho \frac{V_a^2}{2} \quad (\text{A3.6})$$

Le facteur de fanning, dans notre cas, a été exprimé par comparaison à un tube lisse soit :

$$f = G(0,046 \text{Re}^{-0,2}) \quad (\text{A3.7})$$

Où G est le coefficient gain pertes de charge entre un tube lisse et un tube ortho regard d'après l'étude des échangeurs AQP [Are04]. Le tableau A3.3 récapitule les essais, dans notre cas (orthoregard), on peut prendre la valeur de 2 pour G, la relation (6) devient alors :

$$f = 0,092 \text{Re}^{-0,2} \quad (\text{A3.8})$$

Tableau A3.3. Gain pertes de charge par rapport au tube lisse

|          | G selon type de poinçonnage tubes, pas 120 mm |           |           |              | Vitesse              |
|----------|-----------------------------------------------|-----------|-----------|--------------|----------------------|
| Re       | Hélice                                        | Quinconce | En regard | Ortho regard | (m.s <sup>-1</sup> ) |
| 8,94E+03 |                                               |           | 1,71      | 1,57         | 5,16                 |
| 1,05E+04 | 1,33                                          | 1,33      | 1,87      | 1,87         | 6,05                 |
| 1,61E+04 | 1,31                                          | 1,29      | 1,9       | 1,9          | 9,3                  |
| 2,09E+04 | 1,33                                          | 1,32      | 1,97      | 1,97         | 12,04                |
| 27040    | 1,36                                          | 1,36      | 1,95      | 1,98         | 15,6                 |

### Performances du tube poinçonné

Le tableau A3.4. récapitule les performance attendues du tube. On remarque que la configuration choisie donne des performances correctes en transfert de chaleur et permet de choisir un ventilateur hélicoïde car les pertes de charges de 124 Pa sont acceptables.

Tableau A3.4. Ordre de grandeur des différentes variables pour un tube de 1 m et 1000 kg d'eau de stockage

| Nombre de tubes | Vitesse air            | Ecart transversal | Diamètre calandre | Reynolds     | Coef Echange Convectif | Pertes de charge | Masse échangeur vide |
|-----------------|------------------------|-------------------|-------------------|--------------|------------------------|------------------|----------------------|
| n               | $U_a(\text{m.s}^{-1})$ | $e_T$             | Dc                | Re           | $h_a$                  | Pa               | kg                   |
| 1220            | 5,1                    | 0,0342            | 1,49              | 8678         | 43                     | 37               | 836                  |
| 1000            | 6,3                    | 0,0363            | 1,435             | 10588        | 49,8                   | 63               | 706                  |
| 800             | 7,8                    | 0,039             | 1,38              | 13235        | 58,5                   | 96               | 588                  |
| <b>700</b>      | <b>9</b>               | <b>0,0408</b>     | <b>1,35</b>       | <b>15126</b> | <b>64,4</b>            | <b>124</b>       | <b>529</b>           |
| 360             | 17,4                   | 0,0525            | 1,245             | 29411        | 104,1                  | 412              | 328                  |

### Evaluation du coefficient d'échange en convection naturelle sur l'eau

Flux thermique échangé en convection naturelle :

$$\Phi_{\text{eau} \rightarrow \text{paroi}} = h_w \times A_e \times (T_p - T_w(t)) \quad (\text{A3.9})$$

Calcul du coefficient d'échange entre l'eau et la paroi :

Coefficient d'échange :  $h_w = \frac{Nu \times \lambda_w}{H}$  avec le nombre de Nusselt défini ci-dessous :

|                      |                                 |                                  |  |
|----------------------|---------------------------------|----------------------------------|--|
| Ecoulement Laminaire | $10^4 < \text{Pr.Gr} < 10^9$    | $Nu = 0,59(\text{Pr.Gr})^{0,25}$ |  |
|                      |                                 | (A3.0.38)                        |  |
| Ecoulement Turbulent | $10^9 < \text{Pr.Gr} < 10^{13}$ | $Nu = 0,13(\text{Pr.Gr})^{0,33}$ |  |
|                      |                                 | (A3.0.39)                        |  |

### Qualification

On va effectuer maintenant des calculs d'encadrements pour définir le coefficient d'échange côté eau (dans le cadre de tubes cylindriques).

Avec  $T_{p \max} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{p \min} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{a-0E} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $x = H = 1 \text{ m}$

$$\text{Pr} = \frac{\mu_w \times C_{p_w}}{\lambda_w} \quad \text{d'où : } \text{Pr} = 7,$$

$$\text{Gr} = \frac{\beta g \rho_w^2 x^3 (T_p - T_w)}{\mu_w^2} \quad \text{D'où : } 1,72 \times 10^{15} \leq \text{Gr} \leq 6,86 \times 10^{15}$$

$$\Rightarrow 1,19 \times 10^{15} \leq \text{Pr Gr} \leq 4,82 \times 10^{15}$$

Nous sommes donc en dehors du domaine de validité de notre corrélation. Cela est dû à la hauteur du tube et à la superposition d'effets de convection forcée par mouvement de l'eau. La corrélation prise à la limite de son utilisation (borne supérieure) donne un coefficient d'échange bien supérieur (au moins facteur 20) au coefficient d'échange convectif sur l'air.

