

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale d'Ingénieurs de Monastir

# THESE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE

## DOCTEUR

Spécialité : **GENIE ENERGETIQUE**

Présentée par

**Amani Zriba**

**Conception et étude des performances des cellules  
de séchage solaire**

Présentée et soutenue le 13 / 01 / 2022 devant le jury d'examen :

Mr. M. BEN CHIEKH	P., à l'ENIM, Université de Monastir	Président
Mr. A. JEMNI	P., à l'ENIM, Université de Monastir	Directeur de Thèse
Mr. M.S. GUELLOUZ	M. A., à l'ENIB, Université de Carthage	Co-Directeur de Thèse
Mr. N. KECHAOU	P., à l'ENIS, Université de Sfax	Rapporteur
Mr. S. AZZOUZ	M. C., à la FST, Université de Tunis El Manar	Rapporteur
Mr. C. BOUDEN	P., à l'ENIT, Université de Tunis El Manar	Examineur

# *Je dédie cette thèse ...*

## *A ma mère Najéh et mon père Kamel*

*A qui je dois plus que je ne saurai exprimer.*

*Autant de phrases aussi expressives et éloquentes soit-elles ne sauraient exprimer ma reconnaissance et ma gratitude pour le sacrifice que vous avez fait et que vous continuez à faire pour mon bonheur et ma réussite.*

*Vous avez su m'inculquer le sens de la responsabilité, de l'optimisme et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie. Vos conseils ont toujours guidé mes pas vers la réussite. Votre patience sans fin, votre compréhension et votre encouragement sont pour moi le soutien indispensable que vous avez toujours su m'apporter. Je vous dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain et je ferai toujours de mon mieux pour rester votre fierté et ne jamais vous décevoir.*

*En ce jour mémorable, pour moi ainsi que pour vous, recevez ce travail en signe de ma vive reconnaissance et mon profond estime. Puisse Dieu, le tout puissant, vous donner santé, bonheur et longue vie afin que je puisse vous combler à mon tour.*

## *A mon très cher frère Aymen*

*Mon cher frère qui m'est le père et la mère, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour toi. Ton aide, ta générosité, ton soutien ont été pour moi une source de courage et de confiance.*

*Qu'il me soit permis aujourd'hui de t'assurer mon profond amour et attachement, que Dieu te procure beaucoup de bonheur, de santé et de réussite.*

## *A mon très cher mari Timim*

*Ce travail a été réalisé grâce à toi, au temps que tu as bien voulu m'accorder par respect vis-à-vis de mon objectif. Ton encouragement et ton soutien étaient la bouffée d'oxygène qui me ressourçait dans les moments pénibles, de solitude et de souffrance.*

*Merci d'être toujours à mon écoute et parfois pour ton plus grand désarroi, ennui et malheur. Je me dois de considérer ma réussite comme une œuvre commune, une œuvre de notre couple.*

*Que dieu réunisse nos chemins pour un long commun serein et que ce travail soit témoignage de ma reconnaissance et de mon amour sincère et fidèle.*

## *A mes enfants, mes trésors, Rayen & Aycha*

*Vous m'avez fait découvrir le plus grand bonheur au monde. Je vous aime à l'infini. Etre votre maman est la plus belle chose qui soit.*

## *A ma tante Jamila et ma belle-sœur Hafidha*

*Pour leur aide précieuse dans l'élaboration de ce travail qu'elles trouvent ici le témoignage de ma reconnaissance et mon affection.*

## *A tous ceux que j'aime*

*Ils sont nombreux, qu'ils trouvent ici l'expression de mon respect et mon affection.*

*Je prie Dieu pour qu'il vous alloue bonne santé, bonheur et longue vie.*

# Remerciements...

Cette thèse a été réalisée au sein du Laboratoire d'Etudes des Systèmes Thermiques et Energétiques sous la responsabilité de Monsieur **Abdelmajid JEMNI**, Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Directeur du dit Laboratoire et mon Directeur de thèse. Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour la direction de ce travail, pour sa disponibilité et pour ses précieuses orientations.

J'adresse ma plus vive reconnaissance à Monsieur **Mohamed Sadok GUELLOUZ**, Maître assistant à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Bizerte et mon co-directeur de thèse, qui a suivi de près ce travail et qui, grâce à son assistance remarquable et ses grandes qualités humaines, je suis arrivée à réaliser ce travail avec une aisance considérable. Il a su me soutenir, me conseiller dans les moments parfois difficiles, m'encourager à chaque fois que cela a été nécessaire et me faire profiter de sa solide expérience scientifique.

Je tiens à remercier mon jury de thèse, en commençant par Monsieur **Maher BEN CHIEKH**, Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, de m'avoir fait l'honneur de présider jury de thèse, Monsieur **Nabil KECHAOU**, Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax et Monsieur **Soufien AZZOUZ** Maîtres de Conférences à la Faculté des Sciences de Tunis, pour leur travail de rapporteur et pour le temps consacré à l'examen de ce mémoire, ainsi qu'à Monsieur **Chiheb BOUDEN**, Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, mon examinateur de thèse, pour sa disponibilité. Je suis très honorée de leur participation à mon jury de thèse. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je tiens aussi à remercier le soutien financier du Programme National de Recherche et d'Innovation (**PNRI**) du Ministère Tunisien de l'Industrie et des Petites et Moyennes Entreprises et du Programme Fédéré de Recherche (**PRF**) du Ministère Tunisien de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique. Je remercie également le Centre Technique de l'Industrie du Bois et de l'Ameublement (**CETIBA**) pour participer en tant qu'interface de coordination pour le programme PNRI et l'Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie de Tunisie (**ANME**), le coordinateur du projet PRF.

Les remerciements sont pareillement attribuables à la société Alternative Energy Systems (**AES**), en particulier, l'ingénieur **Bilel BOUASSIDA**, pour la réalisation technologique des prototypes et à la société **AGRIFOOD**, le partenaire industriel du projet (PRF). Je suis fortement reconnaissante aux partenaires de la recherche scientifique à savoir les équipes de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, de la Faculté des Sciences de Tunis-El Manar et de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, de m'avoir appris les bons réflexes de la recherche, de me poser un regard critique sur mon travail et à y répondre avec le maximum de rigueur.

Puisque l'occasion m'en est donnée, j'en profite pour rendre hommage à tous les membres et particulièrement mes collègues du **LESTE**, qui ont participé de près ou de loin au bon déroulement de ce travail et qui n'ont pas manqué de m'encourager.

# Table des matières

<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<i>Chapitre I</i> .....	<b>4</b>
<i>Etat de l'Art du Séchage Solaire</i> .....	<b>4</b>
<b>I.1 Introduction</b> .....	<b>4</b>
<b>I.2 Energie Solaire</b> .....	<b>4</b>
<b>I.3 Séchage Solaire</b> .....	<b>5</b>
<b>I.3.1 Différents Principes de Séchage Solaire</b> .....	<b>6</b>
I.3.1.1 Séchoirs solaires directs .....	6
I.3.1.2 Séchoirs solaires indirects et ses différentes technologies .....	7
<b>I.3.2 Séchage Solaire du Bois</b> .....	<b>13</b>
I.3.2.1 Séchoir Solaire pour Bois.....	13
I.3.2.2 Traitement Thermique du Bois selon la Norme NIMP°15 .....	14
<b>I.3.3 Séchage Solaire des Tomates</b> .....	<b>15</b>
<b>I.4 Conclusion</b> .....	<b>15</b>
<b>Partie (A) : Cellule Solaire pour le Traitement Phytosanitaire du Bois</b> .....	<b>17</b>
<i>Chapitre II</i> .....	<b>18</b>
<i>Conception de base de la Cellule Solaire : Méthodologie et Outils pour la Modélisation ...</i>	<b>18</b>
<b>II.1 Introduction</b> .....	<b>18</b>
<b>II.2 Présentation du Projet PNRI : Cellule Solaire pour le Traitement Phytosanitaire du Bois</b> .....	<b>18</b>
<b>II.3 Code de Séchage du Bois</b> .....	<b>19</b>
<b>II.3.1 Équations du Bilan de Masse et de l'Énergie du Modèle</b> .....	<b>21</b>
II.3.1.1 Équation du Bilan de Masse .....	21
II.3.1.2 Équation du Bilan d'Énergie.....	23
<b>II.3.2 Algorithme de Résolution</b> .....	<b>25</b>
<b>II.3.3 Séchage du Bois selon la NIMP°15</b> .....	<b>27</b>
<b>II.4 Logiciel TRNSYS</b> .....	<b>27</b>
<b>II.4.1 Description du Logiciel</b> .....	<b>27</b>
<b>II.4.2 Analyse Globale du Système</b> .....	<b>28</b>
<b>II.4.2 Modélisation Globale de la Cellule Solaire</b> .....	<b>29</b>
II.4.2.1 Milieu Extérieur « Météorologie » .....	30
II.4.2.2 Unité de chauffage.....	30

II.4.2.3 Unité de stockage.....	30
II.4.2.4 Unité de traitement .....	31
<b>II.5 Conclusion.....</b>	<b>31</b>
<i>Chapitre III.....</i>	<i>32</i>
<i>Simulation et Optimisation de la Cellule Solaire pour Bois .....</i>	<i>32</i>
<b>III.1 Introduction .....</b>	<b>32</b>
<b>III.2 Simulation du Procédé de Séchage du Bois.....</b>	<b>32</b>
<b>III.2.1 Variation Temporelle de la Température des Planches de Bois au cours du Séchage ..</b>	<b>33</b>
<b>III.2.2 Variation Temporelle de la Teneur en Eau .....</b>	<b>34</b>
<b>III.2.3 Température de Sortie de l’Air de Séchage de la Pile de Bois.....</b>	<b>35</b>
<b>III.2.4 Humidité Absolue de l’Air dans la Pile de Bois .....</b>	<b>35</b>
<b>III.2.5 Modèle de l’Unité de Traitement Phytosanitaire du Bois .....</b>	<b>36</b>
<b>III.3 Influence des Paramètres sur le Temps du Traitement .....</b>	<b>38</b>
III.3.1 Influence de l’Epaisseur de la Planche de Bois.....	38
III.3.2 Influence de l’Inversion du Sens de l’Ecoulement de l’Air de Séchage .....	39
III.3.3 Influence de l’Amélioration de la Conduite de Traitement.....	40
<b>III.4 Modélisation de la Cellule Solaire pour le Traitement Phytosanitaire du Bois.....</b>	<b>43</b>
<b>III.4.1 Représentation Graphique sous TRNSYS.....</b>	<b>43</b>
<b>III.4.2 Fonctionnement de l’Installation.....</b>	<b>44</b>
<b>III.4.3 Paramètres d’Entrée du Modèle TRNSYS.....</b>	<b>45</b>
<b>III.5 Analyse Globale du Fonctionnement de la Cellule Solaire .....</b>	<b>45</b>
<b>III.5.1 Analyse du Circuit d’Eau.....</b>	<b>45</b>
<b>III.5.2 Analyse du Circuit d’Air.....</b>	<b>46</b>
<b>III.5.3 Fonctionnement Optimal de la Cellule Solaire .....</b>	<b>48</b>
III.5.3.1 Analyse du Fonctionnement Mensuel de la Cellule Solaire.....	48
III.5.3.2 Analyse du Fonctionnement Hebdomadaire de la Cellule .....	52
<b>III.6 Conclusion .....</b>	<b>54</b>
<i>Chapitre IV .....</i>	<i>56</i>
<i>Mise en Place et Validation Expérimentale Préliminaire d’un Prototype de Cellule Solaire pour Bois.....</i>	<i>56</i>
<b>IV.1 Introduction.....</b>	<b>56</b>
<b>IV.2 Présentation du Prototype de la Cellule Solaire pour Bois.....</b>	<b>56</b>
<b>IV.2.1 Emplacement et Schéma de l’Installation.....</b>	<b>56</b>
<b>IV.2.2 Composition du Dispositif Expérimental.....</b>	<b>58</b>
<b>IV.2.3 Description du Fonctionnement du Système .....</b>	<b>61</b>

<b>IV.2.4 Mesures et Validation Expérimentale Préliminaire.....</b>	<b>63</b>
IV.2.4.1 Caractéristiques de Mesures de la Chambre de Traitement .....	63
IV.2.4.2 Validation Expérimentale Préliminaire du Prototype .....	65
<b>IV.3 Conclusion .....</b>	<b>68</b>
<b>Partie (B) : Séchoir Solaire pour les Tomates.....</b>	<b>69</b>
<i>Chapitre V.....</i>	<i>70</i>
<i>Conception et Modélisation du Séchoir Solaire pour Tomates .....</i>	<i>70</i>
<b>V.1 Introduction .....</b>	<b>70</b>
<b>V.2 Présentation du projet PRF : Séchoir solaire pour les tomates .....</b>	<b>70</b>
<b>V.3 Démarche de la Modélisation du Séchoir Solaire pour les Tomates .....</b>	<b>71</b>
<b>V.3.1 Exploitation de la Cinétique de Séchage.....</b>	<b>71</b>
V.3.1.1 Cinétique de Séchage .....	71
V.3.1.2 Etablissement de la Cinétique de Séchage pour un Ecoulement Horizontal .....	71
<b>V.3.2 Modélisation sous TRNSYS.....</b>	<b>75</b>
V.3.2.1 Séchoir avec Capteurs Solaires et sans Stockage .....	75
V.3.2.2 Séchoir Solaire avec Stockage de l'Energie Thermique.....	77
<b>V.4 Conclusion .....</b>	<b>84</b>
<i>Chapitre VI : .....</i>	<i>85</i>
<i>Simulation et Optimisation du Séchoir Solaire pour Tomates .....</i>	<i>85</i>
<b>VI.1 Introduction.....</b>	<b>85</b>
<b>VI.2 Optimisation du Séchoir Solaire pour les Tomates .....</b>	<b>85</b>
<b>VI.3 Etude Paramétrique du séchoir.....</b>	<b>88</b>
VI.3.1 Etude de l'effet de la couverture du ciel sur la température de l'air de séchage .....	88
VI.3.2 Etude de l'effet de la température de l'air de séchage sur les dimensions du séchoir ...	90
VI.3.2.1 Simulation du séchoir solaire pour une température de l'air 45°C .....	91
VI.3.2.2 Simulation du séchoir solaire pour une température de l'air 65°C .....	93
<b>VI.4 Comparaison entre le Séchoir Solaire et le Brûleur à Gaz .....</b>	<b>96</b>
<b>VI.5 Conclusion .....</b>	<b>97</b>
<i>Chapitre VII.....</i>	<i>98</i>
<i>Présentation du Séchoir Solaire pour Tomates .....</i>	<i>98</i>
<b>VII.1 Introduction .....</b>	<b>98</b>
<b>VII.1 Emplacement et Schéma de l'Installation .....</b>	<b>98</b>
<b>VII.2 Détails de Conception du Séchoir Solaire pour Tomates sur le Site d'Implantation (AGRIFOOD, Haouaria, Tunisie) .....</b>	<b>99</b>

<b>VII.3 Composition du Séchoir Solaire pour les Tomates .....</b>	<b>102</b>
<b>VII.4 Conclusion.....</b>	<b>106</b>
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>107</b>
<b>Références Bibliographiques .....</b>	<b>109</b>
<i>Annexe A : Brochure PNRI.....</i>	<i>118</i>
<i>Annexe B : Brochure PRF .....</i>	<i>122</i>

# Liste des Figures

FIGURE -I.1-CARTE D'IRRADIATION SOLAIRE HORIZONTALE GLOBALE (GHI) [12] .....	5
FIGURE -I. 2- SCHEMA D'UN SECHOIR SOLAIRE DIRECT A CONVECTION NATURELLE [25] .....	6
FIGURE -I. 3-SCHEMA D'UN SECHOIR SOLAIRE DIRECT A CONVECTION FORCEE [25] .....	7
FIGURE -I. 4- SCHEMA D'UN SECHOIR SOLAIRE INDIRECT [57] .....	8
FIGURE -I. 5-(A) SCHEMA DU SECHOIR SOLAIRE A DESHYDRATANT INTEGRE. 1. VENTILATEUR, 2. CAPTEUR SOLAIRE A AIR A PLAQUE PLATE, 3. CHAMBRE DE SECHAGE, 4. ISOLATION, 5. PLAQUE ABSORBANTE, 6. PLAQUE DE FOND, 7. COUVERCLE TRANSPARENT, 8. LIT DE DESHYDRATANT, 9. CONTREPLAQUE, 10. ENTREE D'AIR, 11. CONDUIT POUR SORTIE D'AIR, 12. PLATEAUX DE SECHAGE, 13. VENTILATEUR REVERSIBLE, 14. SOUPAPE, 15. CONTREPLAQUE. (B) UNE PHOTO REELLE DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL [59] .....	10
FIGURE -I. 6-SECHOIR SOLAIRE AVEC STOCKAGE D'ENERGIE [46] .....	11
FIGURE -I. 7-(A) SYSTEME DE SECHAGE SOLAIRE INTEGRE AU TOIT ET (B) LE BAC DE SECHAGE [63] .....	12
FIGURE -I. 8-SCHEMA DU SECHOIR SOLAIRE A CONVECTION NATURELLE AVEC UN ABSORBEUR A PLAQUE PLATE ET UN STOCKAGE THERMIQUE PCM [65] .....	13
FIGURE -I. 9-TOMATES FRAICHES / TOMATES SECHES [75] .....	15
FIGURE -II. 1-ARRANGEMENT DES PLANCHES DANS UNE PILE DE BOIS [67] .....	20
FIGURE -II. 2-DECOMPOSITION DE LA PILE DE BOIS EN VOLUMES DE CONTROLE DANS L' AIR ET DANS LE BOIS [76] .....	20
FIGURE -II. 3- DIFFUSION DE L' HUMIDITE DE L' INTERIEUR DU BOIS VERS LA SURFACE [76] .....	21
FIGURE -II. 4- TRANSFERT DE CHALEUR DANS LA MI-EPAISSEUR DE BOIS [76] .....	23
FIGURE -II. 5- ALGORIGRAMME DE RESOLUTION DU CODE DE CALCUL .....	26
FIGURE -II. 6-ORGANIGRAMME DE LA CONDITION D' ARRET DU PROGRAMME SELON LA NIMP° 15 .....	27
FIGURE -II. 7- CELLULE SOLAIRE AVEC STOCKAGE .....	29
FIGURE -II. 8- ENTITES PERTINENTES DE LA CELLULE SOLAIRE .....	30
FIGURE -II. 9- RESERVOIR DE STOCKAGE STRATIFIE [79] .....	30
FIGURE -III. 1- VARIATION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE DU CENTRE DES PLANCHES DE BOIS (LES NUMEROS DANS LA LEGENDE INDIQUENT LA POSITION DE LA PLANCHE A PARTIR DE L'ENTREE) .....	34
FIGURE -III. 2- TENEUR EN EAU A LA SURFACE DE CHAQUE PLANCHE DU LIT DE BOIS (LES NUMEROS DANS LA LEGENDE INDIQUENT LA POSITION DE LA PLANCHE A PARTIR DE L'ENTREE). .....	34
FIGURE -III. 3- TEMPERATURE DE L' AIR A LA SORTIE DE LA PILE DE BOIS AU COURS DU SECHAGE .....	35
FIGURE -III. 4- HUMIDITE ABSOLUE DE L' AIR DE SECHAGE A TRAVERS LA PILE DE BOIS (LES NUMEROS DANS LA LEGENDE INDIQUENT LA POSITION, A PARTIR DE L'ENTREE, DE LA PLANCHE CORRESPONDANT AU NEUD OU LA VALEUR EST CALCULEE) .....	36
FIGURE -III. 5-DIMENSIONS DE LA CHAMBRE DE TRAITEMENT ET LA PILE DE BOIS .....	37
FIGURE -III. 6- EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE AU CŒUR DE CHAQUE PLANCHE DU LIT DE BOIS ..	37
FIGURE -III. 7- EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TENEUR EN EAU MOYENNE A LA SURFACE DE CHAQUE PLANCHE DU LIT DE BOIS (LES NUMEROS DANS LA LEGENDE INDIQUENT LA POSITION DE LA PLANCHE A PARTIR DE L'ENTREE) .....	38
FIGURE -III. 8- EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE AU CŒUR DE LA DIXIEME PLANCHE DU LIT DU BOIS .....	38
FIGURE -III.9- EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TENEUR EN EAU A LA SORTIE DE CHAQUE PLANCHE DU LIT DE BOIS .....	39
FIGURE -III. 10- NOUVELLE CONDUITE DE SECHAGE .....	40
FIGURE -III. 11- EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE DU CENTRE DE CHAQUE PLANCHE DU LIT DE BOIS .....	41
FIGURE -III. 12- EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE AU CŒUR DE CHAQUE PLANCHE DU LIT DE BOIS LORS DU PRECHAUFFAGE .....	42
FIGURE -III. 13- SCHEMA D'ENSEMBLE DE L'INSTALLATION SOLAIRE POUR BOIS .....	43

FIGURE -III. 14-ÉVOLUTION TEMPORELLE HIVERNALE DES PARAMETRES DU CIRCUIT D'EAU.....	45
FIGURE -III. 15-ÉVOLUTION TEMPORELLE ESTIVALE DES PARAMETRES DU CIRCUIT D'EAU.....	46
FIGURE -III. 16- VARIATIONS DE LA TEMPERATURE DE L' AIR EN HIVER .....	47
FIGURE -III. 17- VARIATIONS DE LA TEMPERATURE DE L' AIR EN ETE .....	47
FIGURE -III. 18- EVOLUTION TEMPORELLE HIVERNALE DES PARAMETRES DU CIRCUIT D' AIR .....	48
FIGURE -III. 19- EVOLUTION TEMPORELLE ESTIVALE DES PARAMETRES DU CIRCUIT D' AIR .....	48
FIGURE -III. 20- VARIATIONS MENSUELLES DE LA SURFACE DE CAPTATION.....	49
FIGURE -III. 21- VARIATIONS MENSUELLES DU VOLUME DE STOCKAGE .....	49
FIGURE -III. 22- DISTRIBUTION MENSUELLE DE LA PRODUCTION DU BOIS TRAITE .....	51
FIGURE -III. 23- SIMULATION ANNUELLE DU SECHOIR SOLAIRE POUR BOIS .....	52
FIGURE -III. 24- PROFILS DES PARAMETRES DU SECHOIR POUR UNE SEMAINE ESTIVALE.....	53
FIGURE -III. 25- PROFILS DES PARAMETRES DU SECHOIR POUR UNE SEMAINE HIVERNALE.....	53
FIGURE -IV. 1- COORDONNEES GEOGRAPHIQUES DU SITE DU PROJET PNRI.....	57
FIGURE -IV. 2- SCHEMA EN 3D DE L'INSTALLATION EXPERIMENTALE.....	57
FIGURE -IV. 3- PROTOTYPE DE LA CELLULE SOLAIRE POUR LE TRAITEMENT THERMIQUE DU BOIS (A) SCHEMA SYNOPTIQUE DU PROTOTYPE (B) LE CHAMP SOLAIRE (C) LE RESERVOIR DE STOCKAGE (D) L'UNITE DE TRAITEMENT DE L' AIR (E) LA CHAMBRE DU TRAITEMENT PHYTOSANITAIRE (F) LE VASE D'EXPANSION ET L'ARMOIRE DE CONTROLE.....	58
FIGURE -IV. 4- SCHEMA D'IMPLANTATION DES CAPTEURS SOLAIRES [83].....	59
FIGURE -IV. 5- CENTRALE DE TRAITEMENT D' AIR [82].....	60
FIGURE -IV. 6- REGISTRES D' AIR A REGLAGE MANUEL (A) REGISTRE POUR L' AIR A RECYCLER (B) REGISTRE POUR L' AIR A RENOUVELER.....	60
FIGURE -IV. 7- EXEMPLES DES APPAREILS DE MESURES ET DE CONTROLE (A) DEBITMETRE (B) MANOMETRE (C) THERMOMETRE (D) ENSEMBLE DES APPAREILS DE MESURES POUR UNE CONDUITE (E) LES ARMOIRES ELECTRIQUES DE CONTROLE ET DE COMMANDE (F) LE MINI PC DE CONTROLE .....	61
FIGURE -IV. 8- SCHEMA EXPLICATIF DETAILLE DE LA CELLULE SOLAIRE POUR LE TRAITEMENT THERMIQUE DU BOIS [83].....	62
FIGURE -IV. 9- APPAREILS DE COMMANDE DE LA CELLULE (A) BOUTONS DE MARCHE/ARRET DU CIRCUIT D' AIR (B) TEMPERATURE DE CONSIGNE DE L' AIR DE TRAITEMENT .....	63
FIGURE -IV. 10- EMLACEMENT DES THERMOCOUPLES DANS LA CHAMBRE DE TRAITEMENT ET LA PILE DE BOIS..	63
FIGURE -IV. 11- APPAREILS D'ETALONNAGE DES THERMOCOUPLES(A) ENSEMBLE DES APPAREILS D'ETALONNAGE (B) UNITE D'ACQUISITION DES DONNEES (C) LE MODULE KEYSIGHT 34901A (D) MULTIPLEXEUR 20 CANAUX(E) BAIN FLUIDISE AVEC RESISTANCE ELECTRIQUE ET LE MODULE KEYSIGHT 34901A (F) LES THERMOCOUPLES (G) THERMOCOUPLES IMMERGES DANS UN BAIN FLUIDISE (H) PLANCHE DE BOIS AVEC THERMOCOUPLE INTEGRE.....	64
FIGURE -IV. 12- PROFILS DES PARAMETRES DE PERFORMANCE DU SYSTEME SOLAIRE.....	65
FIGURE -IV. 13- RAYONNEMENT SOLAIRE DURANT LA JOURNEE DE 18/05/2017 OU ON Y VOIT UNE PERIODE NUAGEUSE.....	66
FIGURE -IV. 14- DIFFERENTS POINTS DE MESURES DE LA TEMPERATURE DE LA PILE DE BOIS .....	66
FIGURE -IV. 15- PROCEDURE DES MESURES EXPERIMENTALES .....	67
FIGURE -IV. 16- ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE AU CŒUR DES PLANCHES DU BOIS.....	67
FIGURE -V. 1-ÉCOULEMENT HORIZONTAL DE L' AIR DE SECHAGE.....	72
FIGURE -V. 2-CINETIQUE DE SECHAGE HORIZONTAL DES TOMATES (MESURES DE [41]).....	72
FIGURE -V. 3-TEMPERATURE DE SORTIE DE L' AIR DE SECHAGE .....	74
FIGURE -V. 4-HUMIDITE RELATIVE DE SORTIE DE L' AIR DE SECHAGE .....	74
FIGURE -V. 5- PROPORTION DU DEBIT DE L' AIR AMBIANT DANS LE MELANGEUR A RENOUVELLEMENT D' AIR AU COURS D'UN CYCLE DE SECHAGE .....	74
FIGURE -V. 6- MODELE SOUS TRNSYS DU SECHOIR SOLAIRE POUR TOMATES SANS STOCKAGE ET AVEC (A) CAPTEURS A AIR PLAN ; ET (B) CAPTEURS A AIR SOUS-VIDE.....	75
FIGURE -V. 7- DEBIT MASSIQUE ET TEMPERATURES D'ENTREE/ SORTIE DE L' AIR DES CAPTEURS SOLAIRES DE TYPE .....	76
FIGURE -V. 8- DEBIT MASSIQUE ET TEMPERATURES D'ENTREE/ SORTIE DE L' AIR DES CAPTEURS SOLAIRES DE TYPE TUBES SOUS-VIDE.....	77
FIGURE -V. 9-MODELE TRNSYS DU SECHOIR SOLAIRE AVEC STOCKAGE D' AIR CHAUD .....	78

FIGURE -V. 10-MODELE TRNSYS DU SECHOIR SOLAIRE AVEC STOCKAGE D'EAU CHAUDE .....	78
FIGURE -V. 11-INSTALLATION POUR LE SECHAGE SOLAIRE DES TOMATES .....	80
FIGURE -V. 12- TEMPERATURES D'ENTREE DE L'EAU ET DE SORTIE DE L'AIR AVEC LES DEBITS CORRESPONDANTS DANS L'ECHANGEUR DE CHALEUR EAU/AIR EN HIVER PENDANT UNE SEULE JOURNEE .....	81
FIGURE -V. 13- TEMPERATURE D'ENTREE ET DE SORTIE DE L'ECHANGEUR DE CHALEUR EAU-AIR EN HIVER PENDANT TROIS JOURS SUCCESSIFS .....	82
FIGURE -V. 14- TEMPERATURE D'ENTREE ET DE SORTIE DE L'ECHANGEUR DE CHALEUR EAU/AIR EN ETE PENDANT UNE SEULE JOURNEE.....	82
FIGURE -V. 15- TEMPERATURE D'ENTREE ET DE SORTIE DE L'ECHANGEUR DE CHALEUR EAU/AIR EN ETE POUR TROIS JOURS SUCCESSIFS .....	82
FIGURE -V. 16- PERFORMANCES THERMIQUES DU SECHOIR SOLAIRE POUR UNE ANNEE TYPIQUE.....	83
FIGURE -V. 17- TEMPERATURES DE L'EAU DE STOCKAGE, TEMPERATURE ET DEBIT DE L'AIR DE SECHAGE DANS L'ECHANGEUR DE CHALEUR POUR UNE SEMAINE ESTIVALE (TEMPERATURE DE L'AIR DE CONSIGNE = 55°C)	83
FIGURE -V. 18- TEMPERATURES DE L'EAU DE STOCKAGE, TEMPERATURE ET DEBIT DE L'AIR DE SECHAGE DANS L'ECHANGEUR DE CHALEUR POUR UNE SEMAINE HIVERNALE (TEMPERATURE DE L'AIR DE CONSIGNE = 55°C) .....	84
FIGURE -VI. 1- VARIATIONS MENSUELLES DE LA SURFACE DE CAPTATION .....	86
FIGURE -VI. 2 VARIATIONS MENSUELLES DU VOLUME DE STOCKAGE.....	86
FIGURE -VI. 3- VARIATIONS MENSUELLES DU RAPPORT ENTRE LE VOLUME DE STOCKAGE ET LA SURFACE DE CAPTATION.....	87
FIGURE -VI. 4-MODELE TRNSYS DU SECHOIR SOLAIRE SANS ENSOLEILLEMENT .....	88
FIGURE -VI. 5-TEMPERATURE D'ENTREE ET DE SORTIE DE L'ECHANGEUR DE CHALEUR EAU/AIR EN HIVER AVEC ENSOLEILLEMENT SANS COUVERTURE DU CIEL. ....	89
FIGURE -VI. 6- TEMPERATURE D'ENTREE ET DE SORTIE DE L'ECHANGEUR DE CHALEUR EAU/AIR EN HIVER AVEC UNE COUVERTURE DU CIEL.....	89
FIGURE -VI. 7- TEMPERATURE D'ENTREE ET DE SORTIE DE L'ECHANGEUR DE CHALEUR EAU/AIR EN ETE AVEC ENSOLEILLEMENT SANS COUVERTURE DU CIEL .....	89
FIGURE -VI. 8- TEMPERATURE D'ENTREE ET DE SORTIE DE L'ECHANGEUR DE CHALEUR EAU/AIR EN ETE AVEC COUVERTURE DU CIEL .....	90
FIGURE -VI. 9- TEMPERATURES DE L'EAU DE STOCKAGE, TEMPERATURE ET DEBIT DE L'AIR DE SECHAGE DANS L'ECHANGEUR DE CHALEUR POUR TOUTE L'ANNEE (TEMPERATURE DE L'AIR DE CONSIGNE = 45°C) .....	92
FIGURE -VI. 10- TEMPERATURES DE L'EAU DE STOCKAGE, TEMPERATURE ET DEBIT DE L'AIR DE SECHAGE DANS L'ECHANGEUR DE CHALEUR POUR UNE SEMAINE ESTIVALE (TEMPERATURE DE L'AIR DE CONSIGNE = 45°C)	92
FIGURE -VI. 11- TEMPERATURES DE L'EAU DE STOCKAGE, TEMPERATURE ET DEBIT DE L'AIR DE SECHAGE DANS L'ECHANGEUR DE CHALEUR POUR UNE SEMAINE HIVERNALE (TEMPERATURE DE L'AIR DE CONSIGNE = 45°C) .....	92
FIGURE -VI. 12- VARIATIONS MENSUELLES DE LA SURFACE DE CAPTATION (TEMPERATURE DE L'AIR DE CONSIGNE = 45°C) .....	93
FIGURE -VI. 13- VARIATIONS MENSUELLES DU VOLUME DE STOCKAGE (TEMPERATURE DE L'AIR DE CONSIGNE 45°C) .....	93
FIGURE -VI. 14- TEMPERATURES DE L'EAU DE STOCKAGE, TEMPERATURE ET DEBIT DE L'AIR DE SECHAGE DANS L'ECHANGEUR DE CHALEUR POUR TOUTE L'ANNEE (TEMPERATURE DE L'AIR DE CONSIGNE = 65°C) .....	94
FIGURE -VI. 15- TEMPERATURES DE L'EAU DE STOCKAGE, TEMPERATURE ET DEBIT DE L'AIR DE SECHAGE DANS L'ECHANGEUR DE CHALEUR POUR UNE SEMAINE ESTIVALE (TEMPERATURE DE L'AIR DE CONSIGNE = 65°C)	94
FIGURE -VI. 16- TEMPERATURES DE L'EAU DE STOCKAGE, TEMPERATURE ET DEBIT DE L'AIR DE SECHAGE DANS L'ECHANGEUR DE CHALEUR POUR UNE SEMAINE HIVERNALE (TEMPERATURE DE L'AIR DE CONSIGNE = 65°C) .....	95
FIGURE -VI. 17-VARIATIONS MENSUELLES DE LA SURFACE DE CAPTATION (TEMPERATURE DE L'AIR DE CONSIGNE = 65°C) .....	96
FIGURE -VI. 18- VARIATIONS MENSUELLES DU VOLUME DE STOCKAGE (TEMPERATURE DE L'AIR DE CONSIGNE 65°C) .....	96
FIGURE -VI. 19- ENERGIE REQUISE ANNUELLE DU SECHOIR SOLAIRE POUR LES TOMATES .....	97

FIGURE -VII. 1- COORDONNEES GEOGRAPHIQUES DU SITE DU PROJET PRF .....	98
FIGURE -VII. 2- PLAQUE DU PROJET PRF.....	99
FIGURE -VII. 3-DIMENSIONS DE LA CHAMBRE DE SECHAGE D'AGRIFOOD.....	99
FIGURE -VII.4 -CHAMBRE DE SECHAGE D'AGRIFOOD EN DIFFERENTES VUE .....	100
FIGURE -VII. 5-EQUIPEMENTS DE L'INTERIEUR DE LA CHAMBRE DE SECHAGE .....	100
FIGURE -VII. 6-MODIFICATIONS A APPORTER A LA CELLULE DE SECHAGE .....	101
FIGURE -VII. 7-TOLE A METTRE AU-DESSUS DE LA PARTIE SUPERIEURE DE LA PLAQUE PERFOREE EXISTANTE....	101
FIGURE -VII. 8-PLAQUE COULISSANTE (PERMETTANT DE CHANGER D'UN FONCTIONNEMENT AU GPL A SOLAIRE) .....	101
FIGURE -VII. 9- EMPLACEMENT DE L'UNITE DE TRAITEMENT D'AIR .....	102
FIGURE -VII. 10-EMPLACEMENT DU CHAMP SOLAIRE ET DU BALLON DE STOCKAGE .....	102
FIGURE -VII. 11- LE PROTOTYPE DU SECHOIR SOLAIRE POUR LES TOMATES (A) SCHEMA SYNOPTIQUE DU PROTOTYPE [86] (B) LE CHAMP SOLAIRE (C) LE RESERVOIR DE STOCKAGE (D) L'UNITE DE TRAITEMENT DE L'AIR (E) LA CHAMBRE DU TRAITEMENT PHYTOSANITAIRE (F) CHARIOT DES TOMATES A L'INTERIEUR.....	103
FIGURE -VII.12 - SCHEMA D'IMPLANTATION DES CAPTEURS SOLAIRES DU SECHOIR SOLAIRE POUR LES TOMATES [86].....	104
FIGURE -VII. 13-EXEMPLES DES APPAREILS DE MESURES ET DE CONTROLE (A) MANOMETRE (B) ENSEMBLE DES APPAREILS DE MESURES POUR UNE CONDUITE (C) LES ARMOIRES ELECTRIQUES DE CONTROLE ET DE COMMANDE (D) LE MINI PC DE CONTROLE.....	105
FIGURE -VII. 14-APPAREILS DE COMMANDE DU SECHOIR(A) BOUTONS DE MARCHE/ARRET DU CIRCUIT D'AIR (B) AFFICHEUR DE LA TEMPERATURE DE CONSIGNE DE L'AIR DE TRAITEMENT .....	106

# Liste des Tableaux

TABLEAU -III. 1-RESULTATS DU CODE DE CALCUL.....	40
TABLEAU -III. 2- DIFFERENTES DIMENSIONS DES COMPOSANTS DE LA CELLULE SOLAIRE .....	54
TABLEAU- V. 1-COMPARAISON ENTRE LES DEUX TYPES DE SECHOIR SOLAIRE AVEC STOCKAGE	79
TABLEAU - VI .1- DIFFERENTES DIMENSIONS DES SECHOIRS EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE L' AIR DE SECHAGE .....	91



# *Introduction*



# INTRODUCTION

Face à la pénurie annoncée des énergies fossiles, leurs prix qui ne cessent de grimper au cours de ce siècle et la hausse de la consommation énergétique en parallèle avec une déchéance de la production nationale, la Tunisie a manifesté son intérêt à incorporer les sources d'énergies renouvelables de remplacement dans certains choix industriels et à accélérer la mise en œuvre des projets qui visent la maîtrise de l'énergie.

Par ailleurs, la situation géographique de la Tunisie lui permet de bénéficier d'un taux d'ensoleillement important. En effet, elle a l'avantage de recevoir un flux solaire consistant durant la majeure partie de l'année, avec une moyenne de  $700 \text{ W/m}^2$ , avec des heures d'ensoleillement assez conséquentes, ce qui donne environ une énergie incidente de  $1850 \text{ kWh/m}^2$  par an [1]. De plus, les températures moyennes sont de  $12^\circ\text{C}$  en décembre et de  $30^\circ\text{C}$  en juillet. Parfois elles dépassent les  $40^\circ\text{C}$  en été [2], ce qui favorise le recours à l'énergie solaire qui demeure une source fiable, propre et relativement simple d'utilisation.

Le domaine du séchage, l'un des plus forts consommateurs d'énergie, apparaît comme le meilleur candidat à l'utilisation de l'énergie solaire vu qu'il représente une des opérations unitaires les plus populaires dans l'industrie tunisienne, tout secteur confondu. Durant les quinze dernières années, le procédé de séchage a connu de nombreux progrès technologiques et la gamme de séchoirs disponibles sur le marché s'est élargie. Cependant, le séchage se caractérise par des investissements importants et des coûts d'exploitation qu'il faut rentabiliser.

L'acquisition d'un séchoir demande au préalable une étude précise des besoins de l'entreprise, en tenant compte de sa production, des exigences de ses clients et de ses perspectives de développement et/ou de positionnement sur de futurs marchés. L'identification de ces objectifs est primordiale à l'acquisition d'un système de séchage afin de trouver les solutions appropriées pour satisfaire les besoins et d'utiliser le matériel d'une façon optimale susceptible d'assurer la qualité de séchage désirée.



Dans ce contexte, on se propose de développer des séchoirs solaires en Tunisie dans le but d'exploiter au mieux cette source d'énergie renouvelable en vue d'apporter des solutions concrètes aux demandes spécifiques du secteur industriel.

L'étude présentée dans ce mémoire s'inscrit dans deux projets nationaux, soient le Programme National de Recherche et Innovation (PNRI) et un Projet de Recherche Fédéré (PRF). Le premier est financé par le Ministère de l'Industrie et des Petites et Moyennes Entreprises et géré par le Centre Technique de l'Industrie du Bois et de l'Ameublement (CETIBA) [3]. Tandis que le deuxième est financé par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique et géré par l'Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie (ANME) [4]. Outre l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir (ENIM), les projets ont comme partenaires académiques respectivement l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT) pour le PNRI et l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS) et la Faculté des Sciences de Tunis (FST) pour le PRF. De même, les partenaires industriels des projets sont Advanced Energy Systems pour le PNRI et AGRIFOOD pour le PRF.

L'objectif du PNRI est la modélisation, la conception et l'optimisation d'une cellule solaire pour le traitement phytosanitaire du bois d'emballage selon la norme internationale NIMP n°15 [5]. Le but du PRF est de concevoir et d'optimiser un séchoir solaire pour les tomates.

Un état de l'art sur le séchage solaire est présenté dans le premier chapitre de ce document. Nous y décrivons les différentes technologies solaires avec une emphase sur les séchoirs solaires, leurs principes de fonctionnement et leurs éléments constitutifs. Une revue des travaux de recherche pour le développement de ces séchoirs a été élaborée. A la fin du chapitre, les deux produits à sécher et les propriétés qui les caractérisent sont présentés.

Le reste du document est divisé en deux grandes parties. La première, la partie (A) est consacrée à l'étude des performances d'une cellule solaire pour le traitement phytosanitaire du bois d'emballage selon la norme internationale NIMP n°15. Cette partie contient trois chapitres : deux à quatre.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les deux outils de simulations numériques employés (un code-maison en FORTRAN, et le logiciel commercial TRNSYS©), tout en mentionnant les entrées, les modèles et les modifications apportées à chacun d'entre eux.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de la cellule solaire pour le bois, où les simulations du processus de traitement thermique ont permis de prédire les performances thermodynamiques du système solaire, le dimensionnement et la mise en place d'un prototype à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT).



Dans le quatrième chapitre, nous traitons les détails de la mise en place du prototype expérimental, ainsi qu'une étude expérimentale préliminaire de la cellule solaire pour le traitement phytosanitaire du bois d'emballage.

La deuxième partie, la partie (B) intitulée « séchoir solaire pour tomates » représente une seconde étude dont le but est de concevoir et d'optimiser un séchoir solaire pour les tomates. Cette partie contient aussi trois chapitres : cinq à sept.

Dans le cinquième chapitre, nous présentons les cinétiques de séchage des tomates qui ont été obtenues expérimentalement par un des partenaires du PRF, permettant de déterminer les paramètres contrôlant l'opération de séchage et qui serviront, par la suite, comme données d'entrée pour la simulation du séchoir complet. La même approche de dimensionnement dans l'interface de travail du logiciel TRNSYS présentée dans le deuxième chapitre, a été adoptée pour le dimensionnement de ce séchoir.

Le sixième chapitre est consacré à l'estimation et l'optimisation des composants constituant le séchoir solaire pour les tomates, suivi d'une analyse de sensibilité de ses paramètres. Cette étude a permis de prouver la faisabilité technique du concept et son implémentation de l'installation à l'usine du partenaire industriel du PRF, AGRIFOOD.

Dans le septième et dernier chapitre, les détails de la mise en place du séchoir solaire ont été présentés. Ainsi que les modifications apportées à la chambre de séchage existante afin de permettre l'hybridation du système solaire et du brûleur à gaz en cas de nécessité.



## *Chapitre I*

# *Etat de l'Art du Séchage Solaire*



# Chapitre I : Etat de l'Art du Séchage Solaire

## I.1 Introduction

Dans un monde où la demande énergétique augmente, la question du remplacement d'énergies fossiles par des énergies renouvelables et propres est essentielle pour un développement durable. Il est question, pour la Tunisie comme pour tous les pays, de suivre une démarche qui s'intègre dans une stratégie d'exploitation des gisements d'énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire et de l'efficacité énergétique, ainsi que de mettre en place des politiques pour encourager le développement du domaine solaire dans leur pays.

Cette démarche, a mondialement engendré dans les dernières décennies une prolifération de travaux de développement de séchoirs solaires [6], qui portent surtout sur l'amélioration du rendement des systèmes et la baisse des coûts des équipements.

Conformément à cette démarche, la Tunisie a entrepris de promouvoir des projets de séchage solaire pour satisfaire la demande en séchage de différents produits industriels et agroalimentaires tels que le bois [7] et les tomates [8].

## I.2 Energie Solaire

Des études ont révélé que l'énergie solaire peut satisfaire la demande mondiale d'énergie car elle est la plus abondante de toutes les énergies renouvelables [9]. Elle constitue une source d'énergie prometteuse dans le monde vu qu'elle est disponible en grande quantité, en tout point de la surface terrestre [10], ce qui la place parmi les meilleures alternatives pour certaines applications industrielles.

De nombreuses recherches scientifiques sont en cours pour accroître et améliorer l'efficacité de l'industrie solaire, afin de la rendre plus productive en termes d'utilisation de l'énergie propre [11].



La distribution du rayonnement solaire et son intensité sont deux paramètres clés qui déterminent l'efficacité des technologies solaires. La distribution de l'énergie solaire est très variable d'un pays à un autre, comme le montre la figure I.1. La Tunisie bénéficie d'un important potentiel solaire car l'intensité et la durée de l'ensoleillement annuel sur une surface horizontale est élevée et reste sensiblement constante d'une année à l'autre.

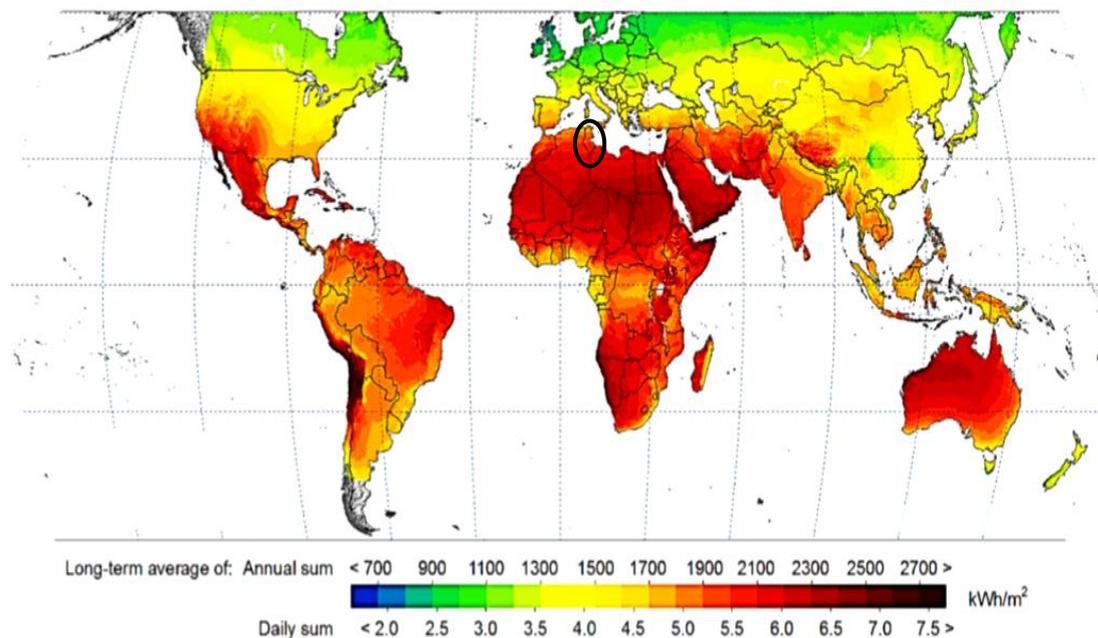


Figure -I.1-Carte d'irradiation solaire horizontale globale (GHI) [12]

### I.3 Séchage Solaire

Le séchage est une opération importante dans toute transformation de produits qui consiste à soustraire une partie de l'eau qu'ils contiennent. Le séchage permet, entre autres, d'améliorer la conservation des denrées alimentaires périssables, d'élargir leur commercialisation en les rendant disponibles toute l'année, de faciliter leur transport et de préserver le bois d'emballage en respectant les normes phytosanitaires internationales assez contraignantes [13].

Un problème généralement posé en séchage est celui de l'utilisation d'énergies fossiles. Il s'agit d'un processus classé parmi les procédés très énergivores. Cela explique le recours au développement des technologies de séchage de plus en plus propres et performants et principalement les séchoirs solaires [14, 15, 16, 17, 18] qui se présentent selon une gamme variée de configurations et en deux catégories : agricole et industrielle.



### I.3.1 Différents Principes de Séchage Solaire

Il y a plusieurs types de séchoirs solaires qui ont été développés [19, 20]. Généralement, on peut les classer en deux catégories. La première comprend les séchoirs à « séchage solaire direct » où la matière à sécher reçoit directement le rayonnement solaire [21]. Ils n'utilisent que l'écoulement naturel de l'air chauffé et peuvent être facilement construits avec des matériaux peu coûteux et disponibles localement, ce qui les rend appropriés pour les petites exploitations. Les séchoirs de la deuxième catégorie sont à « séchage solaire indirect » où un dispositif solaire capte l'énergie solaire destinée à préchauffer un fluide caloporteur qui circule ensuite sur la matière à sécher [22]. Leurs investissements sont importants et varient selon la configuration adoptée.

Quel que soit le procédé retenu, la chaleur apportée au produit diffuse à l'intérieur de ce dernier, entraînant une augmentation de sa température, une migration de l'eau vers la surface du produit et une évaporation de l'eau en surface. Pour éviter la saturation de l'air ambiant qui pourrait résulter de cette évaporation à la surface du matériau, un renouvellement d'air est réalisé en garantissant un écoulement d'air naturel ou forcé.

#### I.3.1.1 Séchoirs solaires directs

Dans un séchoir solaire direct, les rayons du soleil frappent directement le produit à sécher [23], un mouvement d'air se fait à travers l'appareil par tirage naturel dû à son réchauffement (Figure I.2). Il est soumis à un effet de serre, au même titre qu'un absorbeur de capteur plan, d'où une amélioration du bilan radiatif et une augmentation de la température du produit à sécher, ce qui permet d'amortir notablement, le temps de séchage par rapport aux systèmes traditionnels de séchage solaire à l'air libre.

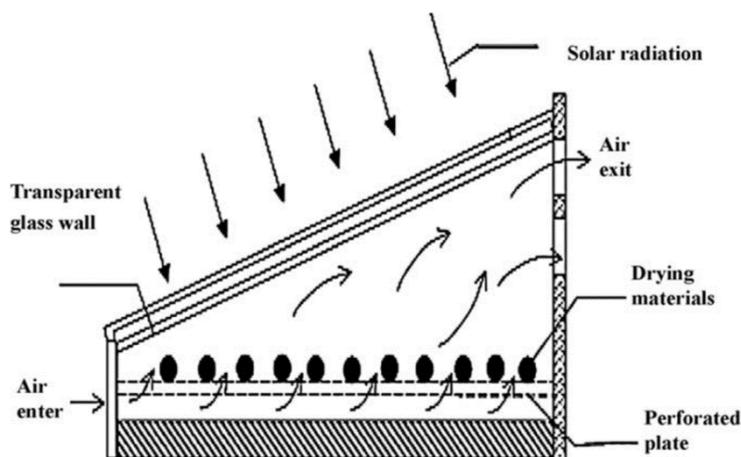


Figure -I. 2- Schéma d'un séchoir solaire direct à convection naturelle [25]



Quelques soit la conception proposée, la mise en œuvre du séchage solaire en mode direct par convection naturelle reste partielle car il n'y a pas ou peu de contrôle du taux de séchage, celui-ci n'est pas régulier, la capacité de séchage est faible et le rendement reste insuffisant. De plus, les surchauffes superficielles dues à l'exposition excessive au soleil, tendent à entraîner une perte de la qualité du produit par destruction de certaines vitamines et par sa photo-oxydation, dues aux rayons ultra-violetts transmis par la couverture. Ces surchauffes peuvent être limitées si l'on met en place un écoulement d'air par convection forcée à l'aide, dans la majorité des cas, d'un ventilateur [24] comme le montre le design typique présenté à la figure I.3.

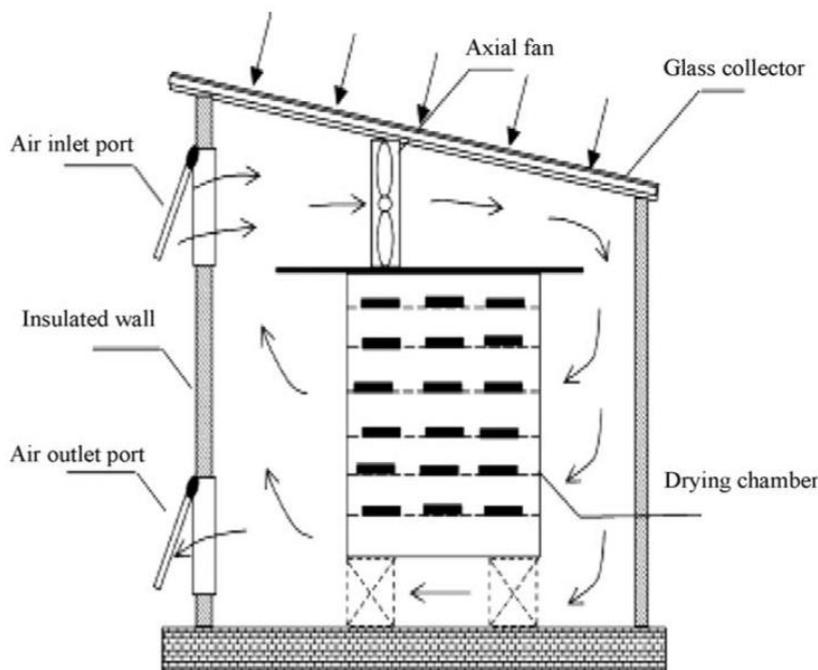


Figure -I. 3-Schéma d'un séchoir solaire direct à convection forcée [25]

Les recherches consacrées à l'étude des performances des séchoirs solaires directs ont été conduites sur plusieurs axes, notamment sur l'amélioration de la qualité du séchage en contrôlant la circulation et la température de l'air dans le séchoir, afin de le rendre exploitable pour sécher une variété de produits [26].

### I.3.1.2 Séchoirs solaires indirects et ses différentes technologies

Pour pouvoir obtenir un matériau séché selon des caractéristiques données, il est essentiel de contrôler sa température et sa teneur en eau au cours du processus de séchage. On a alors recours à des dispositifs conçus pour que le séchage fonctionne sous forme indirecte et où la température et l'humidité de l'air de séchage peuvent être régulées [27].

Des capteurs solaires sont alors consacrés pour préchauffer l'air de séchage afin de contrôler ses caractéristiques hygrothermiques avant qu'il ne circule sur le produit.



Dans le choix technologique d'un séchoir solaire indirect, il n'y a pas de configuration universelle. Divers travaux de recherche ont été menés sur les technologies de séchage solaire pour divers produits, comprenant des modélisations mathématiques et numériques ainsi que des études expérimentales [28, 29]. Certains chercheurs envisageaient des séchoirs à convection à air chaud par l'utilisation d'un ventilateur centrifuge et une batterie chauffante [30, 31, 32, 33, 34], tandis que d'autres s'intéressaient à des séchoirs à micro-ondes [35, 36] ou à la combinaison de micro-ondes et du processus de convection [37, 38]. En outre, des efforts de recherche se sont concentrés sur la réduction du temps de séchage [39, 40, 41], et sur la diminution du coût de l'investissement des séchoirs fonctionnant à l'énergie solaire, dont le but de leur utilisation est de minimiser la consommation de l'énergie [42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54].

De nombreux séchoirs solaires indirects ont été conçus et développés à travers le monde [55, 56], dont la technique de construction répond aux exigences de séchage particulières de certains produits. Ils sont composés généralement d'un capteur solaire et d'une unité de séchage munie d'un ventilateur et des conduits pour la circulation de l'air (Figure I.4). Des points de vue fonctionnement et compétitivité économique, cette classe de séchoir demeure plus efficace que les séchoirs solaires directs. La durée de séchage, à faible températures, peut être réduite de 18 à 50% selon plusieurs facteurs (type des matériaux de construction, taux d'ensoleillement et le site d'implantation [57]) que celle du séchage solaire direct.

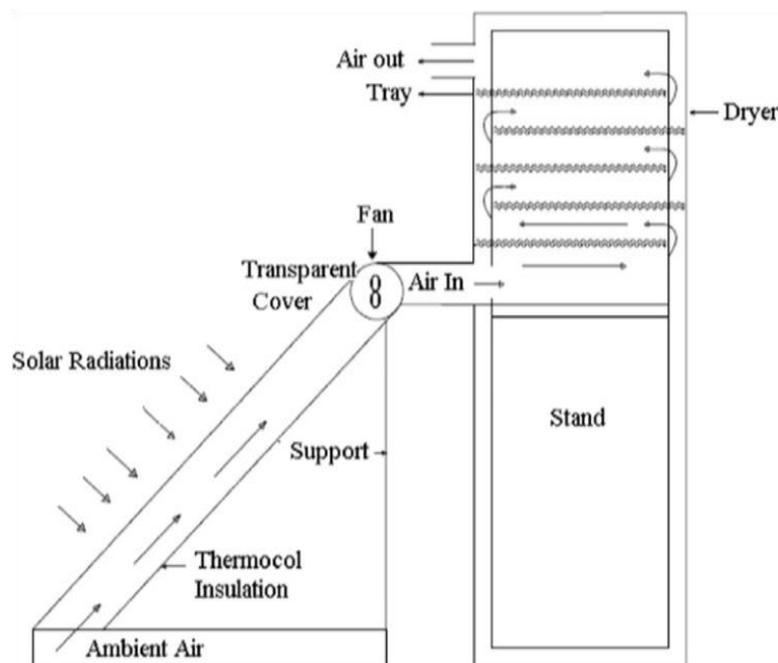


Figure -I. 4- Schéma d'un séchoir solaire indirect [57]



Le souci majeur de l'industrie du séchage est la réduction de la consommation de l'énergie tout en améliorant la qualité du produit et en restant compétitif. Par conséquent, le développement des techniques des séchoirs solaires doit permettre d'économiser sur l'investissement initial des installations solaires.

Il en ressort qu'il est complexe d'avoir des éléments indiscutables de validation et de comparaison entre les divers modèles de séchoirs, soit l'outil de séchage est encore au stade d'expérimentation et de validation dans les conditions réelles d'utilisation, soit il est difficile d'extrapoler les résultats en zone climatique différente et/ou pour des produits différents.

Fudholi et al. [58] ont prouvé que l'une des applications les plus attirantes et les plus rentables de l'énergie solaire est le séchage des produits agricoles et marins. Ils ont présenté de nombreux types de séchoirs solaires développés dans le monde, y compris les séchoirs solaires directs / indirects, les séchoirs solaires mixtes et hybrides. Selon eux, les futures recherches de développement des séchoirs solaires doivent se baser sur un meilleur rendement des capteurs solaires et l'utilisation des systèmes de stockage pour les produits à longue durée de séchage.

Après avoir présenté et discuté différentes alternatives de conception de séchoirs solaires et après les avoir classés en deux catégories : séchoirs solaires passifs et actifs, comprenant chacun des séchoirs de types direct et indirect, Bennamoun [24] a comparé leurs efficacités en se basant sur leur temps de séchage pour différents produits agricoles.

Mustayen et al [14] ont étudié les performances et les applications des différents types et modes de séchage solaire des produits agricoles dans les pays tropicaux et subtropicaux. Ils ont discuté des méthodes pour créer des conceptions simples et moins coûteuses des séchoirs solaires.

Kumar et al [57] ont évalué la conception, le développement et la performance de divers types de séchoirs solaires, tout en présentant une étude technico-économique. Ils ont présenté également certaines caractéristiques physiques de différents produits à sécher. A partir des études faites, ils ont mentionné que le séchoir solaire indirect à convection forcée est le plus rentable par rapport à la réduction du temps de séchage et à l'amélioration de la qualité du produit séché. D'où, ils ont recommandé d'améliorer le rendement du capteur solaire à air, étant donné que, selon eux, il s'agit du composant le plus influant du système, et intégrer le stockage de l'énergie thermique via l'utilisation d'un matériau à changement de phase pour les futures recherches.