La résistance liée à la convection de l'eau est négligeable devant celle de l'air.





## Annexe 4. Calcul des coûts du séchoir

Parité Peso mexicain/Euro : 1 € = 16,2 \$

### Coûts d'investissement

Les coûts des matériaux de construction sont calculés à partir des prix de vente des matériaux au Mexique (costonet.com). Le tableau A4.1 montre les résultats.

Tableau A4.1. Coûts de matériaux du séchoir solaire

| Composant                       | Prix      | Prix    |
|---------------------------------|-----------|---------|
|                                 | \$        | €       |
| Chambre de séchage (brique)     | 38053,85  | 2340,34 |
| Capteur à air                   | 10560,91  | 649,50  |
| Echangeur-Stockeur (poids)      | 47329,4   | 2910,79 |
| Capteur à eau                   | 2968,92   | 182,59  |
| Terrain (\$780/m <sup>2</sup> ) | 46800     | 2878,23 |
| Total                           | 145713,12 | 8961,45 |

1 € = \$16,26

Pour le calcul de l'investissement initial, nous avons considéré les charges résumées dans le tableau A4.2, [Cha91].

Tableau A4.2. Calcul de l'investissement initial,  $I_{ini}$

| Désignation technique                                                                   | Prix             | Prix            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------|
|                                                                                         | \$               | €               |
| Séchoir : Cellule complète (construction), capteurs, stockeur                           | 145713,12        | 8961,45         |
| Main d'œuvre                                                                            | 145713,12        | 8961,45         |
| Prestations diverses (Transport, montage, mise en route), (10% de Coût de construction) | 14571,31         | 896,14          |
| Administration 10% (Coût de construction)                                               | 14571,31         | 896,14          |
| <b>Investissement <math>I_{ini}</math></b>                                              | <b>320568,86</b> | <b>19715,18</b> |
| Coût d'investissement (\$/m <sup>3</sup> )                                              | 74205,75         | 4563,70         |

### Coûts de possession

Les charges à considérer lors de l'exploitation du séchoir solaire sont regroupées dans le tableau A4.3. On considère un capital emprunté du 70% de  $I_{ini}$  à payer en 5 annuités de remboursement à un taux d'intérêt de 7,7%. L'amortissement technique est à 10 ans.

Tableau A4.3. Calcul des charges relatives à l'installation de séchage

| Charges relatives à l'installation de séchage    | Montants annuels | Montants annuels |
|--------------------------------------------------|------------------|------------------|
|                                                  | \$               | €                |
| Frais de personnel                               | 26215,6          | 1612,276         |
| Frais d'électricité                              | 16230,819        | 998,2054         |
| Frais d'utilisation des chariots                 | 12308,4          | 756,9742         |
| Frais d'entretien 3% $I_{ini}$                   | 9531,34          | 586,1834         |
| <b>Total charges variables</b>                   | <b>64286,16</b>  | <b>3953,638</b>  |
| Frais de structure et taxes diverses             | 20585,24         | 1266,005         |
| Amortissements (amortissement technique)         | 31771,14         | 1953,945         |
| Frais d'amortissements (amortissement financier) | 10781,70         | 663,081          |
| <b>Total charges fixes</b>                       | <b>63138,07</b>  | <b>3883,03</b>   |
| Total général de charges                         | 127424,23        | 7836,7           |

Tableau A4.4. Le prix du séchage et volume de bois

| Bois vert         | Bois séché        | Coût de séchage   | Volume/pile    | Prix/vente bois sec |
|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|---------------------|
| \$/m <sup>3</sup> | \$/m <sup>3</sup> | \$/m <sup>3</sup> | m <sup>3</sup> | \$/pile             |
| 5088              | 5936              | 848               | 4,32           | 25643,52            |

On prend en compte un temps global de séchage de 5 jours. La charge et décharge du séchoir est réalisé en temps caché. On considère 365 jours de fonctionnement.

Un exemple des résultat de l'exploitation annuelle du séchoir est résumé dans le tableau suivant : Le prix de vente du bois sec sans qualité est de \$5936/m<sup>3</sup> il faut augmenter le 15% sur le prix de vente si se considère la qualité du bois.