Prakash et al [55] ont envisagé différentes alternatives de conception des séchoirs solaires. Ils ont mis l'accent sur l'importance des techniques de modélisation pour la prédiction des performances des différents types de systèmes de séchage solaire et l'amélioration de l'efficacité et de la qualité du séchage.

Shanmugam et Natarajan [59] ont étudié les performances d'un séchoir solaire indirect à convection forcée et déshydratant intégré (Figure I.5) pour le séchage des petit-pois verts et des tranches d'ananas, pour une installation au Bangladesh. Leur dispositif a permis d'obtenir un séchage uniforme dans tous les plateaux avec une bonne qualité en termes de couleur et de dégradation microbologique. Ainsi, le temps de séchage a été réduit de 2 heures pour le petit-pois et de 4 heures pour 120 à 150 kg d'ananas. L'efficacité de ce séchoir a été validée, elle varie entre 43% et 55 % et il peut être utilisé pour sécher divers produits agricoles comme a été rapportée par Vijay et al [60] dans leur article de synthèse.

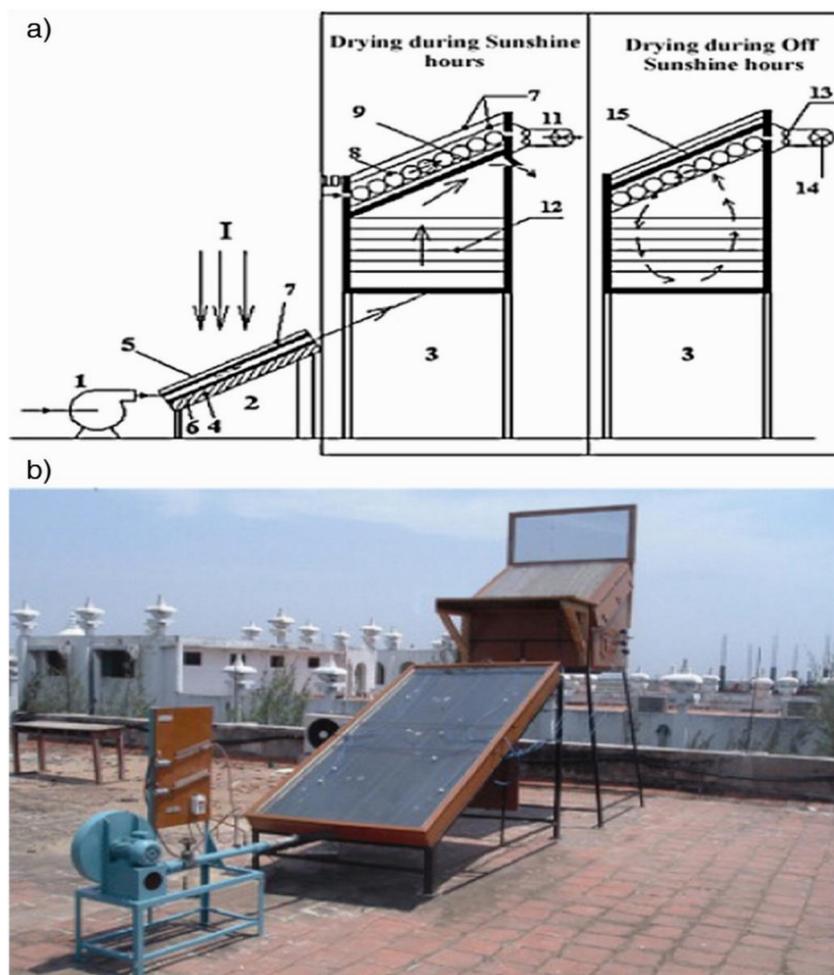


Figure -I. 5-(a) Schéma du séchoir solaire à déshydratant intégré. 1. Ventilateur, 2. Capteur solaire à air à plaque plate, 3. Chambre de séchage, 4. Isolation, 5. Plaque absorbante, 6. Plaque de fond, 7. Couvercle transparent, 8. Lit de déshydratant, 9. Contreplaqué, 10. Entrée d'air, 11. Conduit pour sortie d'air, 12. Plateaux de séchage, 13. Ventilateur réversible, 14. Soupape, 15. Contreplaqué. (b) Une photo réelle du dispositif expérimental [59]



Au cours des dernières décennies, les séchoirs solaires ont eu une série de modifications dont le but est d'optimiser leurs efficacités thermiques et la qualité de séchage de leurs produits, de rendre le processus plus efficace en protégeant l'environnement et nécessairement d'économiser l'énergie [61]. Les séchoirs solaires contournent la majorité des inconvénients du séchage classique direct au soleil.

Luna et al [46] ont étudié l'évolution des séchoirs solaires en se basant sur l'analyse du développement de la conception des différents séchoirs existants et leurs composants. A la suite de cette analyse, ils ont proposé une nouvelle conception (Figure I.6) installée au Mexique, en suivant les tendances de développement des systèmes technologiques afin de s'adapter aux exigences futures du séchage. Par exemple, une partie de leur travail a été consacrée à l'étude de la performance du séchoir en utilisant le stockage de l'énergie thermique. Les résultats ont montré une meilleure qualité du produit séché et une meilleure stabilité du processus de séchage.

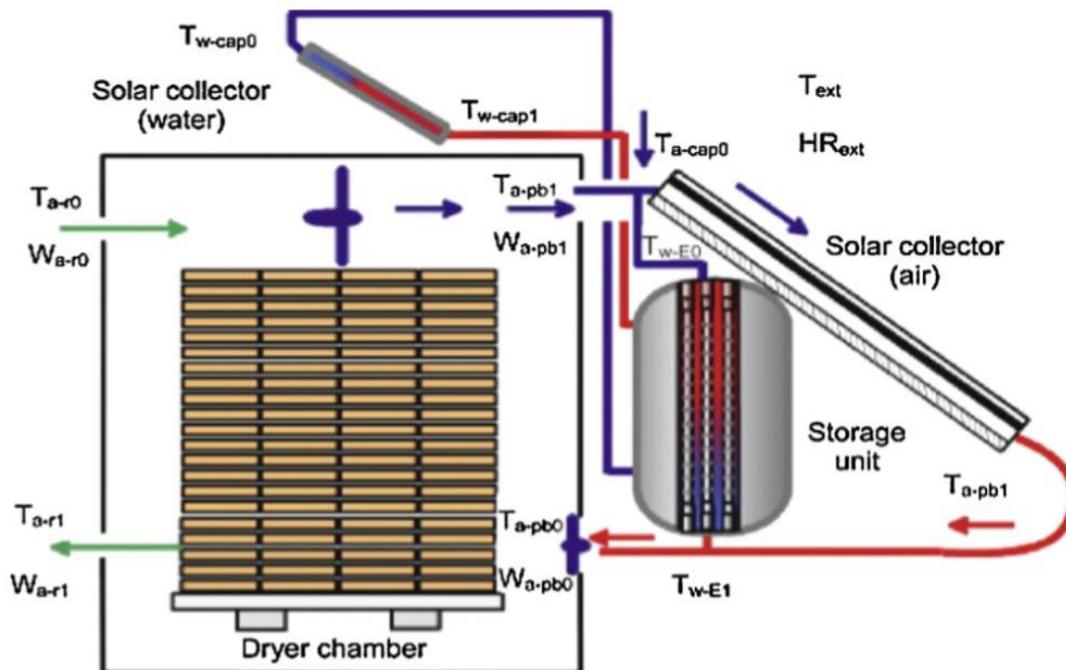


Figure -I. 6-Séchoir solaire avec stockage d'énergie [46]

Fadhel et al. [62] et Janjai et al. [63] ont étudié expérimentalement le séchage solaire de fleurs de rosella, de la citronnelle et de tranches de banane à l'aide d'un séchoir solaire intégré au toit d'un bâtiment (Figure I.7), et ils ont démontré que le produit sec a une meilleure qualité par rapport à celui du marché.



Le séchoir se compose de deux réseaux de capteurs solaires à air selon les deux orientations : nord et sud, intégrés à un toit et d'une surface de captation de 108 m<sup>2</sup>, d'un bac de séchage et d'un appoint d'énergie électrique pour alimenter un ventilateur à flux axial pour fournir le débit d'air requis. L'efficacité journalière moyenne du capteur était de 35% et le temps de retour sur l'investissement était 5 ans.

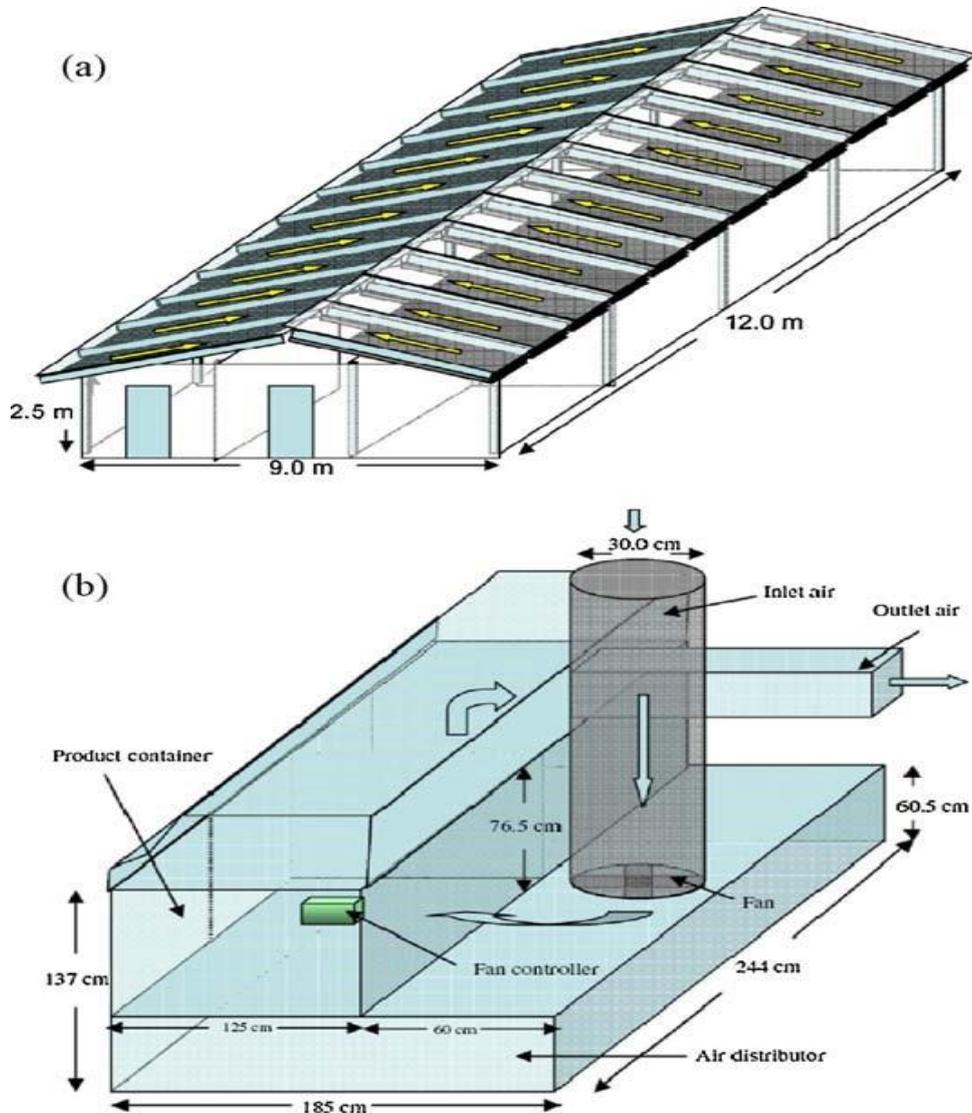
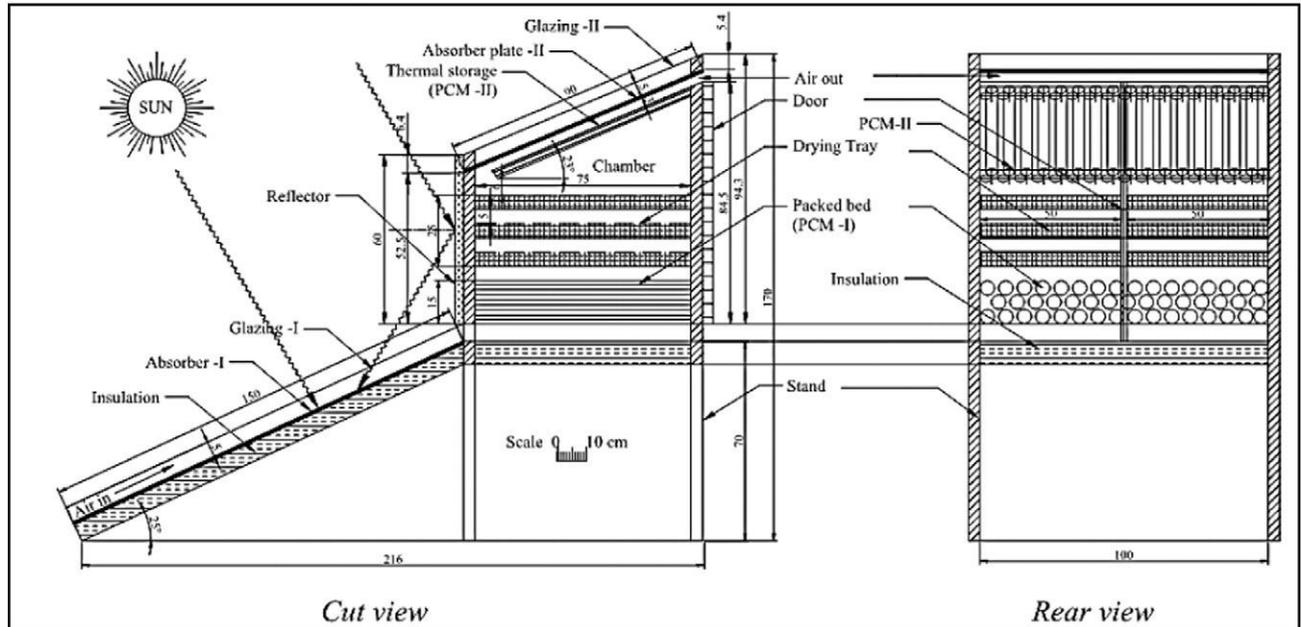


Figure -I. 7-(a) Système de séchage solaire intégré au toit et (b) le bac de séchage [63]

Jain et Tewari [64] ont conçu et fabriqué un séchoir solaire indirect muni d'un stockage d'énergie avec changement de phase PCM et de trois capteurs solaires d'une surface de captation de 6 m<sup>2</sup>, pour les conditions climatiques de Chennai, Inde. Les expériences ont montré que, pendant le fonctionnement nocturne du séchoir, l'efficacité thermique était de 28,2%. L'investissement initial de ce séchoir solaire n'était pas élevé et le temps de retour était d'une année et demie.



**Figure -I. 8-Schéma du séchoir solaire à convection naturelle avec un absorbeur à plaque plate et un stockage thermique PCM [65]**

Bal et al [54] ont examiné des séchoirs solaires pour les produits agro-alimentaires à petite échelle en présentant l'importance du stockage de l'énergie thermique pour le bon déroulement du processus de séchage. Ils ont cité, en particulier, le stockage de la chaleur sensible et le stockage de la chaleur latente dans les matériaux à changement de phase et son influence sur le rendement du séchage lorsqu'il n'y a pas d'ensoleillement.

### I.3.2 Séchage Solaire du Bois

#### I.3.2.1 Séchoir Solaire pour Bois

Le bois est un matériau naturel rigide, résistant et isolant, obtenu à partir du tronc et des branches des arbres. Il possède des propriétés chimiques et mécaniques remarquables qui permettent de l'utiliser à la fois dans le chauffage, la construction, l'ameublement, la fabrication d'outils et d'objets artistiques et dans des produits dérivés comme certains textiles et le papier. De plus, le bois est utilisé pour l'emballage et le transport (sous forme de palette) de marchandises.

Lors de son utilisation, notamment en construction et ameublement, les dimensions et la forme des composants en bois doivent être stables. De plus, ils doivent être protégés des attaques microbiennes ou d'insectes. Cette stabilité et cette protection sont obtenues à travers le séchage qui consiste à éliminer la majeure partie de la teneur en eau du bois fraîchement coupé. Cependant, la complexité des phénomènes intervenant au cours du processus du



séchage, tels que les contraintes, les fissures, le durcissement, la variabilité des essences du bois, la décoloration... le rend difficile à maîtriser.

En conséquence, les travaux de recherches relatifs à la modélisation du séchage du bois sont nombreux dans la littérature. Ils portent, essentiellement, sur l'élaboration des tables de séchage de différentes essences de bois [66, 67,68].

Vu que le séchage du bois nécessite une consommation importante d'énergie et représente une grande part des coûts des entreprises œuvrant dans ce domaine, le séchage solaire du bois offre des possibilités considérables pour les technologies du bois et de l'énergie solaire avec un investissement inférieur de 40% à celui du séchage artificiel [69].

Les activités de recherche et de développement sur le séchage solaire du bois ont pour objet de diminuer la dépendance à l'égard des combustibles fossiles, à minimiser l'impact négatif sur l'environnement par l'utilisation d'une énergie «propre», à rehausser la qualité du produit final par rapport aux autres opérations de séchage conventionnelles, et à améliorer le contrôle de la température et de l'humidité. En conséquence de ces avantages, la recherche dans ce domaine reçoit actuellement une attention mondiale considérable [70, 71,72].

Une autre application s'apparentant au séchage du bois, est le traitement thermique du bois, rendu obligatoire pour toute sorte d'exportation, y compris en tant que bois d'emballage ou palettes de transport.

### **I.3.2.2 Traitement Thermique du Bois selon la Norme NIMP°15**

La lutte contre la propagation des insectes et champignons xylophages (qui se nourrissent de bois) est aujourd'hui devenue une priorité.

La Norme Internationale pour les Mesures Phytosanitaires n° 15 (NIMP°15) relative à la réglementation des matériaux d'emballages à base de bois, utilisés dans le commerce international, a pour objectif de réduire la dissémination d'organismes nuisibles, en imposant un traitement thermique qui exige une température relativement basse (56°C au cœur du bois) pendant trente minutes et un taux d'humidité en dessous de 20% [73].

Le traitement thermique du bois est un procédé physico-chimique qui intègre à la fois la conservation et la stabilisation dimensionnelle. Il a l'avantage de ne pas employer de produits chimiques toxiques et de permettre le traitement du bois dans la masse indépendamment de l'essence, par l'utilisation d'un système de séchage convectif. En effet, ce traitement thermique apporte ainsi une stabilité dimensionnelle au bois en le rendant insensible aux changements climatiques. Il ne nécessite aucun entretien spécifique puisqu'il est traité à cœur.



### I.3.3 Séchage Solaire des Tomates

A l'origine, la première tomate provient du nord ouest de l'Amérique du Sud et elle a été introduite dans la plupart des continents, elle porte le nom scientifique botanique de *Lycopersicum Esculentum*, ou encore de *Solarum Lycopersicum*, c'est une plante herbacée vivace sous climat chaud, généralement cultivée comme annuelle. En Tunisie, en période de pleine production, notamment la saison estivale, les marchés des tomates sont souvent saturés [74].

Vu que ce légume-fruit est très rapidement périssable et que cela engendre des pertes importantes pour les producteurs, l'utilisation de techniques de conservation, tel que le séchage, pour la préservation des éléments nutritifs des tomates offre une alternative intéressante pour la valorisation des surplus (Figure I.9).



Figure -I. 9-Tomates fraîches / Tomates séchées [75]

La modélisation de la cinétique de séchage des tomates a fait l'objet de nombreux travaux de recherche au fil des dernières années. Ces recherches, dans la plupart des cas, mettent l'accent sur l'optimisation de l'opération de séchage en appliquant un large éventail d'expériences à l'échelle du laboratoire, ainsi qu'à l'échelle industrielle afin de minimiser la consommation de l'énergie [8, 40, 75].

Divers méthodes et technologies de séchage des tomates existent, leur inconvénient majeur est qu'ils imposent des coûts d'investissements et d'opération très élevés. Pour pallier ce problème, des nouveaux systèmes de séchage ont été développés, en particulier, le séchage solaire qui représente une des applications les plus attractives et rentables de l'énergie solaire.

### I.4 Conclusion

Dans un contexte lié à l'étude d'un projet qui vise la conception et la mise sur le marché d'une cellule, pour le séchage et le traitement thermique du bois, et d'une cellule pour le séchage des tomates, fonctionnant à l'énergie solaire, nous avons décrit dans ce chapitre le



séchage solaire et son état de l'art, en particulier celui du bois et des tomates, ses différentes technologies et certains de ses principes.

Nous avons présenté quelques travaux de recherche qui ont montré que pour assurer la fiabilité et avoir un meilleur contrôle du séchage solaire, il faut opter pour le séchage indirect et convectif, en insistant sur la nécessité du développement des systèmes futurs ayant une unité de stockage de l'énergie vu son importante influence sur le fonctionnement du séchoir et sur la qualité du produit à sécher.



**Partie (A)**  
**Cellule Solaire pour**  
**le Traitement Phytosanitaire**  
**du Bois**



## *Chapitre II*

### *Conception de base de la Cellule Solaire : Méthodologie et Outils pour la Modélisation*



# Chapitre II :

## Conception de base de la Cellule Solaire :

### Méthodologie et Outils pour la

### Modélisation

#### II.1 Introduction

L'étude présentée dans ce chapitre fait partie d'un projet dans le cadre du Programme National de Recherche et Innovation (PNRI) ayant pour but la conception et l'optimisation d'une cellule de traitement phytosanitaire thermique du bois fonctionnant à l'énergie solaire.

Dans la première partie, nous introduisons les modèles qui fournissent les données de base pour le procédé de séchage ainsi que l'approche méthodologique de simulation. En premier lieu, nous présentons le modèle mathématique du séchage d'une pile de bois en écrivant les équations de bilan de conservation de la masse et de l'énergie, qui représente le transfert de chaleur et de masse qui a lieu entre le bois et l'air au cours du séchage. Puis, nous ajustons le modèle mathématique pour satisfaire les conditions du traitement phytosanitaire du bois selon la norme NIMP<sup>o</sup>15. La modélisation du traitement thermique du bois permet de déterminer les paramètres contrôlant l'opération (la température et l'humidité relative de l'air du traitement et le temps du traitement). Ils serviront, par la suite, comme données d'entrée pour la simulation du système solaire complet.

Dans la seconde partie de ce chapitre, nous décrivons le logiciel qui permet de modéliser et de simuler dynamiquement le fonctionnement global de la cellule solaire afin de prédire son comportement. Nous y introduisons les différents paramètres des différentes unités du système complet.

#### II.2 Présentation du Projet PNRI : Cellule Solaire pour le Traitement Phytosanitaire du Bois

Le projet est financé par le Programme National de Recherche et Innovation (PNRI), qui vise la conception et la mise sur le marché d'une cellule, pour le séchage et le traitement thermique du bois, fonctionnant à l'énergie solaire.



Le but étant d'aider l'industrie du bois et de l'ameublement à améliorer la qualité de ses produits et l'industrie de l'emballage à respecter la norme NIMP no. 15, tout en restant compétitive, économe en énergie et minimisant l'impact négatif sur l'environnement par l'utilisation d'une énergie «propre».

L'utilisation de l'énergie solaire pour le traitement thermique du bois a été identifiée, par le Centre Technique de l'Industrie du Bois et de l'Ameublement (CETIBA), comme l'un des thèmes prioritaires du secteur de l'industrie du bois en Tunisie.

Ce projet PNRI est géré par le CETIBA et exécuté, en partenariat, entre deux entités de recherche :

- Le Laboratoire d'Etudes des Systèmes Thermiques et Energétiques (LESTE) de L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir (ENIM).
- L'Unité de Recherche Energétique des Bâtiments et Systèmes Solaires (UR-EBSS), devenue depuis le Laboratoire de Recherche Matériaux, Optimisation et Energie pour la Durabilité (LR-MOED), de L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT).

Et deux partenaires industriels : Tunisie Palettes et Alternative Energy System (AES).

Ce travail représente la deuxième étape du projet de conception. En effet, un sujet de maîtrise déjà soutenu [76] a développé un code pour simuler le transfert de chaleur et de masse entre le bois et l'air lors du séchage pour chaque essence de bois (selon les tables de séchage généralement utilisées dans l'industrie). Le présent travail poursuit le développement d'outils pour assister la conception de séchoirs solaires pour bois.

L'étude qui nous a été confiée dans le cadre de notre sujet de thèse consiste en la modélisation thermodynamique de l'ensemble des composants du séchoir solaire et leurs optimisations ainsi que l'étude des performances de l'installation. Le modèle a été développé dans l'interface du logiciel de simulation TRNSYS qui dispose d'un important environnement de composants des systèmes solaires thermiques.

### **II.3 Code de Séchage du Bois**

Le séchage du bois est un processus très complexe au cours duquel on doit tenir compte de plusieurs paramètres thermiques et physiques qui affectent le comportement mécanique du bois au cours du séchage et la consommation énergétique de l'opération.

La première partie du programme de recherche, qui était le sujet d'un mémoire de maîtrise déjà soutenue [76], était la modélisation du séchage d'une pile de bois et l'élaboration d'un code de séchage. Puisque nous allons beaucoup l'utiliser et pour la complétude de la description, nous présentons ce code ci-après.



Ce code permet de déterminer la variation temporelle des différentes caractéristiques (température, humidité) et l'étude de l'effet de plusieurs paramètres sur le séchage.

Le code a été développé en langage de programmation Fortran (FORMula TRANslator). Il permet de modéliser le séchage d'une pile de bois à travers les transferts de chaleur et de masse qui ont lieu dans le bois et entre le bois et l'air qui est le résultat de la différence de pression entre la pression de la vapeur à la surface du bois et la pression de la vapeur d'eau dans l'air de séchage.

La pile de bois est divisée en des colonnes dans la direction de l'écoulement de l'air (Figure II.1). A cause des symétries géométriques (planches, pile, et volume de contrôle de l'air entre les planches) seulement la moitié d'une planche et la moitié de l'inter-planches sont considérées pour chaque colonne. Chaque planche de bois est divisée en  $n$  segments à partir de la surface jusqu'au centre de la planche. Le volume d'air est subdivisé en  $m$  segments dans le sens longitudinal (Figure II.2).

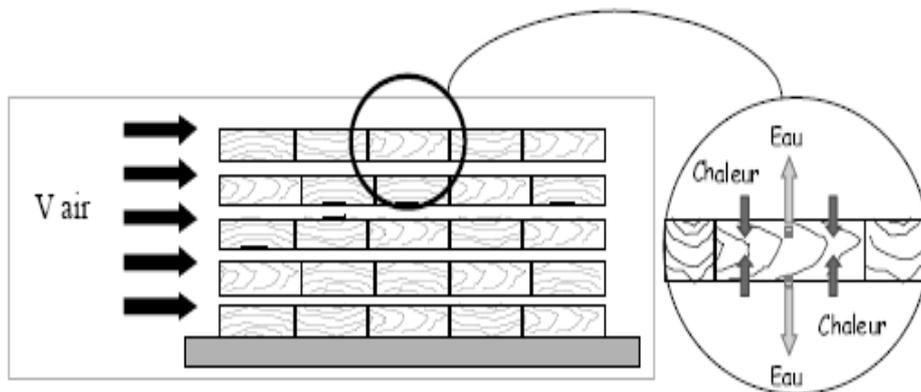


Figure-II. 1-Arrangement des planches dans une pile de bois [67]

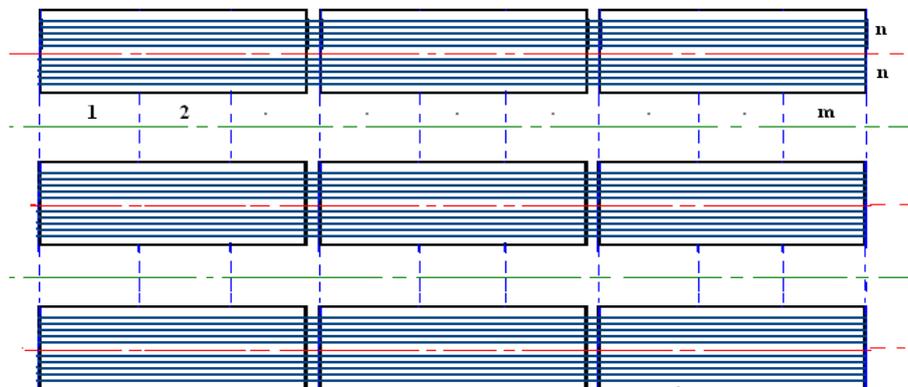


Figure-II. 2-Décomposition de la pile de bois en volumes de contrôle dans l'air et dans le bois [76]



Le modèle du code repose sur les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Le changement de la température et de la teneur en eau du bois dans chaque segment est supposé monodimensionnel puisque l'épaisseur du segment de bois est faible comparée à la largeur de la planche.
- Le changement de température de l'air de séchage entre les planches dans la pile de bois est supposé monodimensionnel dans la direction de l'écoulement, et il est constant dans chaque colonne.
- Les valeurs moyennes des propriétés physiques du bois sont supposées indépendantes de la position dans la structure.
- Le débit d'air est uniformément réparti entre les planches de bois.
- La masse volumique de l'air est supposée constante dans chaque colonne.
- Au début de la simulation, la température du bois dans tous les segments est supposée uniforme et égale à la température ambiante.

### II.3.1 Équations du Bilan de Masse et de l'Énergie du Modèle

#### II.3.1.1 Équation du Bilan de Masse

Le processus de diffusion de l'eau dans la mi-épaisseur du bois est dû aux forces capillaires. L'air de séchage transporte la quantité de vapeur extraite de la surface du bois, ce qui augmente l'humidité absolue de l'air à la sortie du volume de contrôle (Figure II.3).

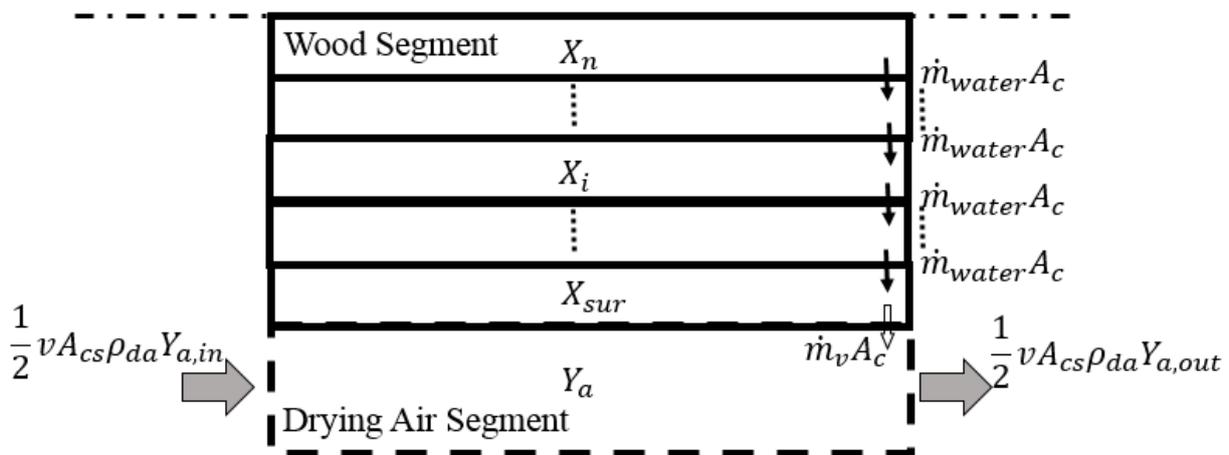


Figure-II. 3- Diffusion de l'humidité de l'intérieur du bois vers la surface [76]



### ❖ Équation de Conservation de Masse de l'Eau dans l'Air Humide

L'humidité absolue de l'air dans le volume de contrôle est obtenue en écrivant l'équation de conservation de la masse :

$$\frac{1}{2} V_a \rho_{as} \frac{dY_a}{dt} = \frac{1}{2} v A_{cs} \rho_{as} (Y_{a,e} - Y_{a,s}) + \dot{m}_v \cdot A_c \quad (\text{II.1})$$

Avec

$V_a$  : Volume de l'air dans le volume de contrôle [ $m^3$ ]

$A_c$  : Surface [ $m^2$ ]

$v$  : Viscosité cinématique de l'air [ $m^2/s$ ]

$\rho_{as}$  : Masse volumique de l'air sec [ $kg/m^3$ ]

$Y_a$  : Humidité absolue de l'air [ $kg_v/kg_{as}$ ]

$A_{cs}$  : Section de passage de l'air [ $m^2$ ]

$Y_{a,e}$  : Humidité absolue à l'entrée du volume de contrôle [ $kg_v/kg_{as}$ ]

$Y_{a,s}$  : Humidité absolue à la sortie du volume de contrôle [ $kg_v/kg_{as}$ ]

$\dot{m}_v$  : Quantité d'eau évaporée à partir de la surface vers l'air [ $kg_{ve} / m^2 s$ ]

### ❖ Équation de Conservation de Masse de l'Eau dans le Bois

- Au niveau de la surface on a :

$$\rho_{bs} V_{sur} \frac{dX_{sur}}{dt} = \dot{m}_{eau}|_1^{sur} \cdot A_c - \dot{m}_v \cdot A_c \quad (\text{II.2})$$

Avec

$V_{sur}$  : Volume du segment de surface [ $m^3$ ]

$X_{sur}$  : Teneur en eau de la surface [ $kg_{eau}/kg_{bs}$ ]

$\rho_{bs}$  : Masse volumique du bois sec [ $kg/m^3$ ]

$\dot{m}_{eau}|_1^{sur}$  : Quantité d'eau qui a migré du segment interne vers la surface par diffusion [ $kg_e / m^2 s$ ]. Sa modélisation sera discutée dans la section suivante.

- Pour tout nœud interne de  $i=1$  jusqu'à  $n-1$  on a :

$$\rho_{bs} V_i \frac{dX_i}{dt} = \dot{m}_{eau}|_{i+1}^i \cdot A_c - \dot{m}_{eau}|_i^{i-1} \cdot A_c \quad (\text{II.3})$$

Avec

$V_i$  : Volume du segment  $i$  [ $m^3$ ]



$\dot{m}_{eau}|_{i+1}^i$  : Quantité d'eau migrer du segment  $i+1$  vers le segment  $i$  par diffusion [ $kg_e / m^2 s$ ]

$\dot{m}_{eau}|_i^{i-1}$  : Quantité d'eau migrer du segment  $i$  vers le segment  $i-1$  par diffusion [ $kg_e / m^2 s$ ]

- Pour le nœud  $n$  au niveau du cœur l'équation s'écrit, à cause de la condition de symétrie :

$$\left. \frac{\partial X}{\partial y} \right|_{y=\frac{e}{2}} = 0 \tag{II.4}$$

On a :

$$\rho_{bs} V_n \frac{dX_n}{dt} = - \dot{m}_{eau}|_n^{n-1} \cdot A_c \tag{II.5}$$

Avec :

$V_n$  : Volume du segment  $n$  [ $m^3$ ]

$\dot{m}_{eau}|_n^{n-1}$  : Quantité d'eau qui a migré du segment  $n$  vers le segment  $n-1$  par diffusion [ $kg_e / m^2 s$ ]

### II.3.1.2 Équation du Bilan d'Énergie

Le transfert d'énergie se fait par conduction, convection, et évaporation dans la mi-épaisseur du bois et le mi-volume de contrôle de l'air. L'enthalpie de l'air change entre l'entrée et la sortie du volume de contrôle (Figure II.4).

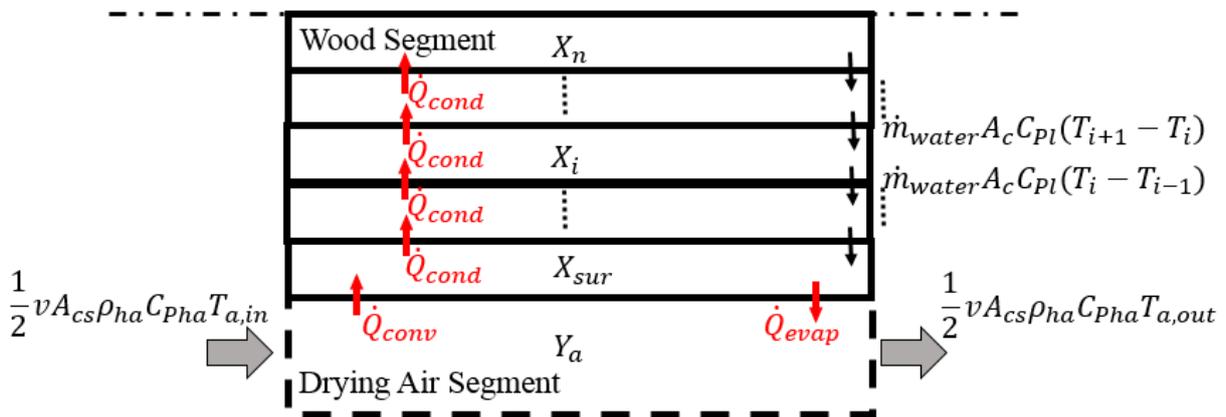


Figure-II. 4- Transfert de chaleur dans la mi-épaisseur de bois [76]

#### ❖ Équation de Conservation de l'Énergie de l'Air Humide :

L'équation d'énergie de l'air du segment adjacent à la surface de bois s'écrit comme suit :

$$\frac{1}{2} V_a \rho_{ah} C_{pah} \frac{dT_a}{dt} = \frac{1}{2} v A_{cs} \rho_{ah} C_{pah} (T_{a,e} - T_{a,s}) + \dot{Q}_{evap} - \dot{Q}_{conv} \tag{II.6}$$



Avec

$T_a$  : Température de l'air dans le volume de contrôle [K]

$Cp_{ah}$  : Capacité calorifique de l'air humide [J/kg K]

$T_{a,e}$  : Température de l'air à l'entrée du volume de contrôle [K]

$T_{a,s}$  : Température de l'air à la sortie du volume de contrôle [K]

$\dot{Q}_{evap}$  : Énergie d'évaporation [W]

$\dot{Q}_{conv}$  : Énergie par convection [W]

### ❖ Équation de Conservation de l'Énergie du Bois

- Au niveau de la surface on a :

$$\rho_{bh} V_{sur} Cp_{bh} \frac{dT_{sur}}{dt} = \dot{Q}_{conv} + \dot{m}_{eau}|_1^{sur} A_c Cp_l (T_1 - T_{sur}) - \dot{Q}_{evap} - \dot{Q}_{cond}|_{sur}^1 \quad (II.7)$$

Avec

$\rho_{bh}$  : Masse volumique du bois humide [ $kg/m^3$ ]

$Cp_{bh}$  : Capacité calorifique du bois humide [J/kg K]

$T_{sur}$  : Température de surface [K]

$\dot{Q}_{conv}$  : Quantité d'énergie échangée par convection avec l'air de séchage [W]

$\dot{Q}_{evap}$  : Quantité d'énergie d'évaporation [W]

$\dot{Q}_{cond}|_{sur}^1$  : Quantité d'énergie conductrice cédée de la surface au segment interne 1 [W]

$\dot{m}_{eau}|_1^{sur} A_c Cp_l (T_1 - T_{sur})$  : Quantité d'énergie de l'eau migrée vers la surface [W]

- Pour un nœud interne de  $i=1$  jusqu'à  $n-1$  on a :

$$\rho_{bh} V_i Cp_{bh} \frac{dT_i}{dt} = \dot{Q}_{cond}|_{i-1}^i - \dot{Q}_{cond}|_i^{i+1} + \dot{m}_{eau}|_{i+1}^i A_c Cp_l (T_{i+1} - T_i) - \dot{m}_{eau}|_i^{i-1} A_c Cp_l (T_i - T_{i-1}) \quad (II.8)$$

Avec :

$T_i$  : Température du segment  $i$  [K]

$\dot{Q}_{cond}|_{i-1}^i$  : Quantité d'énergie conductrice cédée du segment  $i-1$  au segment interne  $i$  [W]

$\dot{Q}_{cond}|_i^{i+1}$  : Quantité d'énergie conductivité cédée du segment  $i$  au segment interne  $i+1$  [W]

$\dot{m}_{eau}|_{i+1}^i A_c Cp_l (T_{i+1} - T_i)$  : Quantité d'énergie de l'eau migrée du segment  $i+1$  au segment  $i$  [W]

$\dot{m}_{eau}|_i^{i-1} A_c Cp_l (T_i - T_{i-1})$  : Quantité d'énergie de l'eau migrée du segment  $i$  au segment  $i-1$  [W]



- Pour le nœud n au niveau du cœur l'équation d'énergie s'écrit à cause de la condition de symétrie :

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=\frac{e}{2}} = 0 \quad (\text{II.9})$$

$$\text{On a :} \quad \rho_{bh} V_n \frac{dT_n}{dt} = \dot{Q}_{cond}|_{n-1}^n - \dot{m}_{eau}|_n^{n-1} A_c C p_l (T_n - T_{n-1}) \quad (\text{II.10})$$

Avec :

$T_n$  : Température du segment n [K]

$\dot{Q}_{cond}|_{n-1}^n$  : Quantité d'énergie conductrice cédée du segment n-1 au segment n [W]

$\dot{m}_{eau}|_n^{n-1} A_c C p_l (T_n - T_{n-1})$  : Quantité d'énergie de l'eau migrée du segment n au segment n-1 [W]

### II.3.2 Algorithme de Résolution

La méthode utilisée dans la discrétisation des équations de transfert de masse et d'énergie est la méthode des différences finies alors que celle utilisée dans la résolution du système d'équations est la méthode itérative de Gauss-Seidel.

L'algorithme présenté ci-dessous a été implémenté dans le langage de programmation Fortran 90.

- ❖ Les étapes de la résolution sont (Figure II.5) :
  - La première étape consiste à saisir les conditions initiales de l'air à l'intérieur du séchoir : sa température et son humidité relative, ainsi que la température et la teneur en eau initiale du bois, en admettant que toutes les planches de la pile de bois sont à la même température et ont la même teneur en eau à l'état initial.
  - Puis, on calcule les différentes caractéristiques de l'air : viscosité cinématique et dynamique, capacité calorifique,... et les caractéristiques du bois : conductivité thermique, capacité calorifique, masse volumique humide,...
  - Ensuite, le système d'équations est résolu dans l'espace par la méthode itérative de Gauss-Seidel avec un pas de temps de 900 secondes.
  - Un test de convergence est appliqué pour chaque nœud et à chaque pas de temps pour s'assurer de la convergence des différents paramètres. Le seuil de convergence utilisé est :  $\epsilon=10^{-4}$ .
  - Les paramètres de sortie du premier volume de contrôle sont les paramètres d'entrée du deuxième volume, et ainsi de suite jusqu'à atteindre le dernier volume de contrôle.
  - La distribution spatiale des différents paramètres est obtenue pour chaque instant.
  - La simulation prend fin lorsque l'humidité d'équilibre du bois est atteinte dans toutes les planches.

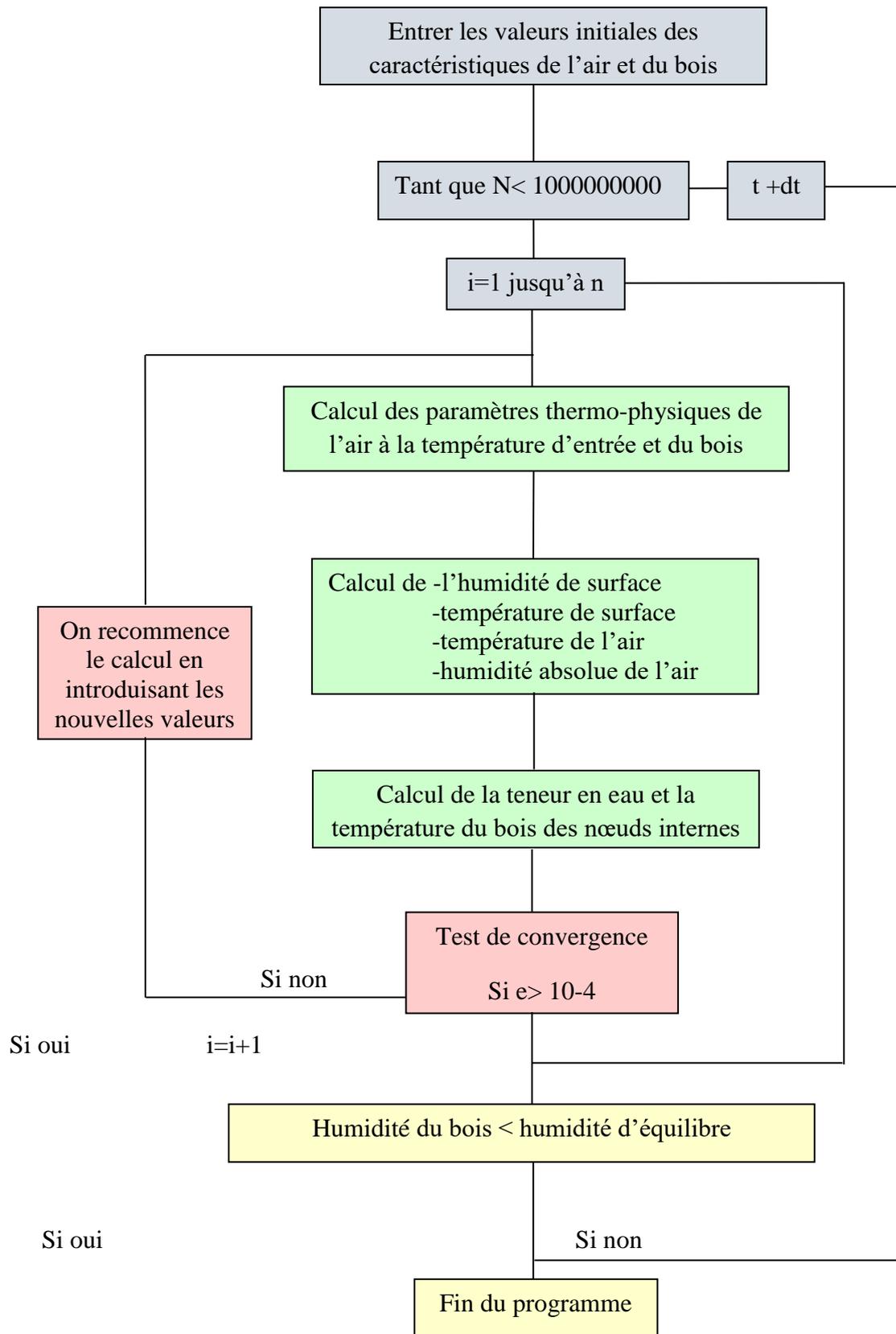


Figure-II. 5- Algorigramme de résolution du code de calcul



### II.3.3 Séchage du Bois selon la NIMP°15

Le code décrit ci-dessus est utilisé, avec seulement un changement de sa condition d'arrêt, pour la simulation des transferts de masse et de chaleur dans une pile de bois lors du traitement phytosanitaire selon la NIMP°15. En effet, comme celle-ci exige que le cœur du bois soit maintenu à une température de 56°C pendant trente minutes (voir section I.3.2.2 et [73]), la condition d'arrêt doit refléter cette exigence. La nouvelle condition d'arrêt est présentée à la Figure II.6.

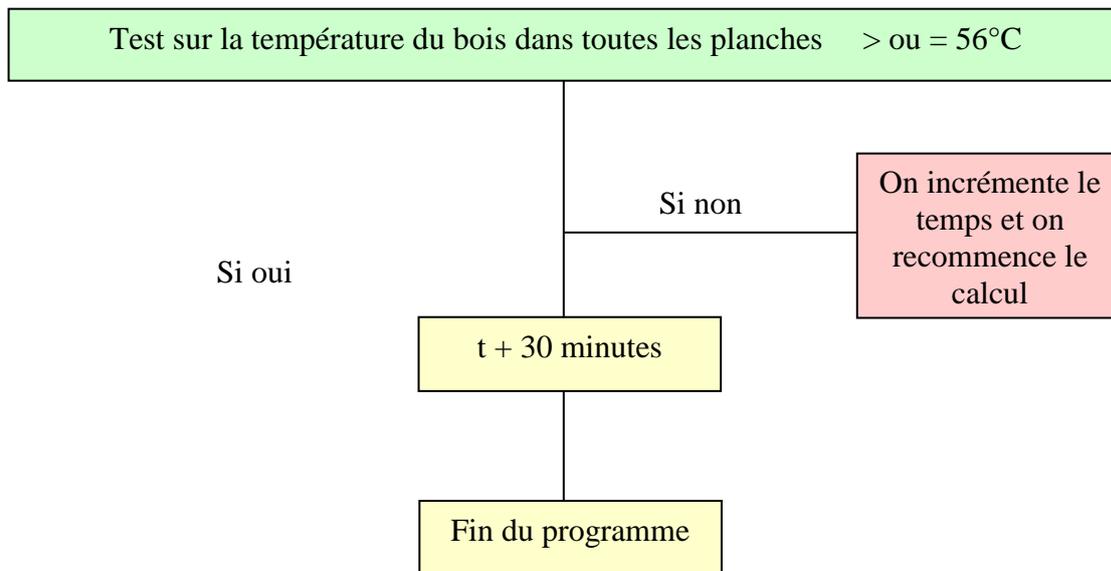


Figure -II. 6-Organigramme de la condition d'arrêt du programme selon la NIMP°15

Sachant qu'en Tunisie, la seule essence de bois destinée à l'emballage selon la norme NIMP°15 est le pin. Comme l'épinette et le pin appartiennent à la même famille des résineux, et puisque nous ne disposons pas des propriétés du pin, on utilisera l'épinette dans nos simulations. Les résultats obtenus, notamment la température et l'humidité de l'air à la sortie de la pile, sont considérés comme données d'entrée pour les simulations dynamiques globales du séchoir sur le logiciel TRNSYS (voir section II.4.2 ci-après).

## II.4 Logiciel TRNSYS

### II.4.1 Description du Logiciel

TRNSYS est un environnement de simulation complet et extensible pour la simulation transitoire des systèmes. Il est développé par le « Solar Energy Laboratory » de l'Université du Wisconsin (USA) [77]. Il est utilisé par les ingénieurs et les chercheurs du monde entier pour valider les concepts des systèmes énergétiques, allant de la simple production d'eau



chaude jusqu'à la conception et la simulation des bâtiments et de leurs équipements, y compris les stratégies de contrôle, le comportement des occupants et les systèmes d'énergies alternatives (éolienne, solaire, photovoltaïque, les systèmes à hydrogènes ...).

Un système dans TRNSYS est généralement configuré en connectant graphiquement des composants de l'espace de travail dans l'interface visuelle principale « Simulation Studio ».

Ce dernier est un logiciel de simulation complet contenant plusieurs outils comme les différentes bibliothèques de composants standards, les programmes de moteurs de simulation et les programmes de connexion graphique pour tabuler et tracer les résultats. C'est un logiciel flexible, qui permet aux utilisateurs de créer leurs propres composants [78]. Il s'agit aussi d'un outil intégré qui peut être utilisé à partir de la conception d'un projet jusqu'à la simulation dynamique de sa performance.

#### II.4.2 Analyse Globale du Système

Le système adopté dans ce mémoire, après la considération de plusieurs alternatives, constitue une évolution par l'intégration du stockage d'énergie afin de surmonter l'inconvénient de l'intermittence de l'énergie solaire.

Il s'agit d'accumuler l'énergie solaire pendant la journée et de la restituer lorsque celle-ci n'est plus disponible (nuit et jours nuageux).

De plus, le stockage de l'énergie permet de maintenir une température constante dans la chambre de traitement durant le fonctionnement du système en amortissant les fluctuations de la température dues aux fluctuations du flux solaire. Cela va se traduire directement sur la qualité du produit séché. Evidemment, l'énergie apportée au produit en phase diurne sera affectée par les capacités d'accumulation du réservoir.

L'importance du stockage provient aussi du fait que la demande énergétique de la cellule solaire est très élevée au début du traitement, comparé au reste de la période. Donc, incorporer un stockage de la chaleur permet de répondre à la grande demande de démarrage sans avoir à installer une surface excessive de captation qui ne sera utilisée qu'une infime partie du temps.

Le système considéré est muni de capteurs solaires sous-vide connectés à une unité de stockage d'eau qui assure le réchauffage de l'air de traitement par l'intermédiaire d'un échangeur eau/air placé en amont de l'unité de traitement (Figure II.7). Le choix des capteurs sous-vide est dicté par les températures de fonctionnement des séchoirs. En effet, les capteurs à air, ont été considérés, vus leur simplicité et coût peu élevé. De même pour les capteurs à eau plans. Cependant, ces deux alternatives ne permettent pas d'atteindre les températures



exigées par l'application de séchage étudiée, surtout lorsque les opérations de stockage et de récupération de la chaleur sont prises en compte.

Afin de minimiser la consommation énergétique, le système recycle l'air sortant de la chambre de traitement, et ajuste son humidité dans un mélangeur à renouvellement d'air, en des proportions bien déterminées avec de l'air ambiant. La température de l'air de traitement est ensuite ajustée à la valeur désirée en variant le débit de l'eau dans l'échangeur de chaleur eau/air.

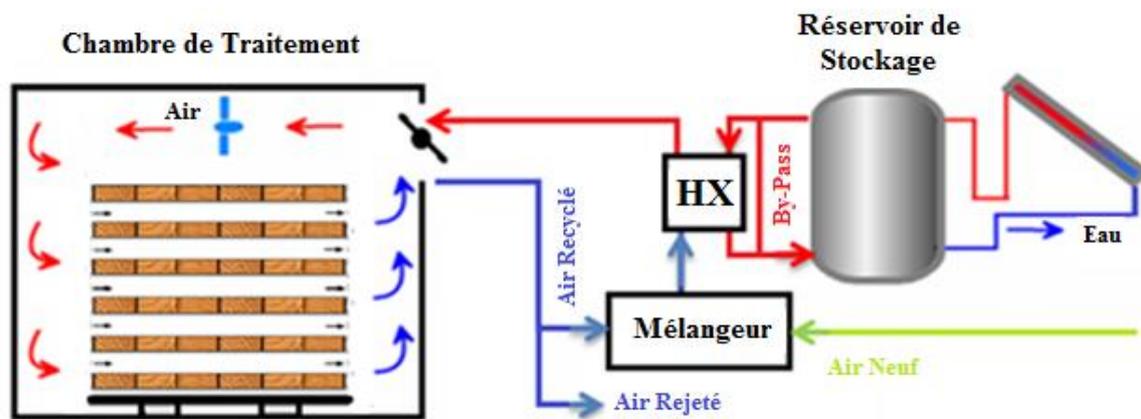


Figure -II. 7- Cellule solaire avec stockage

L'utilisation des capteurs solaire à eau pour chauffer la chambre de traitement, via le ballon de stockage et l'échangeur de chaleur eau/air, affecte le rendement du système puisqu'il y a deux transferts (aussi bien le jour que la nuit) au niveau capteur-réservoir de stockage et au niveau réservoir de stockage-chambre de traitement.

#### II.4.2 Modélisation Globale de la Cellule Solaire

Dans cette partie, on décrira les modèles de composants pour chaque unité du système retenu pour le dimensionnement (Figure II.8).

Le système à modéliser sur le logiciel TRNSYS comprendra les composants suivants :

- Une unité de traitement constituée par la chambre contenant la pile de bois à traiter et les composants d'interaction correspondants, (ventilateurs, trappes, conduites).
- Une unité de chauffage composée des capteurs solaires à eau fonctionnant comme la source d'énergie thermique.
- Une unité de stockage d'énergie thermique, afin de permettre un fonctionnement continu du système.

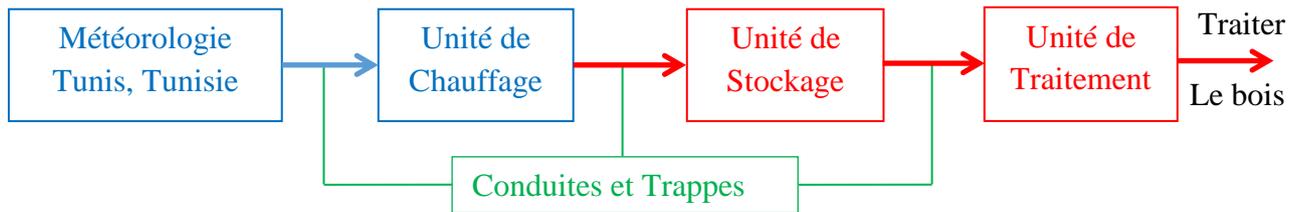


Figure -II. 8- Entités pertinentes de la cellule solaire

#### II.4.2.1 Milieu Extérieur « Météorologie »

Le milieu extérieur à la cellule est représenté par les variations horaires sur une année de la température,  $T$ , l'humidité relative de l'air,  $HR$ , la pression atmosphérique  $P$ , l'intensité de l'ensoleillement,  $G$ , dans la région d'étude considérée (Tunis, Tunisie).

TRNSYS associe ces conditions météorologiques à partir des valeurs saisonnières réelles dans un composant qui sert à lire ces données. Dans notre modèle, ce composant météo est connecté directement au champ de capteurs solaires et au mélangeur à renouvellement d'air.

#### II.4.2.2 Unité de chauffage

Une unité de production d'eau chaude constituée d'un champ de capteurs solaires à eau de type tubes sous vide, de surface inclinée à  $45^\circ$  par rapport au plan horizontal, vue la latitude de la ville de Tunis, et orienté vers le sud. L'énergie solaire thermique est transmise à l'eau de stockage.

#### II.4.2.3 Unité de stockage

Le stockage d'énergie consiste à emmagasiner un maximum d'énergie au moment où elle est disponible, de la manière la plus efficace possible, pour la restituer ultérieurement.

Dans ce cas, on stocke de l'énergie dans un réservoir de stockage à eau à deux niveaux de stratification (Figure II.9) lié à un échangeur de chaleur eau/air.

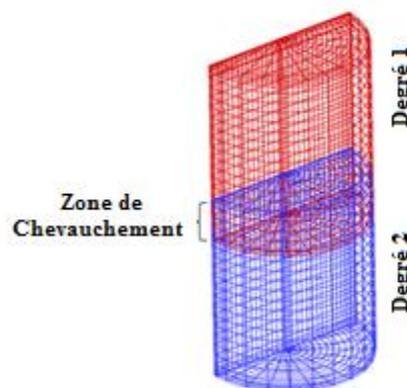


Figure-II. 9- Réservoir de stockage stratifié [79]



#### II.4.2.4 Unité de traitement

Cette unité, pour la cellule solaire pour bois, est constituée essentiellement d'une chambre de traitement contenant une pile de bois (planches empilées côte à côte) à traiter thermiquement selon la norme internationale NIMP<sup>o</sup> 15.

Dans cette chambre bien isolée, il y aura des échanges de matière et d'énergie entre la pile de bois et l'air de séchage. Ce procédé est modélisé dans le code de calcul présenté ci-avant. Pour la simulation du système complet sur TRNSYS, l'unité de traitement n'est représentée que par la variation temporelle des conditions d'entrée et de sortie du système obtenues à partir des résultats des simulations du code FORTRAN.

#### II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les deux outils numériques employés dans la présente étude, à savoir le code de calcul FORTRAN élaboré dans une étude précédente, et le logiciel commercial TRNSYS qui peut permettre le dimensionnement et l'optimisation du système à concevoir.

Finalement, nous avons introduit les unités pertinentes de la cellule solaire à concevoir, en décrivant le fonctionnement de chaque unité à part, ainsi que les relations entre les différentes unités.



## *Chapitre III*

### *Simulation et Optimisation de la Cellule Solaire pour Bois*



# Chapitre III :

## Simulation et Optimisation de la Cellule Solaire pour Bois

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la stratégie adoptée pour l'optimisation de la cellule solaire pour le traitement phytosanitaire du bois afin de minimiser son coût d'investissement.