Tableau A4.5. Exploitation du séchoir solaire, cas du séchoir solaire à un échangeur stockeur et la conduite de qualité  $\tau_r + \tau_r N \text{ var} + \text{stk} (N)$ 

| Annuités                          |       | Année 1   | Année 2   | Année 3   |
|-----------------------------------|-------|-----------|-----------|-----------|
| Chiffre d'affaires**              | a     | 267425,28 | 294167,81 | 323584,59 |
| Charges variables**               | b     | 64286,16  | 70714,78  | 77786,25  |
| Marge brute (MB)                  | A=a-b | 203139,12 | 223453,03 | 245798,33 |
| Charges fixes (CF)                | c     | 63138,07  | 63138,07  | 63138,07  |
| <b>Marge nette</b>                | B=A-c | 140001,05 | 160314,96 | 182660,26 |
| Impôts sur le bénéfice*           | î     | 44125,17  | 48537,69  | 53391,46  |
| Résultat de l'exploitation        | C=B-î | 95875,87  | 111777,27 | 129268,80 |
| Dotation aux amortissements       | d     | 31771,14  | 31771,14  | 31771,14  |
| <b>Capacité d'autofinancement</b> | D=C+d | 127647,01 | 143548,41 | 161039,94 |

\*Taux sur le bénéfice (Mexique SAT, 01-02-08) = 0,165

\*\* On considère une augmentation de 10% annuelle sur le chiffre d'affaires et une augmentation de 10% des charges variables.

La **DRI** est définie comme la période au bout de laquelle la somme cumulée des capacités d'autofinancement est égale à l'investissement initial [Ale02].

$$DRI = D1 + D2 + \dots + Dn = I_{ini} \quad (A4.1)$$

Le **seuil de rentabilité, SR** représente le chiffre d'affaires pour lequel une entreprise ne fait ni perte ni bénéfice après un certain volume d'activité. Nous l'exprimons en termes de mois d'activité selon la relation A4.1.2.

$$SR = \frac{CF \times N}{MB} \quad (A4.2)$$

où :

CF : charges fixes annuelles,

N : nombre de mois de fonctionnement par an et

MB : marge brute

Tableau A4.7. Calcul des indicateurs économiques

|                                                              |
|--------------------------------------------------------------|
| Seuil de rentabilité (mois d'activité)<br>3,73 mois          |
| Durée de récupération des investissements<br>2 ans et 8 mois |



## **Modélisation et conception préliminaire d'un séchoir solaire pour bois de pin avec stockage d'énergie**

**RESUME :** Une étude détaillée des séchoirs solaires existants dans le marché du bois, suivie d'une analyse selon les lois d'évolution des systèmes techniques, conduit à la proposition d'un concept innovant de séchoir avec stockage d'énergie. La conception particulière et innovante et la conduite du séchage par des variables de pilotage imposent une modélisation des diverses unités du système et des milieux extérieurs environnants.

Des modèles de chaque unité sont ainsi construits. Ils intègrent nécessairement les variables de conception. Le séchage est décrit par le modèle classique de la courbe caractéristique. Les modèles des autres unités sont écrits de manière parcimonieuse afin de diminuer les temps de calcul. Ils sont également qualifiés en terme de parcimonie, exactitude, précision et spécialisation. Une vision intéressante du milieu extérieur « météorologie » est proposée en exploitant les données correspondant à la zone de l'aéroport de Mexico. Des essais de séchage de planches de pin maritime par léchage ont permis de modéliser la cinétique de séchage.

Le modèle global du séchoir est obtenu par concaténation des modèles des différentes unités en intégrant des composants d'interaction (ventilateur et trappes) et via les variables de pilotage.

Les résultats obtenus sont analysés en terme de temps de séchage, de qualité du bois et de temps de retour des investissements. Ils aboutissent à la définition de tables de conduite permettant la gestion de la qualité du bois.

Le séchoir conçu lors de ces travaux est innovant, rentable et utilisable dans le domaine de séchage du bois au Mexique.

**Mots clés :** Séchage, stockage, solaire, pin maritime, modélisation, parcimonieuse, qualité, conception, conduite

## **Modelling and preliminary design of the solar dryer to wood pine whit energy storage**

**ABSTRACT:** Based on a detailed study of existing solar kiln dryers, an innovative solar dryer concept including a thermal storage has been defined through an analysis considering the laws of evolution of a technical system. Due to the specificity of the design and the use of control variables to schedule the dry process, a sequential modelling of the different units of the system and their surrounding environments is required.

The resulting models comprise necessarily the design variables. The drying is modelled using the classical drying characteristic curve approach. For the other units, a parsimonious modelling is used to reduce computation time. These models are also qualified considering parsimony, accuracy, precision and specialization.

A model for the surrounding environment corresponding to weather conditions is proposed using meteorological data from Mexico airport area. The dry process kinetic has been modelled using results of convective drying experiments on maritime pine boards.

The global model of the solar dryer is obtained by gathering the units models and those of interaction components (fan and vents) and using control variables.

Results are analysed considering drying time, wood quality and return on investment time. They lead to the definition of dry scheduling allowing management of wood quality.

The resulting solar kiln dryer is innovative and cost effective, and is usable in the wood drying industry in Mexico.

**Keywords:** Drying, Storage, Solar, Maritime pine, Modelling, Parsimonious, Quality, Design, Dry scheduling.