Nous avons commencé par les simulations du processus de traitement thermique du bois, en utilisant l'outil numérique de simulation FORTRAN, permettant de déterminer la variation temporelle et spatiale des différentes caractéristiques du traitement (température, humidité). Le code a aussi permis l'étude de l'effet de plusieurs paramètres sur le traitement thermique [80].

Les résultats du code ont ensuite été utilisés comme données d'entrée pour simuler, dans l'environnement de modélisation du logiciel commercial TRNSYS, le comportement de l'ensemble de la cellule qui permet la simulation dynamique du système complet incluant toutes les composantes et les données météorologiques (ensoleillement, température, humidité...) et l'étude de différentes configurations.

Les simulations seront employées pour l'estimation et l'optimisation de la surface de captation et du volume de l'eau de stockage thermique pour fournir l'énergie thermique nécessaire au processus en garantissant un traitement adéquat.

### III.2 Simulation du Procédé de Séchage du Bois

Le code de calcul élaboré permet de déterminer les évolutions des paramètres contrôlant le séchage (température et teneur en eau du bois) et caractérisant l'air à la sortie de la chambre de séchage (température et humidité de l'air), qui servent à quantifier la chaleur à lui fournir pour compenser le rafraîchissement de l'air dû à la chaleur latente nécessaire à l'évaporation de l'eau du bois et à la chaleur perdue lors de la déshumidification de l'air (par mélange avec l'air ambiant) sortant de la chambre avant son recyclage.



Le bois utilisé dans la simulation de base est l'Épinette. La pile de bois, étant  $1,2 \text{ m}^3$  de volume de bois, se compose de 15 lits de planches parallèles ayant 10 planches par lit. Les planches ont des dimensions de  $1\text{m} \times 0,2\text{m} \times 0,040\text{m}$  avec une hauteur inter-planche de 30mm, ce qui donne une largeur de pile de 1m, une profondeur de 2 m, une hauteur de 1,05m.

Dans cette simulation, en plus du procédé de séchage qui exige une teneur en eau finale du bois de 20 %, nous tenons en compte aussi du procédé de traitement phytosanitaire, où le cœur des planches de bois doit être maintenu pendant au moins 30 mn à une température supérieure à  $56^\circ\text{C}$ . Pour cela, on opère le séchoir à une température sèche de l'air de  $70^\circ\text{C}$ , une humidité relative de l'air égale à 50% et une vitesse de l'air de séchage est de 1 m/s.

### III.2.1 Variation Temporelle de la Température des Planches de Bois au cours du Séchage

La figure (III.1) représente l'évolution temporelle de la température du centre des différentes planches du lit de bois, avec une température initiale de  $25^\circ\text{C}$  et une teneur en eau initiales de 50%, la température de l'air de séchage à l'entrée est  $70^\circ\text{C}$  et son humidité relative est de 50%. On remarque qu'au cours du processus, cette température du centre subit une première augmentation jusqu'à atteindre la température humide de l'air de séchage, après elle reste constante pendant un intervalle de temps correspondant à la première période de séchage, durant laquelle le centre de chaque planche de bois est saturée en eau.

Puis, étant donné que le flux de chaleur échangé avec l'air n'est plus totalement consommé par la chaleur latente, servant à la vaporisation, on assiste donc à une deuxième augmentation de la température des planches jusqu'à atteindre la température de l'air vers la fin du séchage. On peut aussi constater sur la figure (III.1), que la deuxième augmentation de température est fonction de la position de la planche par rapport à l'entrée de l'air. Ainsi, la température de  $56^\circ\text{C}$  est atteinte approximativement 12,5 heures après le démarrage du traitement pour la première planche, alors qu'il faut près de 40,5 heures pour la dernière planche. Ce grand décalage peut s'expliquer par la variation de l'humidité de l'air le long du lit de planche. En effet, l'air de séchage se charge en humidité en absorbant l'eau évaporée des planches de bois en amont et ne peut pas extraire plus d'eau des planches en aval.

Ce n'est que lorsque l'air n'est plus autant chargé, vu que le taux d'évaporation à partir des planches en amont diminue progressivement, qu'il va pouvoir drainer l'eau des planches en amont et provoquer éventuellement l'augmentation de leur température. Cette explication est corroborée par la variation de la teneur en eau à la surface des planches.

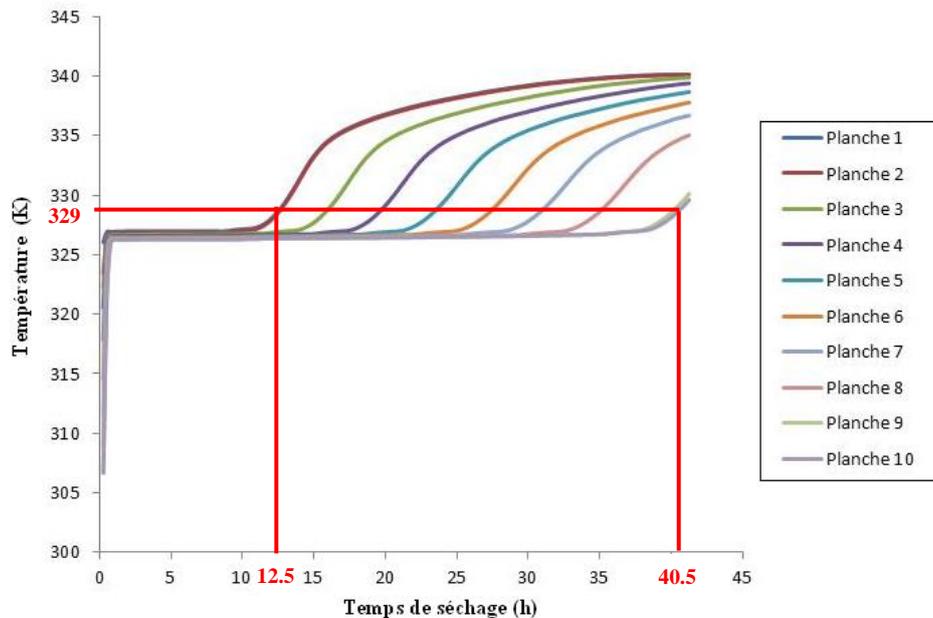


Figure -III. 1- Variation temporelle de la température du centre des planches de bois (les numéros dans la légende indiquent la position de la planche à partir de l'entrée).

### III.2.2 Variation Temporelle de la Teneur en Eau

La figure (III.2) montre la variation de la teneur en eau à la surface de chaque planche du lit de bois lors du séchage. On y remarque que le bois sèche plus vite dans la première planche comparé à la dernière, ce qui est tout à fait normal, car l'air de séchage, en traversant la pile de bois, se charge en humidité lorsque le bois humide cède son eau à l'air. Donc, l'air qui se charge progressivement va avoir une capacité à absorber la vapeur d'eau qui diminue le long de son parcours au-dessus des planches.

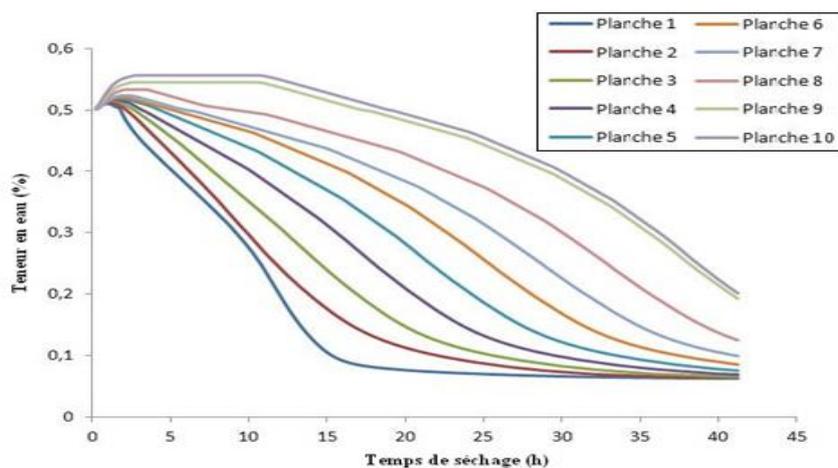


Figure -III. 2- Teneur en eau à la surface de chaque planche du lit de bois (les numéros dans la légende indiquent la position de la planche à partir de l'entrée).



On remarque aussi que de la teneur en eau à la surface des planches augmente au début du séchage. Ceci est dû aux transferts intenses imposés suite au contact avec l'air de séchage, et à la migration de la réserve en eau déjà présente dans la partie centrale de la planche vers la surface, vu l'augmentation de la température du bois.

### III.2.3 Température de Sortie de l'Air de Séchage de la Pile de Bois

Lors de son passage dans la pile de bois, l'air s'humidifie en absorbant la quantité d'eau quittant le matériau. En même temps, la température de l'air décroît pour compenser l'énergie latente d'évaporation de cette eau. A la première phase du séchage, cette évaporation est maximale, ce qui induit un rafraîchissement maximal de l'air.

En revanche, le taux d'évaporation décroît avec le temps au cours du séchage, comme on peut l'observer à la figure (III.2), le taux d'évaporation étant le négatif du gradient de la courbe de teneur en eau à la surface du bois.

Cette observation explique l'augmentation progressive de la température de l'air à la sortie de la pile de bois (figure III.3). A la fin du séchage, la température de l'air à la sortie atteint asymptotiquement la température de l'air à l'entrée de la pile de bois, ce qui est une confirmation de la fin de l'évaporation de l'eau à partir de la pile de bois.

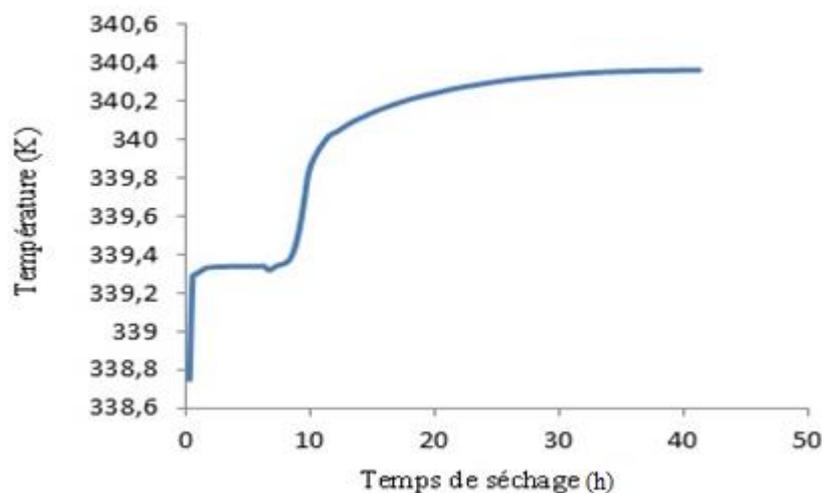


Figure -III. 3- Température de l'air à la sortie de la pile de bois au cours du séchage

### III.2.4 Humidité Absolue de l'Air dans la Pile de Bois

La figure (III.4) montre la variation de l'humidité absolue de l'air dans les différents volumes de contrôle le long de la pile de bois durant le processus de séchage. On remarque que l'air se charge en vapeur lors de son passage le long de la pile.



Au cours du séchage, cette quantité de vapeur diminue progressivement puisqu'il y a de moins en moins d'eau à évaporer et le bois devient de plus en plus sec avec le temps.

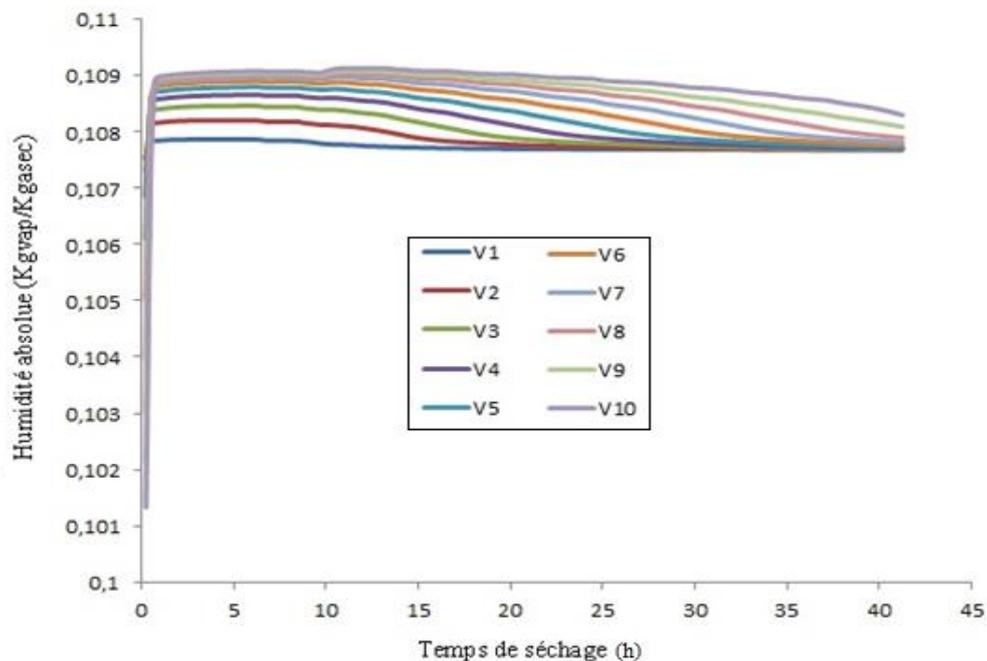


Figure -III. 4- Humidité absolue de l'air de séchage à travers la pile de bois (les numéros dans la légende indiquent la position, à partir de l'entrée, de la planche correspondant au nœud où la valeur est calculée).

### III.2.5 Modèle de l'Unité de Traitement Phytosanitaire du Bois

Comme mentionné précédemment, l'objectif de ce projet est de modéliser et concevoir une cellule solaire pour le traitement thermique phytosanitaire du bois d'emballage selon la norme NIMP°15, fonctionnant sans une autre source d'énergie d'appoint.

Dans cette partie de l'étude, la pile de bois considérée se compose de 20 lits de planches parallèles ayant 10 planches par lit. Les planches ont des dimensions de 1,2m\*0,12m\*0,018m avec une épaisseur inter-planche de 15 mm, ce qui donne une largeur de pile de 1,2 m, une profondeur de 1,2 m, une hauteur de 0,7 m, un volume de bois de 0,52 m<sup>3</sup> et un volume de la pile de 1 m<sup>3</sup>. La teneur en eau initiale de bois est de 30% et sa température initiale correspond à la température ambiante.

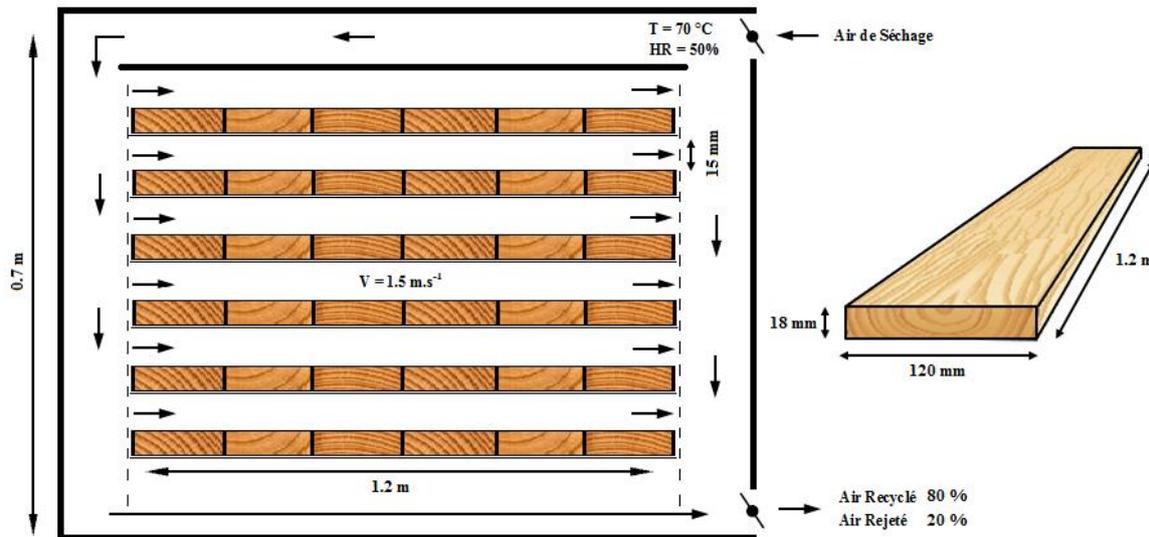


Figure -III. 5-Dimensions de la Chambre de Traitement et la Pile de Bois

La figure III.6 montre la variation de la température au cœur des planches de bois pendant le traitement phytosanitaire, avec comme au cours du séchage, une température initiale de 25 °C et une teneur en eau initiale de 50%. On peut voir que la durée du traitement, correspondant au temps nécessaire pour que tous les centres des planches atteignent 56 C, soit 329 K, est d'environ 4 heures et demi pour la première planche et de près de 7 heures pour la dernière. Cette température est passée par trois périodes au cours du processus de traitement phytosanitaire. En premier lieu, elle a subi une première augmentation de température jusqu'à atteindre la température humide de l'air de traitement. Par la suite, elle est restée constante pendant un intervalle de temps, durant lequel la couche de surface de chaque planche de bois a été saturée en eau. Vers la fin du traitement, on a assisté à une deuxième augmentation de la température des planches jusqu'à atteindre la température sèche de l'air de traitement.

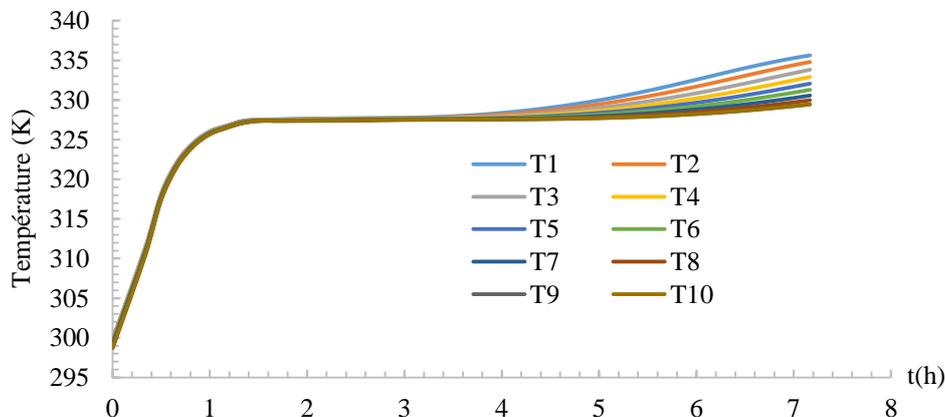


Figure -III. 6- Evolution temporelle de la température au cœur de chaque planche du lit de bois



La figure (III.7) montre la variation de la teneur en eau à la surface de chaque planche du lit de bois lors du traitement phytosanitaire. Cette teneur en eau subit presque la même évolution temporelle que celle au cours du processus de séchage, elle augmente au début du traitement suite aux transferts intenses imposés au contact avec l'air de traitement.

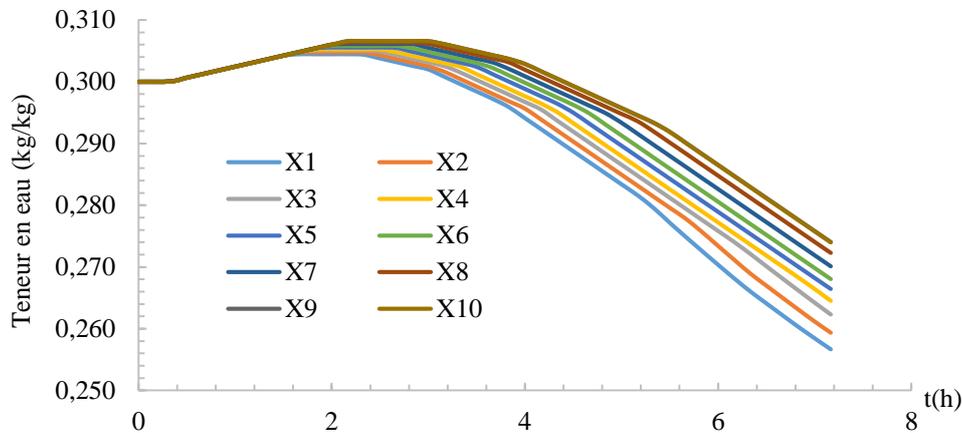


Figure -III. 7- Evolution temporelle de la teneur en eau moyenne à la surface de chaque planche du lit de bois (les numéros dans la légende indiquent la position de la planche à partir de l'entrée)

### III.3 Influence des Paramètres sur le Temps du Traitement

#### III.3.1 Influence de l'Épaisseur de la Planche de Bois

Pour évaluer l'effet de l'épaisseur des planches sur la durée du traitement, on a travaillé avec les deux épaisseurs les plus utilisées dans l'industrie du bois d'emballage tout en gardant les mêmes conditions de traitement (figure III.5).

On remarque sur la figure III.8 que, comme attendu, la durée du traitement augmente remarquablement avec l'épaisseur des planches de bois. En effet, cette durée passe de près de 8 heures, pour une épaisseur de 18 mm, à 25 heures pour une épaisseur de 40 mm.

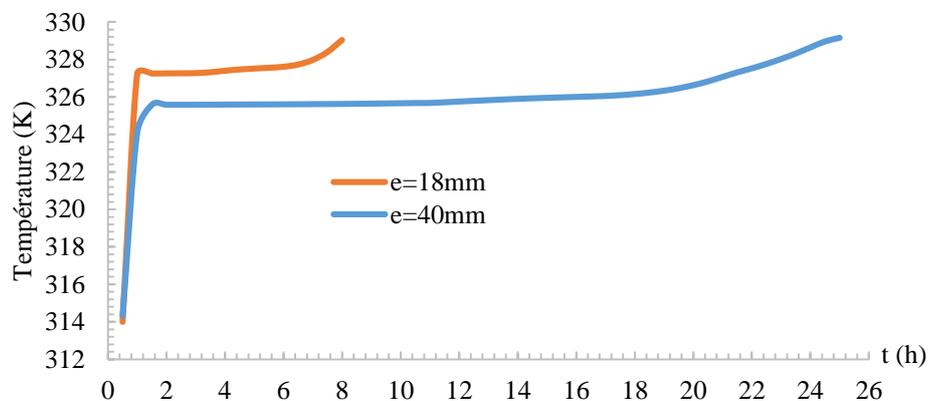


Figure -III. 8- Evolution temporelle de la température au cœur de la dixième planche du lit du bois



### III.3.2 Influence de l'Inversion du Sens de l'Écoulement de l'Air de Séchage

Dans le but d'obtenir une meilleure rentabilité économique, nous avons essayé de minimiser le temps de travail du système à travers la technique de l'inversion du sens de l'écoulement de l'air de traitement. De cette façon, les planches qui étaient placées en dernier et ne recevait que de l'air relativement plus frais et déjà chargée de vapeur d'eau, deviennent les planches les plus en amont et qui échangent la chaleur et la vapeur d'eau avec l'air entrant dans le séchoir dont la capacité de chauffer le bois et absorber l'humidité est la plus grande. L'inversion de l'écoulement de l'air est faite d'une manière cyclique alternée (figure III.9), une heure dans un sens et une heure dans le sens inverse jusqu'à atteindre les résultats de traitement désirés.

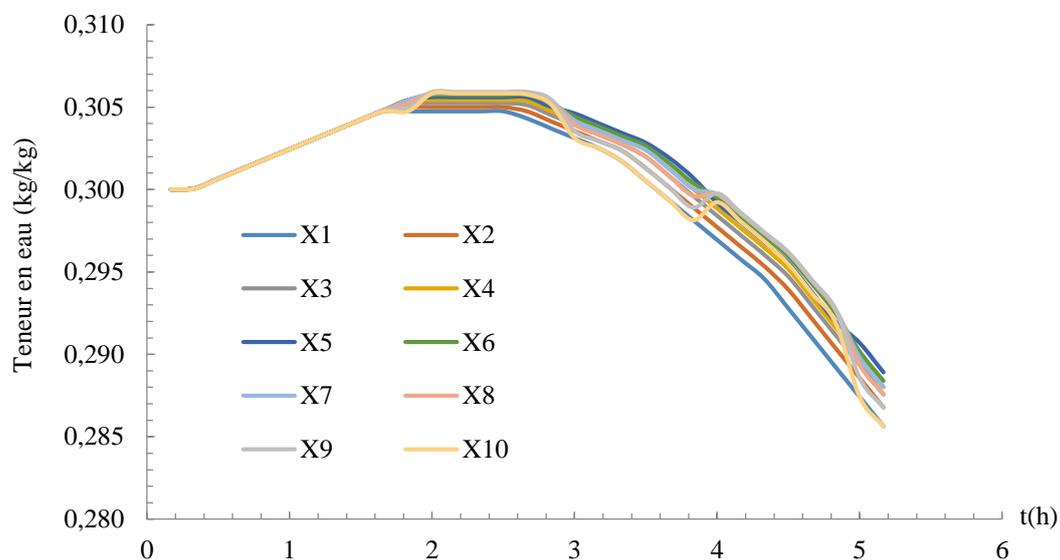


Figure -III.9- Evolution temporelle de la teneur en eau à la sortie de chaque planche du lit de bois

Cette inversion a minimisé le temps de travail de presque une heure pour les saisons hivernale et estivale (Tableau III.1), sachant que la différence de la durée du traitement entre ces deux saisons est due principalement à la variation de la température initiale du bois qui correspond à la température ambiante (en été, elle est de 37 °C et en hiver, elle est de 16°C).

Bien que nous ayons trouvé que l'inversion du sens de l'écoulement, réduit la durée du traitement phytosanitaire, et par conséquent réduit l'énergie requise, nous allons adopter, dans ce qui suit, un traitement avec un seul sens de l'écoulement de l'air de séchage. Cette décision est justifiée par la complication technologique dans la réalisation de la cellule avec inversion de l'écoulement qui ne donne qu'un gain marginal d'énergie.



Tableau -III. 1-Résultats du code de calcul

Saison	Sens de l'écoulement de l'air de séchage	Durée du traitement (heures)
Hiver	Sans inversion	7
	Avec inversion	6
Eté	Sans inversion	6
	Avec inversion	5

### III.3.3 Influence de l'Amélioration de la Conduite de Traitement

A la fin du traitement phytosanitaire, la pile de bois est à une température supérieure à 56°C et qui se rapproche de la température de l'air de séchage. Quand le traitement thermique du bois est terminé, on peut retirer la pile pour un refroidissement à l'air libre ou contrôlé dans une chambre de refroidissement. Un refroidissement progressif de la pile du bois permet d'éviter un choc thermique qui pourrait provoquer des déformations et des fentes en surface du bois. Par souci d'économie d'énergie aussi, on s'est proposé d'étudier la possibilité de préchauffer la nouvelle pile, avant son admission dans la cellule de traitement, par le recyclage de l'air de refroidissement (en minimisant le temps de traitement thermique et la consommation énergétique). Ainsi, l'opération de traitement peut se décomposer en trois phases (figure III.10) : le préchauffage, le traitement et le refroidissement.

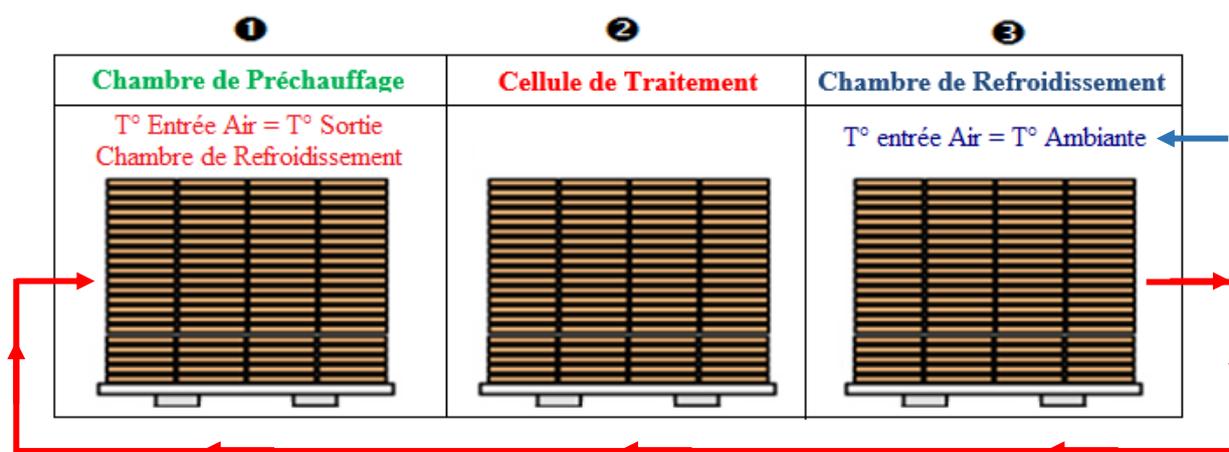


Figure -III. 10- Nouvelle conduite de séchage



En se basant sur les résultats des simulations pour les trois phases, on pourra décider de la rentabilité de l'ajout du préchauffage de la pile, avant son passage dans la chambre de traitement, par l'air sortant de la chambre de refroidissement. Ceci permet de récupérer de la chaleur des piles traitées et d'écourter le temps de traitement. Cependant, il requiert la construction de deux chambres additionnelles avec les installations aérodynamiques correspondantes.

Ces simulations ont été conduites pour des piles de planches de largeur 12 mm, d'épaisseur 40 mm et de longueur 2,5 m, avec un espace inter-planche de 50 mm. Les conditions de traitement sont les mêmes que celles décrites plus haut. La procédure est comme suit : une première simulation est faite avec les conditions du traitement thermique afin d'obtenir la distribution de température du bois à la fin du traitement. Cette distribution sera utilisée comme condition initiale pour la simulation du refroidissement de la pile de bois, effectuée avec l'air ambiant (température 16°C et humidité 63%) ayant une vitesse de 1,5 m/s. La température et l'humidité de l'air à la sortie de la cellule de refroidissement, ainsi calculées, sont utilisées comme les conditions d'entrée de la cellule de préchauffage.

Les simulations ainsi effectuées permettent d'obtenir les températures maximales de préchauffage de la pile de bois qu'on peut atteindre et le temps requis pour le faire.

La figure (III.11) représente l'évolution temporelle de la température du centre des différentes planches du lit de bois. On remarque qu'au cours du refroidissement, cette température du centre décroît rapidement au début, avec une réduction du taux de variation avec le temps, pour atteindre la température ambiante après cinq heures, cette durée est très importante.

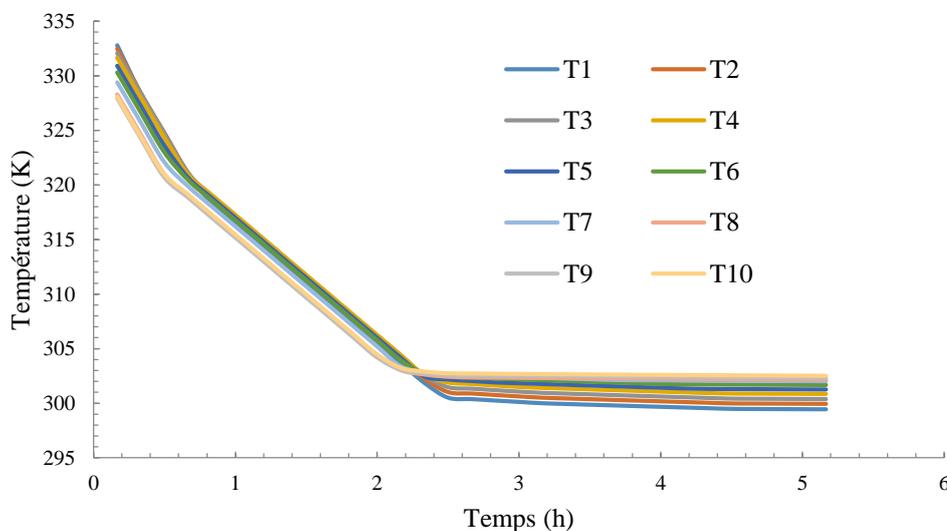


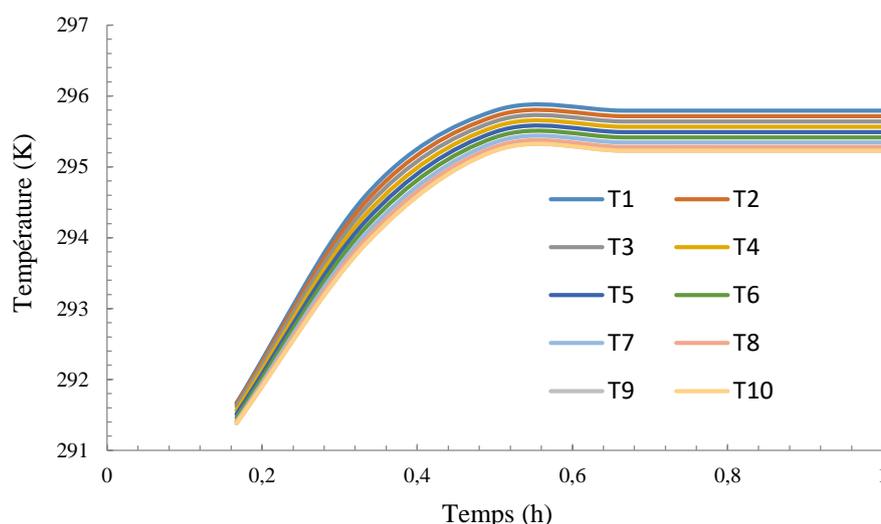
Figure -III. 11- Evolution temporelle de la température du centre de chaque planche du lit de bois



En phase de refroidissement, une quantité de la chaleur est cédée à l'air qui sera injecté par la suite dans la chambre de préchauffage afin de chauffer préalablement la nouvelle pile de bois avant son traitement thermique.

Avant que le traitement thermique proprement dit commence, il est essentiel que le bois soit chauffé dans toute sa masse, de sorte qu'au cours du traitement ultérieur, le gradient de température entre l'air asséchant et le bois soit le plus faible possible, afin d'avoir une durée de traitement plus réduite. En supposant que la température initiale du bois est l'ambiante et que sa teneur en eau est de 30%, les simulations sont effectuées avec comme conditions d'entrée de la cellule de préchauffage, les propriétés de l'air à la sortie de la cellule de refroidissement.

La figure III.12 présente la température des planches lors du préchauffage. On peut voir que la température maximale atteinte par le bois ne dépasse pas 296 K, c'est-à-dire 23°C soit moins de 5°C au-dessus de l'ambiante. En plus, en terme de temps, la durée du préchauffage est très réduite par rapport à celle du traitement (0,55h pour le maximum de la température par rapport à 25h pour le traitement), ce qui entraînera un refroidissement de la pile de bois préchauffée avant son entrée à l'enceinte de traitement à cause des transferts de chaleur qui auront lieu entre la chambre de préchauffage et le milieu extérieur pendant la période d'attente qui dépasse les 24h. Donc, le préchauffage par la récupération de la chaleur de refroidissement ne présente aucun intérêt.



**Figure -III. 12- Evolution temporelle de la température au cœur de chaque planche du lit de bois lors du préchauffage.**

D'où nous concluons, d'après les résultats des simulations des trois phases que l'ajout du préchauffage par le recyclage de l'air de refroidissement ne présente pas d'avantage.



### III.4 Modélisation de la Cellule Solaire pour le Traitement Phytosanitaire du Bois

La conception et le dimensionnement de l'installation solaire ont été assistés par les simulations numériques. Ces simulations ont été conduites sur deux étapes. Dans la première, une modélisation détaillée des transferts de chaleur et de masse dans l'air et le bois (présentée dans la section précédente) pour obtenir les propriétés de l'air à la sortie du séchoir qui seront utilisés pour la seconde étape. Dans celle-ci, une simulation thermodynamique de l'ensemble du système de traitement thermique est effectuée sur le logiciel TRNSYS avec les données météo pour une année typique à Tunis.

#### III.4.1 Représentation Graphique sous TRNSYS

Dans cette partie du document, nous allons présenter le modèle de la cellule solaire pour le traitement phytosanitaire du bois tout en identifiant les paramètres pertinents pour le couplage de ses unités constitutives afin de simuler son fonctionnement global.

La figure (III.13) est un schéma d'ensemble du modèle proposé, en utilisant le logiciel **TRNSYS 17**, correspondant au système présenté à la figure (II.10).

Le séchoir solaire est composé de deux circuits : un circuit d'air et un circuit d'eau. Pour éviter de créer un composant correspondant à la cellule de traitement, le circuit d'air est modélisé en boucle ouverte, ses entrées représentent les propriétés de l'air quittant la cellule de séchage (calculées par le code Fortran) et ses sorties représentent les propriétés de l'air entrant dans la cellule de traitement thermique.

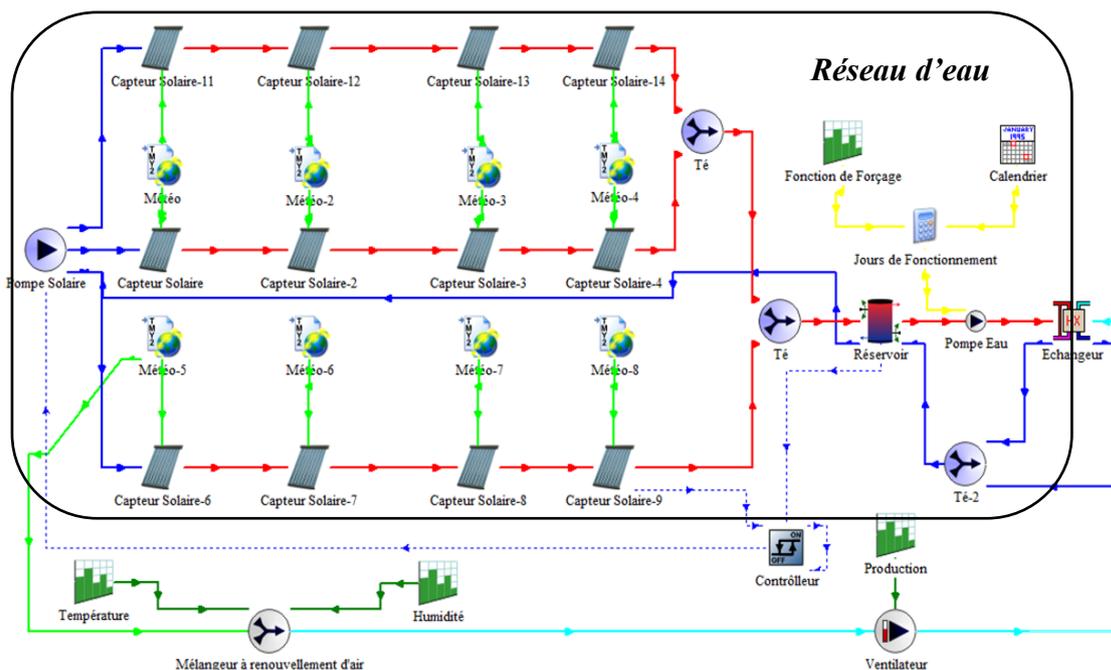


Figure -III. 13- Schéma d'ensemble de l'installation solaire pour bois



L'air de séchage passe, à sa sortie de la cellule de traitement, dans un mélangeur à renouvellement d'air où son humidité est ajustée, à la valeur de l'humidité absolue requise à l'entrée du séchoir, en le mélangeant dans des proportions bien déterminées avec de l'air ambiant. La température de l'air de séchage est ensuite ajustée à la valeur désirée par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur eau-air. Le contrôle de cette température est réalisé à l'aide d'un by-pass qui ajuste automatiquement le débit de l'eau chaude passant dans l'échangeur, en contournant en partie ce dernier, afin de maintenir la température de l'air de traitement à la valeur de la température de consigne. Outre cet échangeur de chaleur eau-air, le circuit d'eau comprend des capteurs solaires à eau et un réservoir de stockage d'énergie thermique à deux degrés de stratification.

### III.4.2 Fonctionnement de l'Installation

Le fonctionnement du système passe par deux phases. La première consiste à faire fonctionner le circuit d'eau afin de préchauffer l'eau du système de stockage jusqu'à atteindre une température beaucoup plus importante que la température de l'air souhaitée pour le traitement et aussi jusqu'à accumuler une masse de stockage suffisante pour le fonctionnement nocturne (dans le cas où nous voulons effectuer deux cycles de traitement par jour).

L'unité de stockage est munie d'un dispositif de contrôle automatique de température assurant l'arrêt de la circulation de l'eau dans le champ des capteurs lorsque l'ensoleillement n'est plus suffisant. Ce contrôleur permet de calculer un signal de commande qui admet des limites fixes du ON/OFF pour maintenir la variable à contrôler (dans ce cas, il s'agit de la température de stockage) à une valeur de consigne égale à 80°C.

Une fois la limite inférieure de la température de l'eau (à peu près 80°C dans le haut du réservoir de stockage pour assurer une température de l'air de traitement qui est de l'ordre de 70 °C) est atteinte, on passe à la deuxième phase par le déclenchement de l'échangeur de chaleur d'une efficacité de 70 % pour chauffer un écoulement d'air de 2566 kg/h servant à traiter la pile de bois de 1 m<sup>3</sup> de volume dont 0.52 m<sup>3</sup> de bois.

Les simulations TRNSYS ont été effectuées pour toute une année typique pour la région de Tunis afin de s'assurer du bon fonctionnement aux quatre saisons et du bon dimensionnement de la surface de captation et du volume de stockage.



### III.4.3 Paramètres d'Entrée du Modèle TRNSYS

Dans l'objectif de prédire le fonctionnement du séchoir solaire afin de mieux le configurer et le dimensionner, on a employé un modèle numérique dans TRNSYS comme décrit précédemment. Nous présentons en premier lieu la définition de ses paramètres d'entrée et ses objectifs et fixer la période durant laquelle se déroule le traitement de la pile de bois.

Les résultats de la simulation par le code FORTRAN, qui représentent le comportement physique d'une pile de bois à l'intérieur de la chambre de traitement, et en particulier les variations temporelles de la température  $T$  (figure III.6) et de l'humidité relative  $HR$  à la sortie de l'enceinte (figure III.7) ont été utilisés comme données d'entrée pour le recyclage de l'air de traitement à l'entrée du mélangeur.

Les données météorologiques de la bibliothèque de TRNSYS (dans TRNSYS : type 109, TMY2, Tunis [81]) pour une année typique de la zone de Tunis ont été utilisées comme entrées du mélangeur à renouvellement d'air (dans TRNSYS : type 11 [81]).

Les débits d'air recyclés de l'unité de traitement et de l'air ambiant sont établis de façon à obtenir l'humidité absolue requise à l'entrée de la cellule de traitement.

## III.5 Analyse Globale du Fonctionnement de la Cellule Solaire

### III.5.1 Analyse du Circuit d'Eau

Les figures (III.14-III.15) montrent le fonctionnement du circuit d'eau de l'installation (champ des capteurs solaires, réservoir de stockage et la pompe de circulation), pendant trois jours successifs de travail à vide (c'est-à-dire sans fonctionnement de la cellule de traitement) durant les saisons hivernale et estivale respectivement.

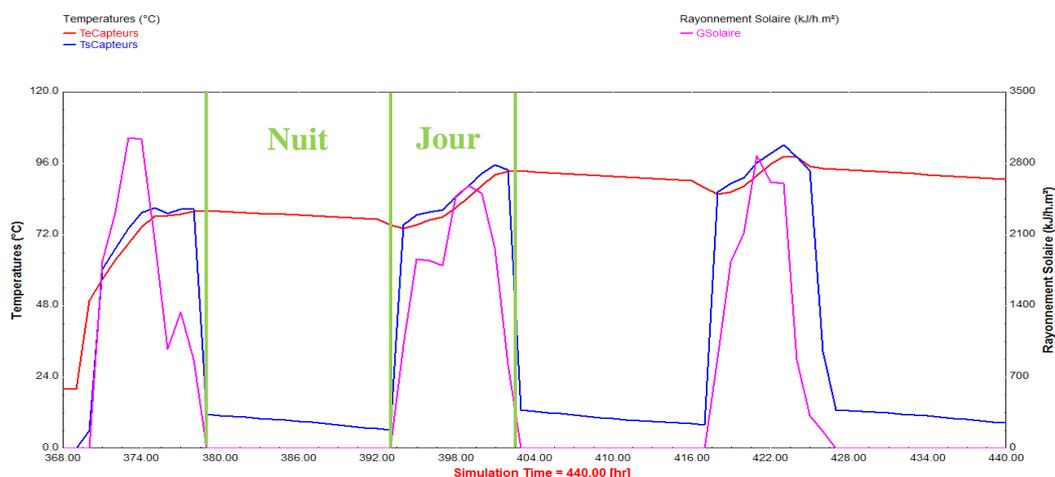


Figure -III. 14-Evolution temporelle hivernale des paramètres du circuit d'eau

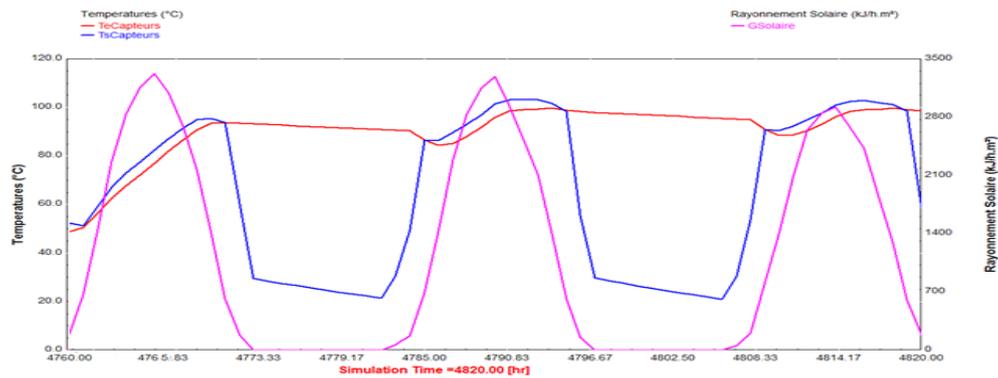


Figure -III. 15-Evolution temporelle estivale des paramètres du circuit d'eau

Vu que le processus de séchage doit être continu et doit répondre à une demande constante d'énergie, et face à l'inconvénient de l'intermittence et de la fluctuation de la source d'énergie thermique utilisée, l'intégration d'un réservoir de stockage qui consiste à emmagasiner l'énergie solaire pendant la journée et de la récupérer lorsque le système en a besoin, demeure la solution la plus adéquate, surtout qu'on veut travailler sans une énergie d'appoint.

Dans les figures III.14 et III.15, la courbe représentant le rayonnement solaire (courbe de couleur rose) montre clairement sa fluctuation, ce qui engendre un double comportement du champ solaire : pendant la journée, le soleil est présent et clair, la température à la sortie du champ (courbe de couleur bleu) augmente progressivement en suivant la variation du rayonnement solaire direct. Par contre, lors du fonctionnement nocturne, la température du fluide caloporteur s'abaisse jusqu'à atteindre la température ambiante.

Lors du démarrage de l'installation solaire, l'eau dans le réservoir de stockage est froide (la courbe en rouge) et ne permet pas d'avoir la température souhaitée pour le traitement d'où la nécessité de prévoir une première phase de préchauffage de cette eau avant de mettre en marche le soufflage de l'air dans l'enceinte de traitement. La durée de préchauffage varie selon les conditions climatiques. En hiver par exemple, il nous faut 7 heures après le lever du soleil qui a lieu à 7h30mn pour que l'eau chaude atteigne la température nécessaire pour le traitement qui est de 70°C. En été, cette durée est seulement de 4 heures et demi après le lever du soleil qui a lieu à 5h30mn.

### III.5.2 Analyse du Circuit d'Air

Le mélangeur à renouvellement d'air est un élément central du réseau d'air, destiné à réaliser un mélange d'air provenant de l'unité de traitement et de l'air ambiant dans des proportions bien déterminées, afin d'obtenir l'humidité absolue requise à l'entrée de l'enceinte de traitement. En utilisant les conditions météorologiques de Tunis, lieu d'implantation de l'installation solaire, il a été vérifié que le mélangeur permet d'obtenir l'humidité requise sur toute l'année.



On remarque dans les figures III.16 et III.17 que le système arrive en tout temps à ajuster la température de l'air de traitement à une valeur égale à 70°C (température à la sortie de l'échangeur de chaleur eau-air) quelle que soit sa valeur à l'entrée (c'est la température à la sortie du mélangeur) qui dépend fortement des conditions météorologiques. Ce qui confirme que le contrôleur de l'échangeur eau-air est très bien régulé.

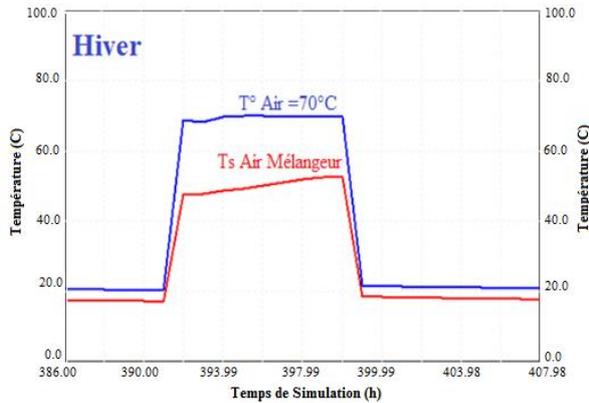


Figure -III. 16- Variations de la température de l'air en hiver

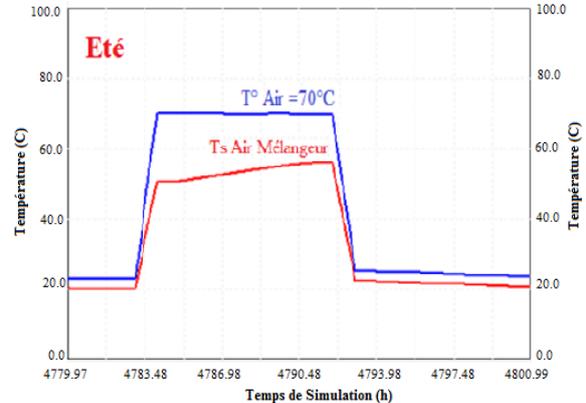


Figure -III. 17- Variations de la température de l'air en été

En traitement thermique solaire et vu l'intermittence et les variations temporelles de la source d'énergie, la régulation de la température de l'air ne peut être faite qu'en utilisant un échangeur de chaleur couplé à une unité de stockage de l'énergie.

La température de l'air à la sortie de l'échangeur, qui correspond aussi à la température à l'entrée de l'enceinte de traitement, comme le montre les figures III.18 et III.19, suit une courbe presque constante à une valeur égale à 70 °C. Ce qui confirme le bon fonctionnement du contrôleur qui régule la température de l'air en variant le débit de l'eau en fonction des températures de l'eau du réservoir de stockage, la température désirée de l'air et sa température d'entrée.

On peut aussi voir dans les mêmes figures que le transfert thermique de l'eau vers l'air dans l'échangeur (représenté par les courbes de couleur rose) varie pour maintenir la température de l'air à la valeur désirée.

Nous pouvons donc constater, à partir de ce résultat, que le système est capable de fournir les conditions requises pour le traitement thermique selon la norme NIMP°15 aussi bien en hiver qu'en été.

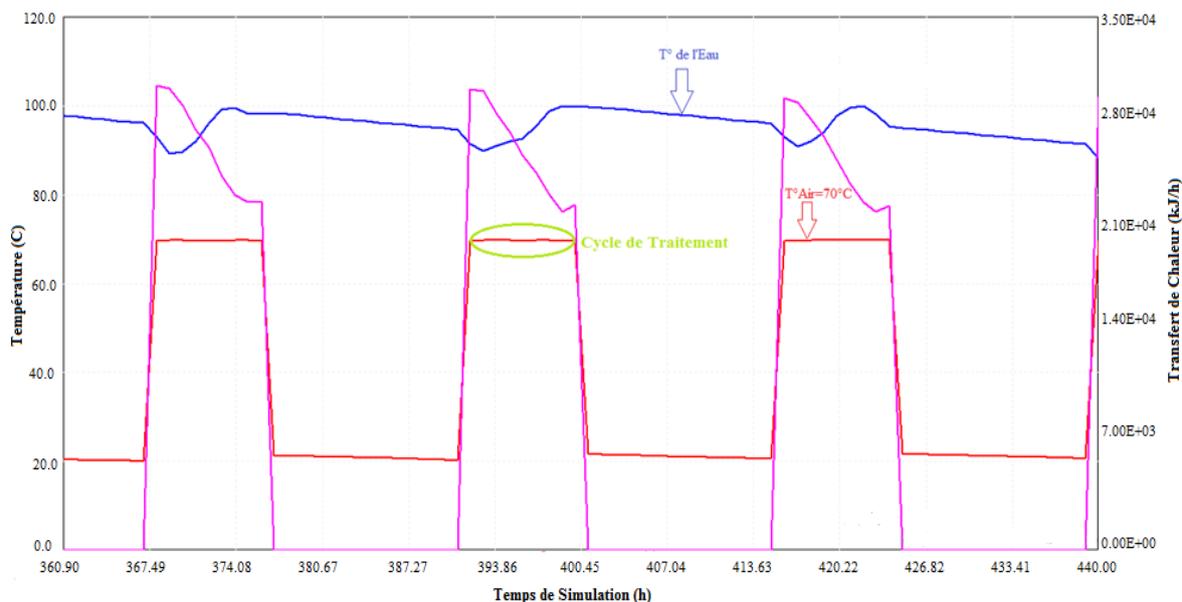


Figure -III. 18- Evolution temporelle hivernale des paramètres du circuit d'air

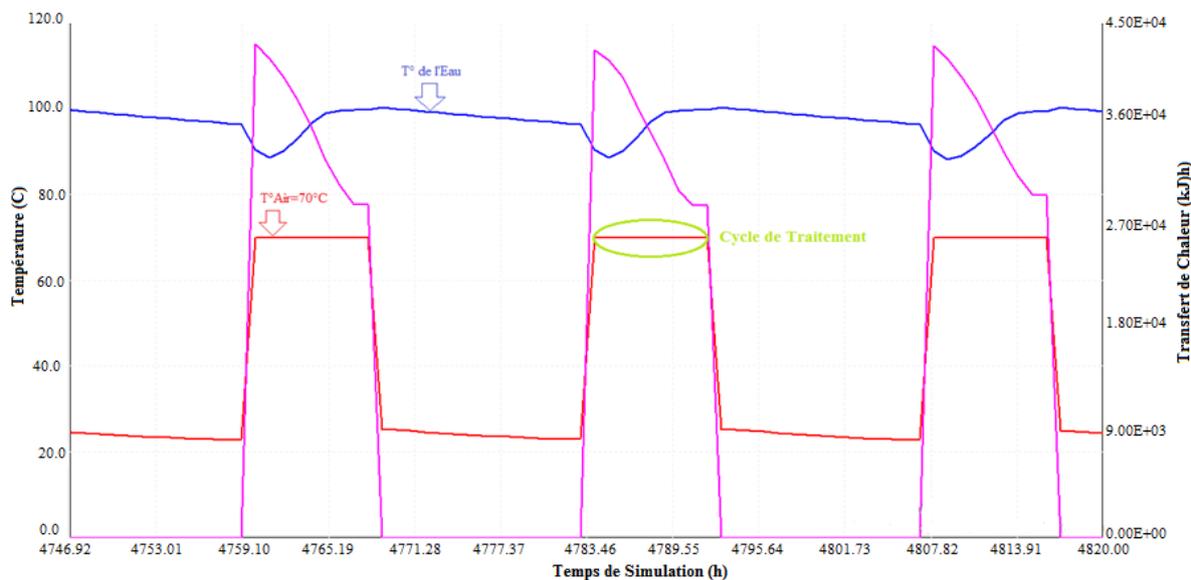


Figure -III. 19- Evolution temporelle estivale des paramètres du circuit d'air

### III.5.3 Fonctionnement Optimal de la Cellule Solaire

#### III.5.3.1 Analyse du Fonctionnement Mensuel de la Cellule Solaire

Vu la variabilité de l'ensoleillement (la seule source d'énergie) et des propriétés de l'air ambiant (température et humidité : utilisées dans le mélangeur pour réguler l'humidité de l'air à injecter dans la cellule de traitement), il est essentiel de conduire des simulations mensuelles (journée représentative de chaque mois de l'année) du système thermodynamique, pour s'assurer de l'adéquation du dimensionnement des différentes unités.



En effet, pour la meilleure rentabilité du système, il faut non seulement démontrer son bon fonctionnement mais aussi il faut éviter le surdimensionnement.

Dans cette simulation sur l'année des performances thermiques de l'installation, nous avons tiré avantage des fonctionnalités de TRNSYS permettant le pré-dimensionnement automatique d'imposer des composants et de prescrire un planning de l'arrêt du réseau d'air pendant les jours de congé (dimanches et jours fériés) afin de s'approcher le plus possible de l'utilisation réelles de la cellule solaire pour bois.

Les courbes dans les figures III.20 et III.21 sont obtenues à l'aide des simulations du système basées sur la notion d'un jour représentatif de chaque mois, on note qu'on a deux paliers sur les courbes représentant la surface de captation et le volume de stockage minimaux pouvant assurer un traitement adéquat (c'est-à-dire, une température et une humidité constantes à l'entrée de la cellule pendant toute la durée du traitement).

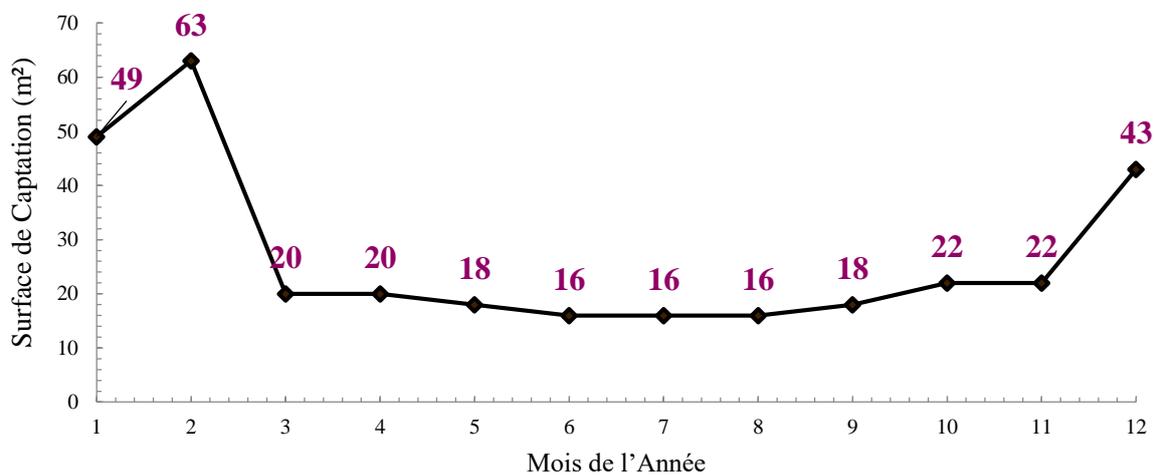


Figure -III. 20- Variations Mensuelles de la Surface de Captation

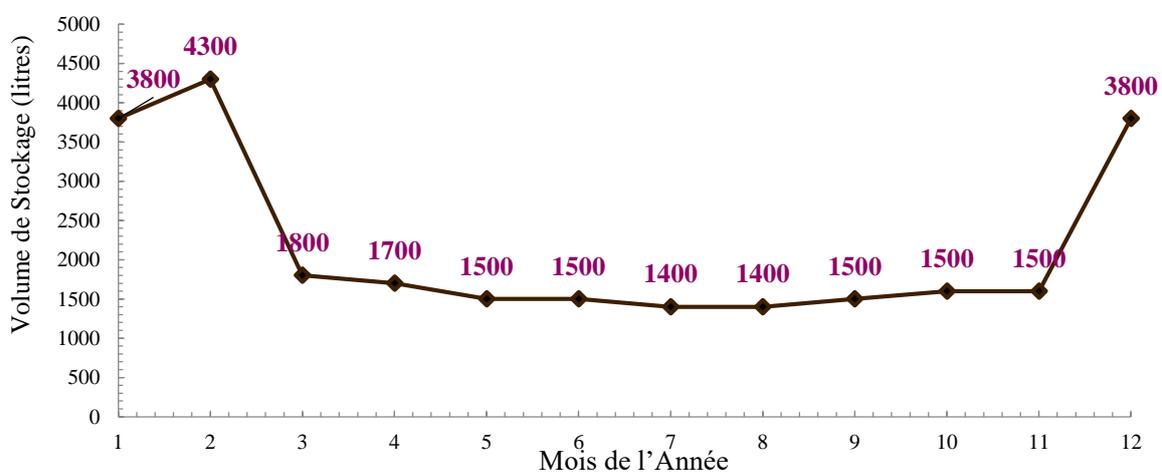


Figure -III. 21- Variations Mensuelles du Volume de Stockage



Les surfaces de captation requises sont très élevées en hiver par rapport aux autres saisons (plus que le triple), ce qui est presque le même cas pour les volumes de stockage de l'eau chaude. Donc, employer des capteurs et un réservoir pour satisfaire les besoins de l'hiver, donnera une installation largement surdimensionnée pour les autres saisons. Vu la période assez courte pour son utilisation, l'investissement additionnel correspondant à la satisfaction des besoins de l'hiver, nécessite un temps de retour dans les dix fois plus élevé que celui d'une installation satisfaisant juste les besoins des autres saisons. Dans ce cas, on opte pour le dimensionnement de l'installation selon les besoins de la majeure partie de l'année avec une réduction de la production en hiver, en diminuant le volume de bois à traiter dans chaque batch.

L'optimisation de l'investissement, selon les résultats des figures III.20 et III.21, dicte un traitement de  $0,52 \text{ m}^3$  de bois avec seulement une surface de captation de  $22 \text{ m}^2$  et un volume du ballon de stockage de 1500 litres pendant l'été, l'automne et le printemps. Tandis qu'en hiver, on propose d'employer le séchoir pour une plus petite quantité de bois, soit 60% de la production des autres saisons avec une pile de bois contenant 12 lits seulement au lieu de 20.

La figure III.22 confirme la faisabilité technique et économique de cette proposition en relation avec la distribution sur l'année de la demande de bois traité. En effet, on peut y voir qu'en réduisant le débit d'air en hiver proportionnellement au volume de bois (réduction à 60% de sa valeur pour les autres saisons), on assure une température de l'air à l'entrée de la cellule de  $70^\circ\text{C}$ . On voit aussi que le traitement va être assuré sur toute l'année, excepté pour quelques jours au printemps où la température du réservoir va être inférieure à celle requise pour l'air. Ce sont des jours couverts consécutifs où le rayonnement incident n'atteint pas les  $700 \text{ W/m}^2$ , qui font que l'eau du système de stockage ne chauffe pas assez pour répondre au besoin de traitement thermique.

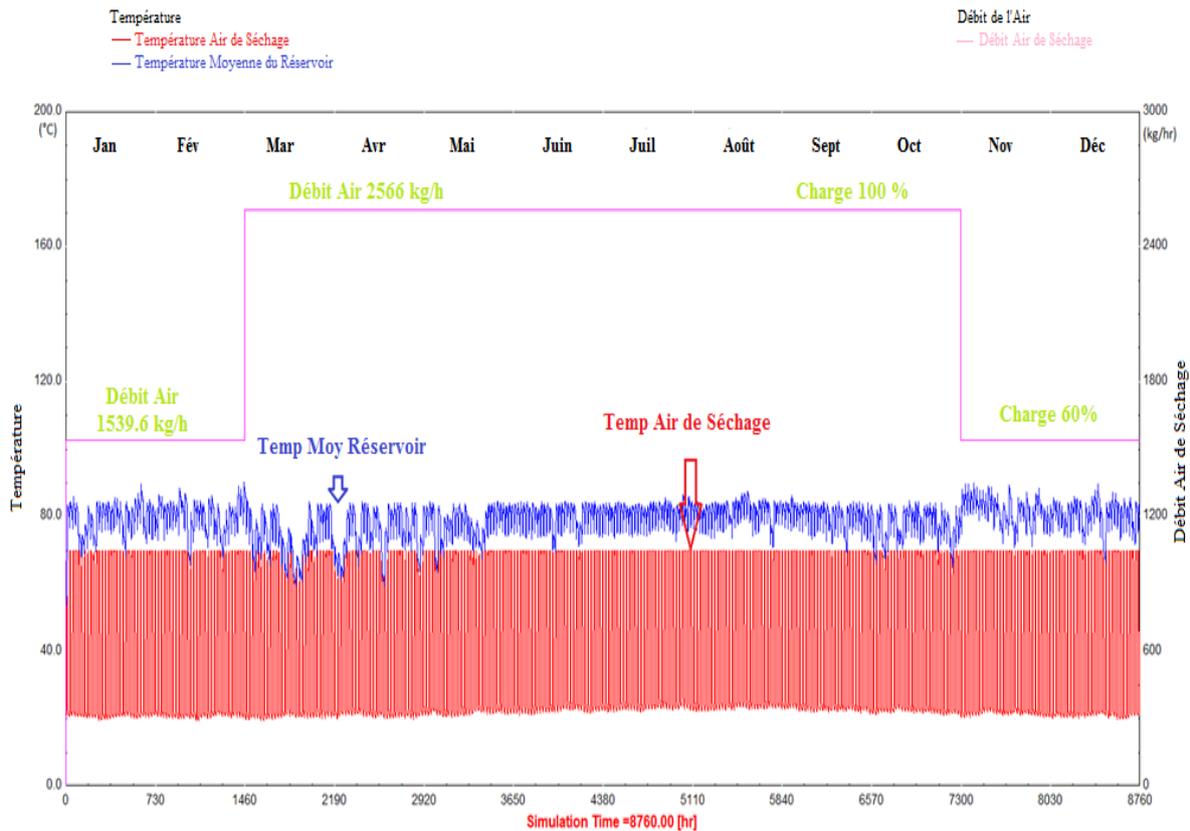


Figure -III. 22- Distribution mensuelle de la production du bois traité

La figure III.23 représente les profils de la température de l'eau à la sortie du champ des capteurs solaires et la température moyenne du réservoir de stockage. Nous constatons que la température de l'eau du champ augmente lorsque le flux solaire est présent et diminue selon la baisse journalière de ce flux. En revanche, les jours de congé, la température de stockage atteint assez rapidement la température maximale permise, ce qui provoque l'arrêt de la circulation de l'eau des capteurs vers le réservoir. Ceci provoque déjà à son tour une élévation dangereuse de la température dans les capteurs puisque l'eau y est stagnante. Comme moyen de protection des capteurs et leur tuyauterie, il faut prévoir une évacuation de la chaleur lorsque la température dans le champ des capteurs dépasse une certaine valeur à fixer en tenant compte de la capacité et de l'efficacité des capteurs solaires à installer.

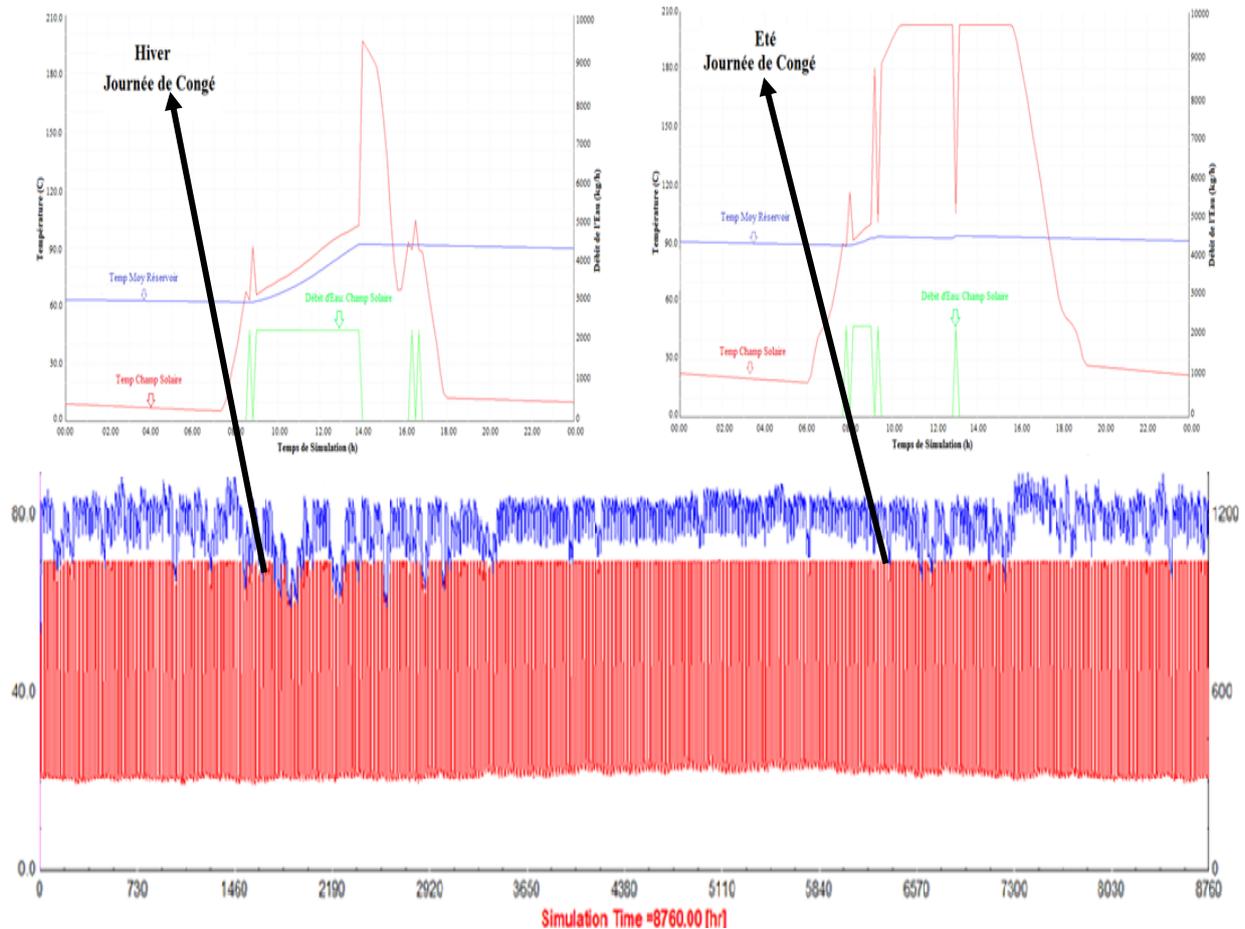


Figure -III. 23- Simulation annuelle du séchoir solaire pour bois

### III.5.3.2 Analyse du Fonctionnement Hebdomadaire de la Cellule

Les figures III.24 et III.25 présentent les trois indicateurs de performances de la cellule solaire pour bois pour deux semaines d'études : une semaine estivale et une semaine hivernale.

Les résultats des simulations sont satisfaisants du point de vue conditions de déroulement du processus de traitement phytosanitaire du bois pendant une semaine estivale, la température de l'air est parfaitement maintenue à sa valeur désirée qui est de l'ordre de 70°C (courbe de couleur rose). Nous avons aussi une quantité suffisante d'énergie thermique dans le réservoir de stockage (la température moyenne de l'eau de stockage est toujours au-dessus des 80°C représentée par la courbe de couleur bleu) qui garantit un travail continue de l'installation sans avoir recours à une énergie d'appoint.

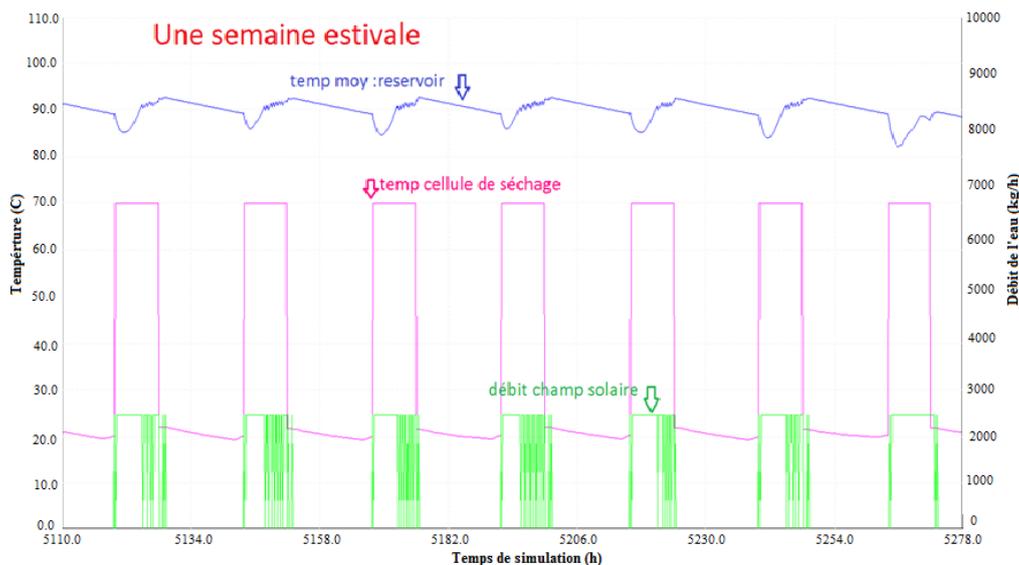


Figure -III. 24- Profils des paramètres du séchoir pour une semaine estivale

En hiver, les fluctuations du rayonnement solaire sont plus fréquentes, les besoins en chaleur du traitement thermique ne sont pas toujours satisfaits. Par exemple, dans la figure III.25, nous remarquons que le 5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> jour sont des jours couverts car l’eau du système de stockage a très peu chauffé (courbe en bleu), ce qui engendre une descente de la température de l’air de traitement en dessous de 70°C (courbe en rose) le dernier jour de la semaine.

Le septième jour, l’installation solaire a été démarrée à 8h du matin, alors que la température de l’eau dans le réservoir est faible, mais dès que le soleil s’est levé, cette température a augmenté et le processus de traitement a été bien assuré. Donc, dans un cas pareil, le démarrage du séchoir doit être fait un peu plus tard que 8h du matin pour permettre au réservoir d’accumuler assez d’énergie pour répondre aux besoins du traitement phytosanitaire.

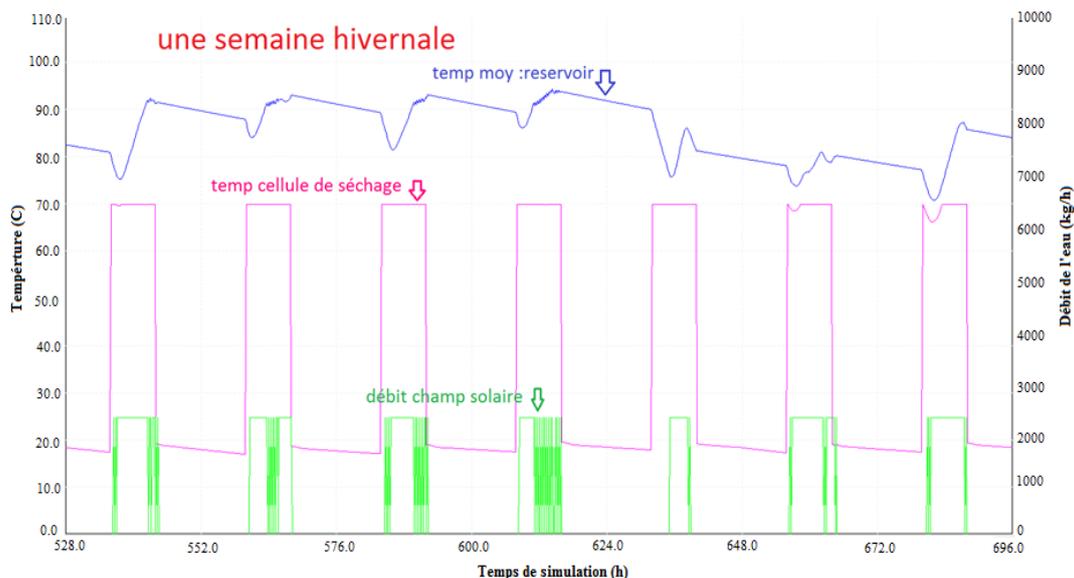


Figure -III. 25- Profils des paramètres du séchoir pour une semaine hivernale



Les tendances d'évolutions hebdomadaires du système solaire confirment le bon dimensionnement (tableau III.2) et les bonnes propositions d'optimisation de l'installation solaire. Nous avons adopté le modèle décrit ici pour la conception et la réalisation du prototype installé à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, ENIT, notre partenaire de recherche.

La cellule solaire à concevoir doit donc avoir les dimensions suivantes de ses unités pertinentes :

**Tableau -III. 2- Différentes dimensions des composants de la Cellule solaire**

<b>Débit de l'air de traitement</b>	<b>2566 kg/h</b>
Durée du traitement	7 heures
Surface de captation	22 m <sup>2</sup>
Volume du réservoir de stockage	1500 litres
Efficacité de l'échangeur de chaleur eau/air	70 %

Sur la base des calculs et des considérations particulières de conception présentés dans ce qui a précédé, un cahier des charges technique détaillé et complet [82] a été préparé pour faire partie de la consultation lancée par le CETIBA et attribuée à l'entreprise EES pour la construction du prototype.

Ce prototype a été construit et est présenté à l'Annexe A avec une étude expérimentale préliminaire de ses performances.

### III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté, dans un premier temps, les résultats du séchage d'une pile de bois obtenus à l'aide du code de programmation qui a été élaboré dans le cadre d'un mémoire de mastère déjà soutenue. Par la suite, nous avons analysé les résultats du traitement phytosanitaire du bois d'emballage qui nous ont permis d'obtenir les conditions d'entrée et de sortie de l'air de traitement.

Dans un deuxième temps, un modèle sur TRNSYS a été employé pour simuler le comportement thermodynamique du système complet de traitement thermique solaire. Les résultats ont permis d'étudier le déroulement du traitement au cours de l'année, et enfin à l'optimisation de la conception et du dimensionnement de la cellule solaire pour bois.



Finalement, le présent travail a démontré la faisabilité technique du concept, a permis le dimensionnement des composants du système et l'installation d'un prototype à Tunis. En fait, les simulations ont prouvé la possibilité d'obtenir et de contrôler les conditions d'air souhaitées pour le traitement phytosanitaire avec un système solaire sans appoint.

L'optimisation des dimensions du système a montré que pour une pile de bois de 1 m<sup>3</sup> soit 0,52 m<sup>3</sup> de bois (réduit à 0,31 m<sup>3</sup> en hiver), un champ de capteurs solaires de type tubes sous vide de 22 m<sup>2</sup> est recommandé avec un réservoir de stockage de l'énergie thermique à deux degrés de stratification de capacité 1500 litres.



## *Chapitre IV*

*Mise en Place et Validation Expérimentale Préliminaire d'un  
Prototype de Cellule Solaire pour Bois*



# **Chapitre IV :**

## **Mise en Place et Validation Expérimentale Préliminaire d'un Prototype de Cellule Solaire pour Bois**

### **IV.1 Introduction**

Ce chapitre présente les détails de la mise en place et une étude expérimentale préliminaire de la cellule solaire pour le traitement thermique phytosanitaire du bois d'emballage selon la norme NIMP°15, fonctionnant sans une autre source d'énergie d'appoint, installé à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT), le partenaire de recherche du Programme National de Recherche et Innovation (PNRI).

Le choix des éléments de l'installation et de leurs caractéristiques et dimensions a été présenté aux chapitres II et III. La sélection d'éléments de régulations et autres composants de protection a été assisté par l'équipe de l'entreprise AES.

### **IV.2 Présentation du Prototype de la Cellule Solaire pour Bois**

#### **IV.2.1 Emplacement et Schéma de l'Installation**

L'emplacement du prototype (dispositif expérimental) a les coordonnées géographiques suivantes : altitude : 587 m, longitude : 10.1462 et latitude : 36.831 correspondantes à celles de l'ENIT (figure IV.1). La climatologie du lieu est définie par une température ambiante de -2 à +45°C et une humidité relative de 75 % [2].

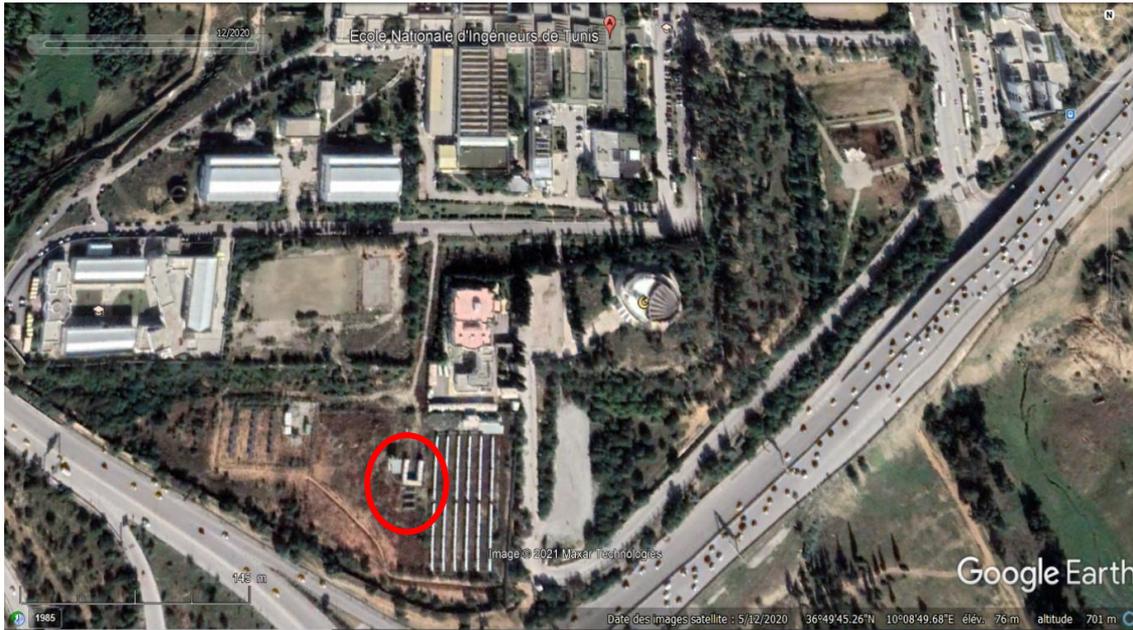


Figure -IV. 1- Coordonnées géographiques du site du projet PNRI

Le local et les capteurs de la cellule solaire sont schématisés par la figure IV.2, composé d'un champ solaire d'une surface de captation de  $22 \text{ m}^2$ , orienté vers le sud pour absorber le maximum des radiations solaires, et relié à un réservoir de stockage à deux degrés de stratification. Dans un conteneur, qui représente la chambre technique, on a fixé l'unité de traitement de l'air, la chambre de traitement, le vase d'expansion et les armoires de contrôle. Le débit massique de l'air traversant la chambre de traitement est de  $2566 \text{ kg / h}$ .

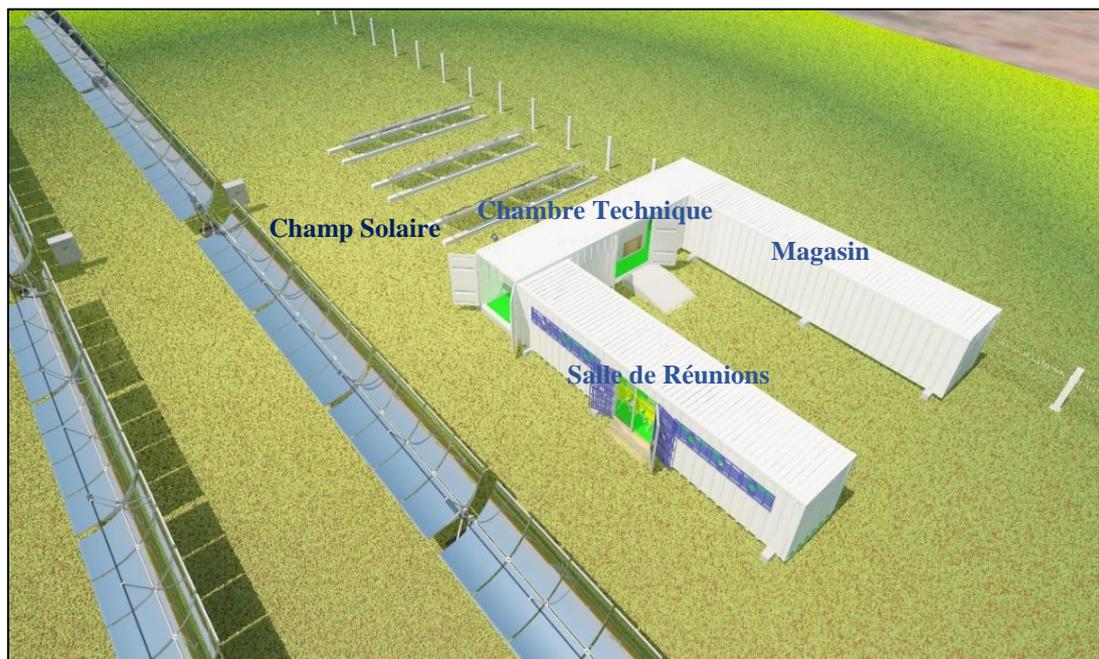


Figure -IV. 2- Schéma en 3D de l'installation expérimentale



## IV.2.2 Composition du Dispositif Expérimental

La cellule solaire a été installée par l'entreprise ESE qui a gagné la consultation de construction, lancée par le CETIBA [82]. L'installation de la cellule est composée des éléments suivants (figure IV.3).



Figure -IV. 3- Prototype de la cellule solaire pour le traitement thermique du bois (A) Schéma synoptique du prototype (B) Le champ solaire (C) Le réservoir de stockage (D) L'unité de traitement de l'air (E) La chambre du traitement phytosanitaire (F) Le vase d'expansion et l'armoire de contrôle



Les capteurs solaires : 12 capteurs de type "tube sous vide" fabriqués par Solar Key Mark (EN 12975-1/2), leur surface totale est 22 m<sup>2</sup> (réparties sur 3 batteries de 4 capteurs comme le montre la figure IV.4) avec un angle d'inclinaison de 45°.

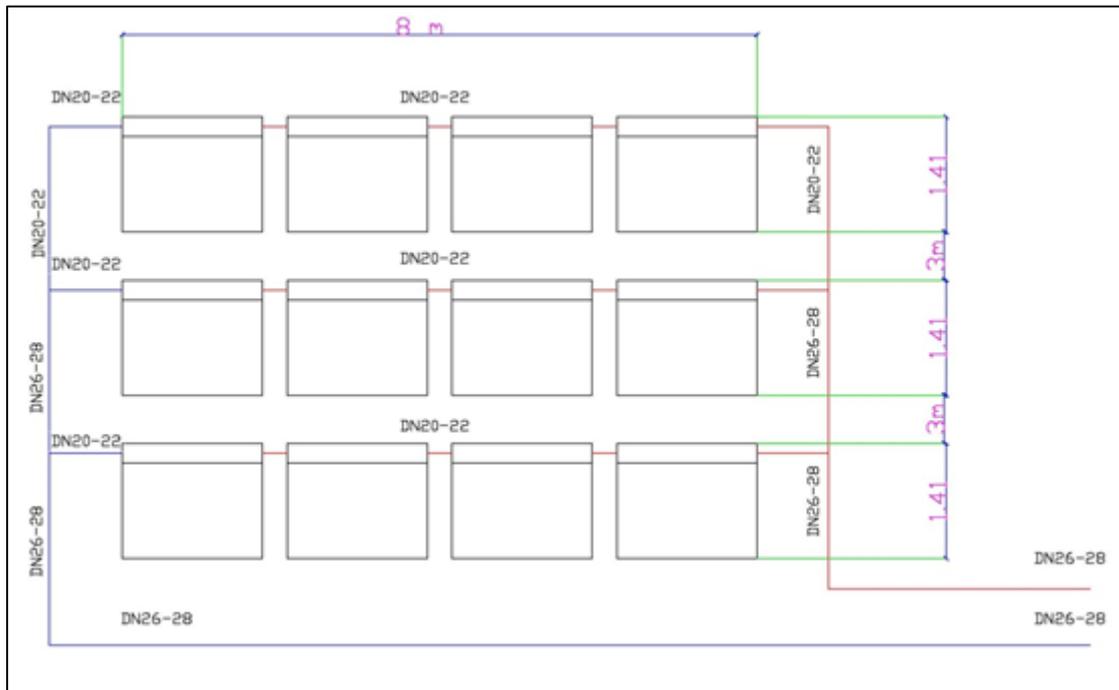


Figure -IV. 4- Schéma d'implantation des capteurs solaires [83]

Pompe de circulation (champ solaire) : c'est une pompe à 3 vitesses, d'une hauteur manométrique totale HMT de 6,55 m supportant une température du fluide de -10°C à 130°C et un débit de 1,5 m<sup>3</sup>/h.

Ballon de stockage de l'eau chaude : la capacité du ballon maintenue verticalement est de 1500 litres dont la température de stockage voulue est 85°C. Le ballon est calorifugé en Armaflex souple d'épaisseur 19 mm.

Centrale de traitement d'air : la centrale est constitué essentiellement d'un caisson de mélange (le mélangeur à renouvellement d'air) avec deux registres à réglage automatique schématisé dans les figures IV.5 et IV.6, un préfiltre d'efficacité 95 %, un ventilateur de soufflage poulie courroie réglable pour assurer un débit de 2165 m<sup>3</sup>/h monté avant la batterie chaude. Cette dernière est réellement l'échangeur de chaleur eau-air avec un by-pass côté eau assuré par une pompe à 3 vitesses muni d'un contrôleur de température numérique de type PID pour commander la vanne à 3 voies. Le taux de renouvellement de l'air dans le caisson de mélange est 20% (figure IV.6).

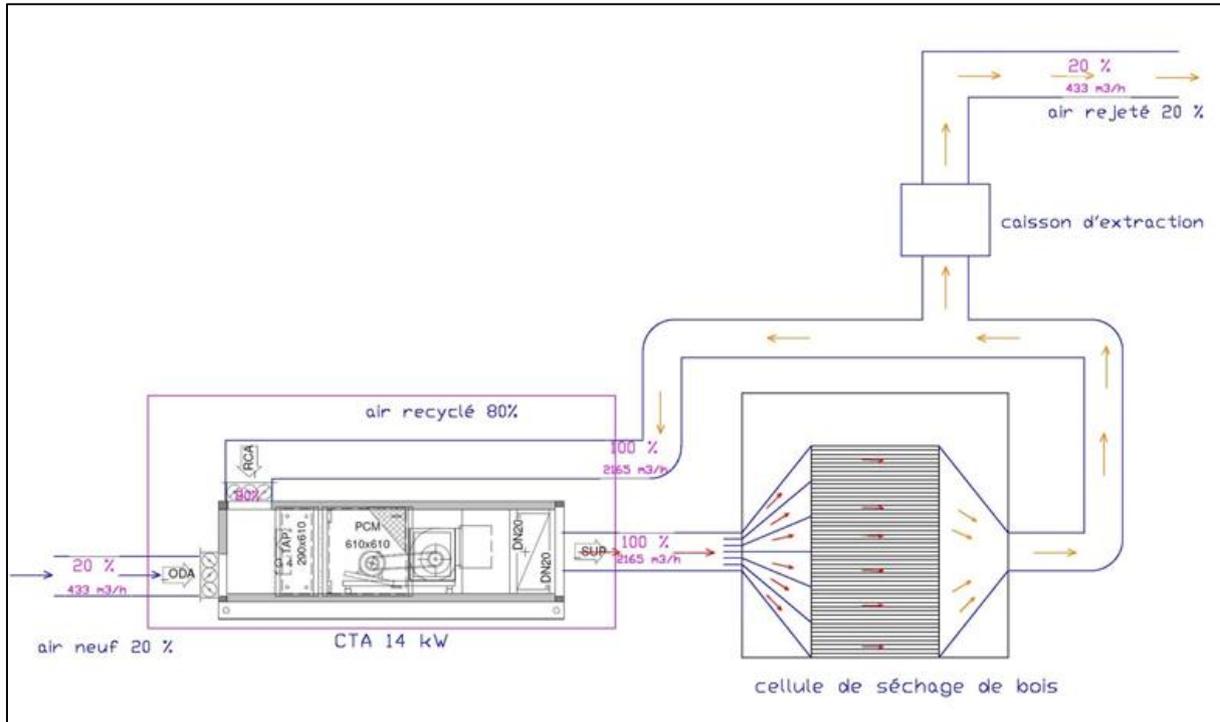


Figure -IV. 5- Centrale de traitement d'air [83]

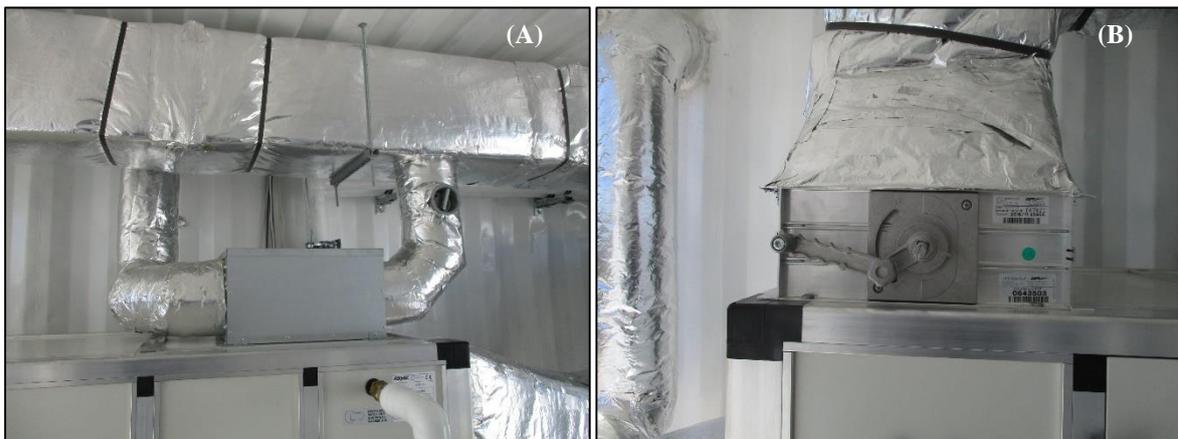


Figure-IV. 6- Registres d'air à réglage manuel (A) Register pour l'air à recycler (B) Register pour l'air à renouveler

La chambre de traitement : c'est une cellule bien étanche de dimensions H x L x l : 2,3 x 2 x 1,5, construite à partir des panneaux sandwichs d'épaisseur 40 mm.

Vase d'expansion : le volume du vase est 300 litres avec une pression de gonflage de 5 bars.

Système de mesure : l'installation est munie d'un système de mesure capable de mesurer et d'enregistrer jusqu'à 8 signaux d'entrée analogiques pour mesurer l'ensoleillement et les températures dans différents points du système, des thermomètres, des manomètres, des débitmètres et un mini PC portable pour le contrôle et l'acquisition des données (figure IV.7).



**Figure -IV. 7- Exemples des appareils de mesures et de contrôle (A) Débitmètre (B) Manomètre (C) Thermomètre (D) Ensemble des appareils de mesures pour une conduite (E) Les armoires électriques de contrôle et de commande (F) Le mini PC de contrôle**

### IV.2.3 Description du Fonctionnement du Système

Le système est constitué de deux parties principales : un système de chauffage d'eau (LOT N°1) et un système de traitement d'air (LOT N°2) comme indique la figure IV.8.

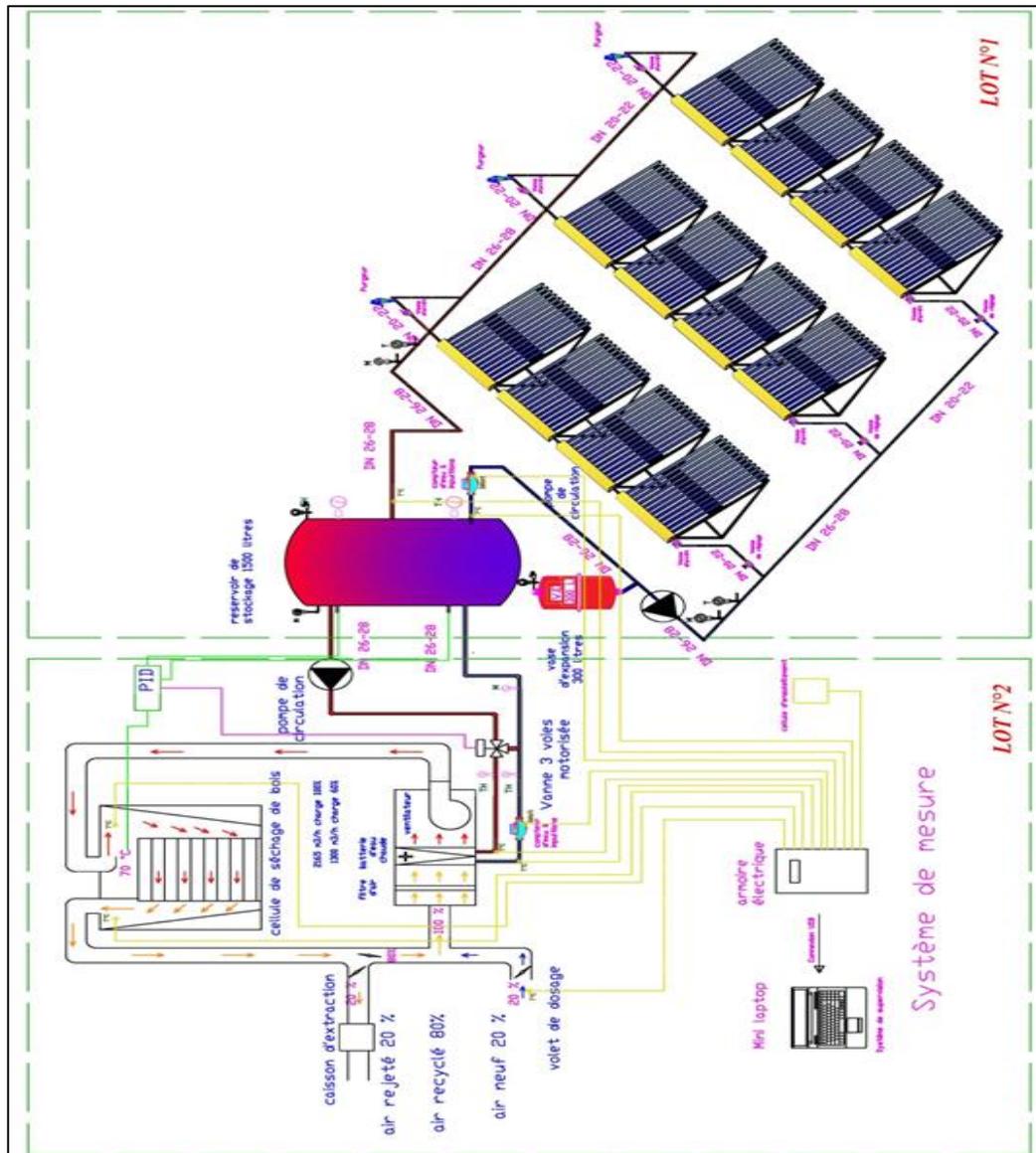


Figure -IV. 8- Schéma explicatif détaillé de la cellule solaire pour le traitement thermique du bois [83]

Le chauffage de l'air de traitement à une température égale à 70 °C est obtenu à partir de l'échange de chaleur effectué au niveau de l'organe de couplage entre les deux réseaux, qui est l'échangeur de chaleur eau-air.

Le fonctionnement du système passe par deux phases. La première consiste à faire fonctionner le circuit d'eau (LOT N°1 : capteurs solaire de type tube sous vide avec une surface de captation de 22 m<sup>2</sup>, une pompe solaire à eau de circulation et le réservoir de stockage d'une capacité de 1500 litres) afin de préchauffer l'eau du système de stockage jusqu'à atteindre une température beaucoup plus importante que la température d'air souhaitée pour le traitement thermique du bois.

Une fois la limite inférieure de la température de l'eau (à peu près 85°C dans le haut du réservoir de stockage pour assurer une température de séchage qui est de l'ordre de 70°C) est



atteinte, on passe à la deuxième phase de fonctionnement par le déclenchement de l'échangeur de chaleur eau/air pour chauffer une masse de 2566 kg/h d'air servant à traiter thermiquement 0.52 m<sup>3</sup> de bois d'emballage pour une durée de sept heures, de 8h00 jusqu'à 15h00 chaque jour.



**Figure -IV. 9-Appareils de commande de la cellule (A) Boutons de Marche/Arrêt du circuit d'air (B) Température de consigne de l'air de traitement**

L'exploitation du système est très facile pour tout utilisateur, il suffit juste d'appuyer sur le bouton marche en couleur verte comme le montre la figure IV.9 (A), et la circulation de l'air de séchage dans l'enceinte de traitement sera automatiquement déclenchée avec la température de consigne désirée (figure IV.9 (B)).

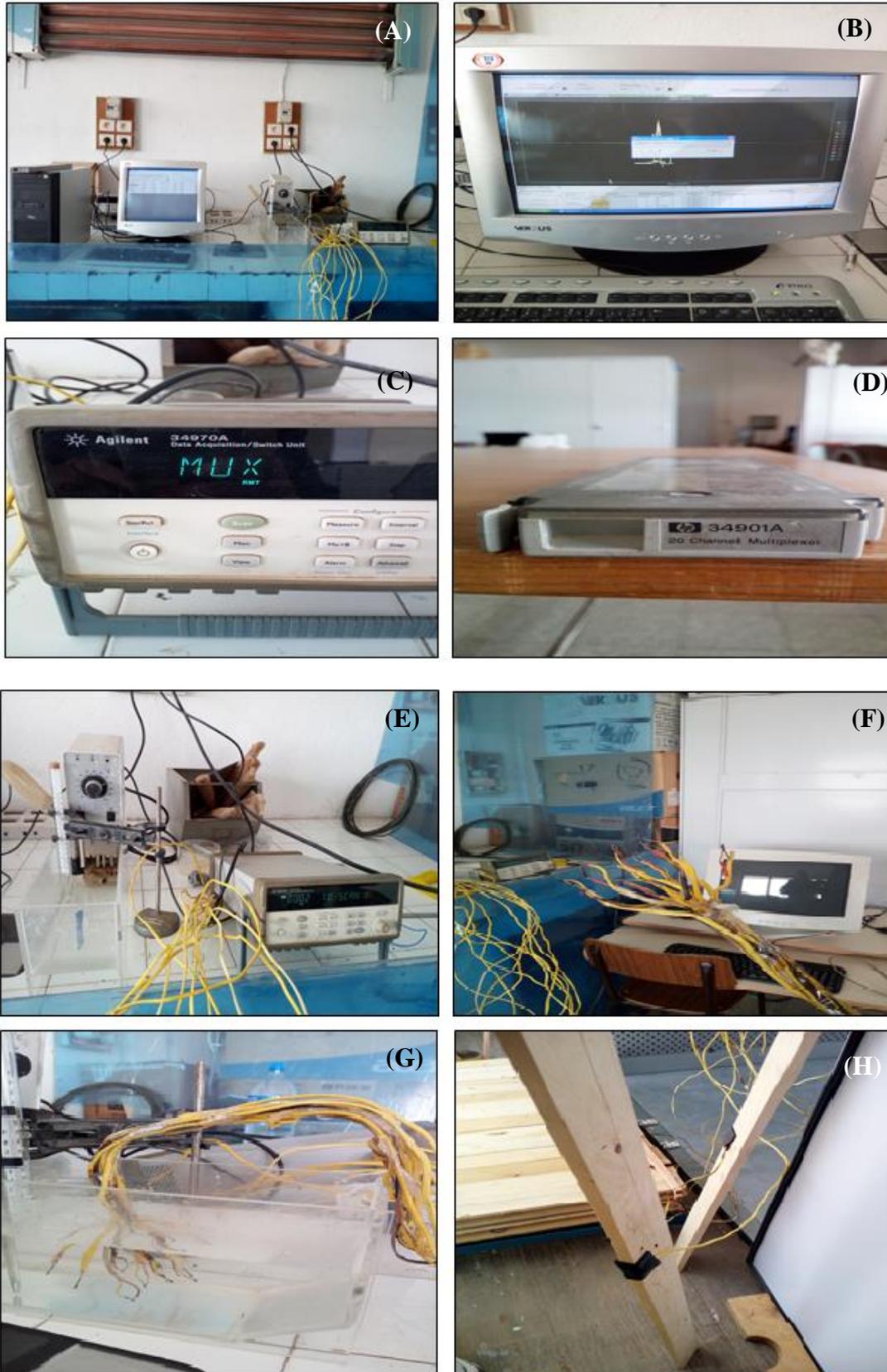
## IV.2.4 Mesures et Validation Expérimentale Préliminaire

### IV.2.4.1 Caractéristiques de Mesures de la Chambre de Traitement

La NIMP n°15 exige le maintien du cœur du bois à une température égale à 56 °C pour, au moins, une demi-heure. Il est, donc, impératif que la chambre de traitement de notre installation soit munie d'un système de mesure pour contrôler la température dans la pile de bois. Le système de mesure inclue différents thermocouples placés sur les parois intérieures de la chambre et au cœur de certaines planches du lit de bois comme le montre la figure IV.10.



**Figure -IV. 10- Emplacement des thermocouples dans la chambre de traitement et la pile de bois**



**Figure -IV. 11- Appareils d'étalonnage des thermocouples(A) Ensemble des appareils d'étalonnage (B) Unité d'acquisition des données (C) Le module Keysight 34901A (D) Multiplexeur 20 canaux(E) Bain fluidisé avec résistance électrique et le module Keysight 34901A (F) Les thermocouples (G) Thermocouples immergés dans un bain fluidisé (H) Planche de bois avec thermocouple intégré**



Les thermocouples ont été, tout d'abord, étalonné en utilisant l'appareillage d'étalonnage de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis ENIT (figure IV.11), couplé à une unité d'acquisition des données permettant de récupérer l'évolution temporelle des températures désirées dans la chambre de traitement après chaque utilisation de l'installation.

#### IV.2.4.2 Validation Expérimentale Préliminaire du Prototype

L'étude des performances de la cellule solaire pour bois a été réalisé en testant le prototype expérimental, ceci est nécessaire pour l'évaluation des paramètres pertinents du système. Sachant que le maintien de la même température et la même humidité relative de l'air à l'entrée de la cellule pendant toute la durée du traitement est parmi les conditions nécessaires pour le bon déroulement du processus, nous avons tenté de tester le prototype à vide (la chambre de traitement ne contient pas de pile de bois). Cependant, on a imposé un taux de renouvellement d'air constant de 20% pendant toute l'expérience.

Pour la journée du 18/05/2017 et pour un rayonnement solaire moyen de  $700 \text{ W/m}^2$ , les résultats de la première expérience ont été satisfaisants (figure IV.12). En effet, la température de l'air de traitement suit une courbe constante à une valeur égale à  $70^\circ\text{C}$  de 12h00 à 17h00 (la courbe de couleur magenta), malgré la présence des nuages (figure IV.13). Par conséquent, nous pouvons garantir qu'à ce stade, notre système fonctionne dans les normes exigées par les industriels du traitement thermique du bois d'emballage.

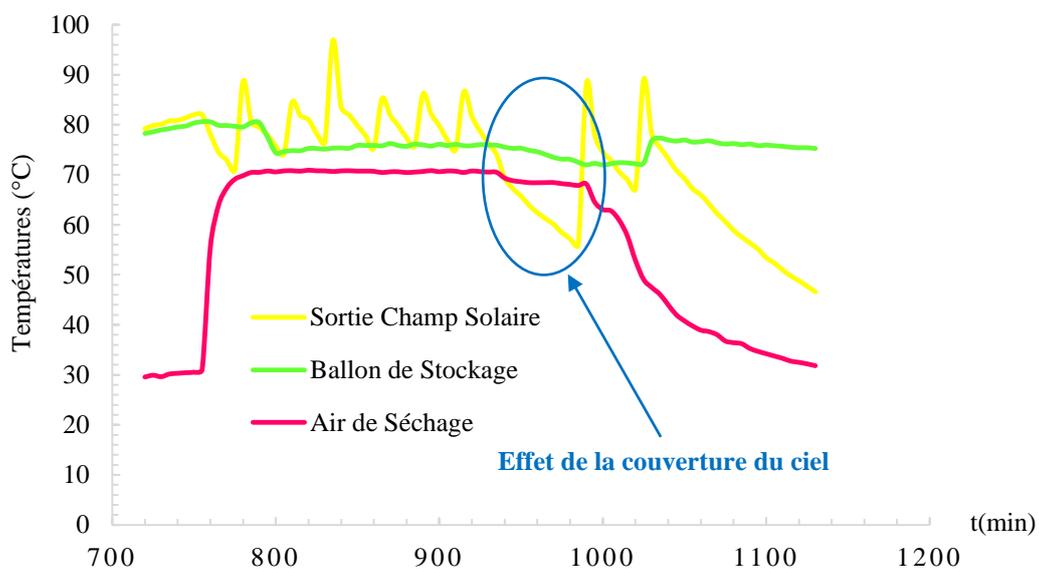


Figure -IV. 12- Profils des paramètres de performance du système solaire

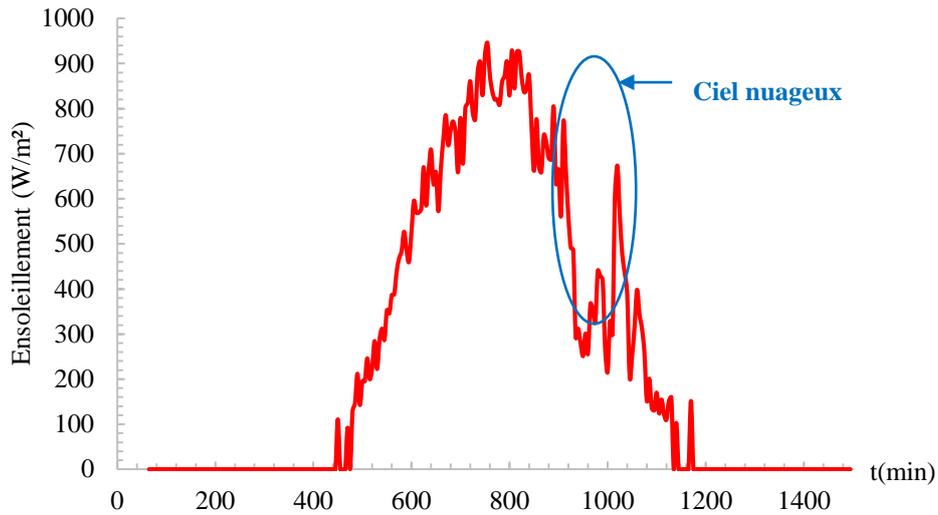


Figure -IV. 13- Rayonnement solaire durant la journée de 18/05/2017 où on y voit une période nuageuse

Pour la deuxième expérience, et puisque la NIMP n° 15 exige de maintenir la température de  $56^{\circ}\text{C}$  au cœur du bois pendant trente minutes, nous avons donc mesuré cette température à différents points de la pile de bois: à l'entrée, au centre et à la sortie de la première, la cinquième et la dixième rangée du lit de bois, en suivant la direction de l'écoulement d'air (figure IV.14).

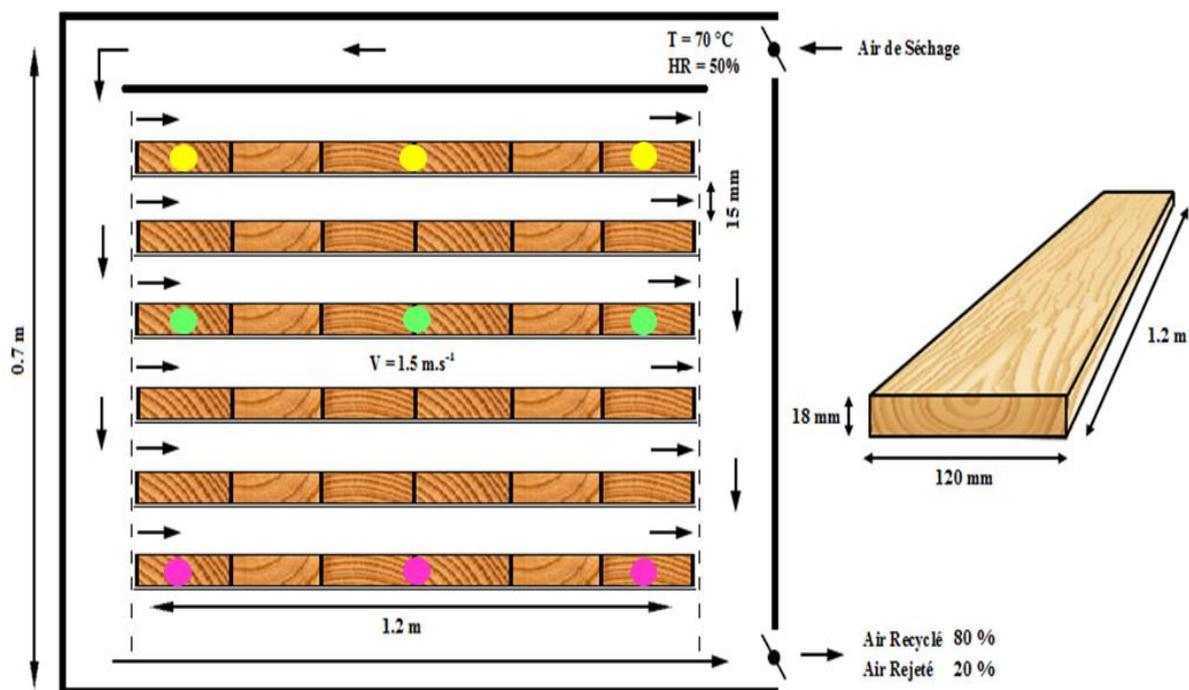


Figure -IV. 14- Différents points de mesures de la température de la pile de bois



Nous avons procédé comme suit : des trous ont été percés au centre des planches, comme le montre la figure IV.15, et nous avons introduit des thermocouples déjà étalonnés à l'intérieur de ces trous. Ces derniers ont été bouchés par de la pâte à bois.

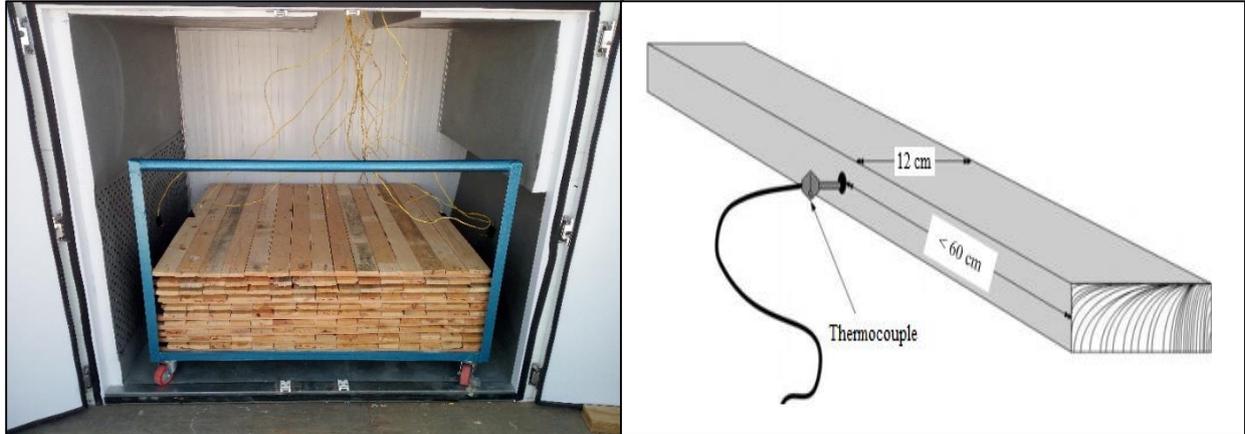


Figure -IV. 15- Procédure des mesures expérimentales

La figure IV.16 ci-dessous montre l'évolution de la température du cœur des planches centrales (placées à la cinquième rangée, c'est-à-dire celle du milieu). On peut y voir, que la température de 56°C est atteinte en 22 mn pour la première planche, 35 mn pour la planche du centre, et 43 mn pour la dernière planche. Ce qui donne un temps de traitement d'une heure et quart, un temps assez court par rapport à la durée du traitement obtenue par les simulations numériques (Chapitre III). Cet écart dans le résultat est dû à la qualité du bois utilisé (fourni par notre partenaire industriel : Tunisie Palettes) dans le test expérimental. En effet, ce bois est relativement sec, alors que les simulations ont considéré un bois initialement vert. Dans les essais futurs, nous avons l'intention de traiter le bois vert et d'analyser son comportement dans l'installation solaire pour pouvoir valider les résultats numériques.

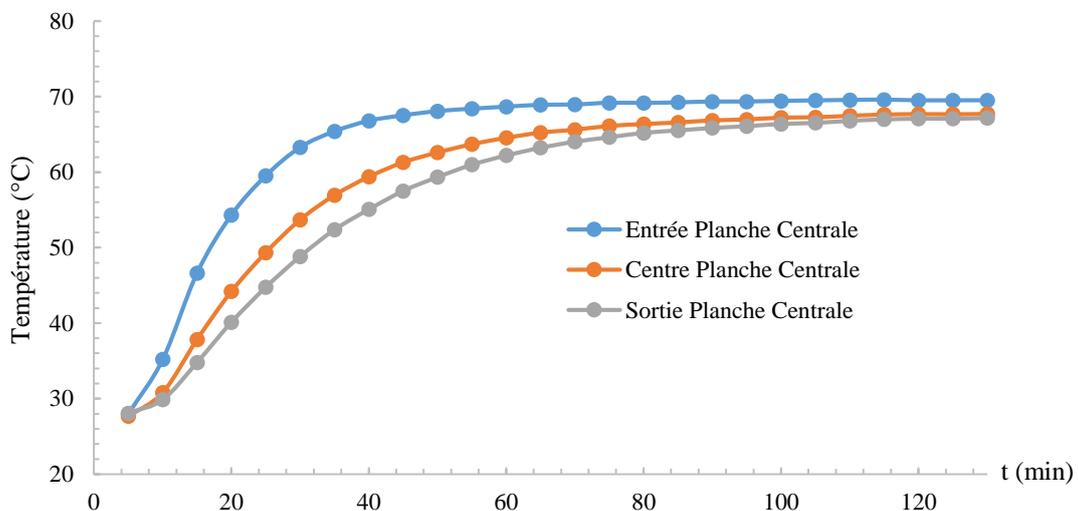


Figure -IV. 16- Évolution de la température au cœur des planches du bois



### **IV.3 Conclusion**

Dans ce chapitre, une description détaillée de la mise en place du prototype de la cellule solaire pour bois installé à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, ENIT, a été présentée, ainsi que des tests expérimentaux préliminaires du traitement thermique du bois d'emballage à l'énergie solaire selon la norme NIMP n°15.

L'étude a démontré la faisabilité technique du prototype installé et son bon fonctionnement. L'installation fera l'objet de plusieurs études expérimentales approfondies et servira de banc de tests pour les experts du bois d'emballage et les élèves ingénieurs.

Cette étude a fait l'objet d'un symposium organisé par les partenaires du projet PNRI, qui s'est déroulé le 23 mai 2017, à l'amphithéâtre « Mokhtar Laatiri » de l'ENIT. Le CETIBA a été chargé par inviter des industriels et de leur ministère de tutelle et les équipes de recherches ont également invité des collègues enseignants.

Dans ce cadre, nous avons préparé une brochure (Annexe A) à distribuer lors du symposium servant à promouvoir et diffuser les résultats de notre travail aux experts du domaine.

Ce projet a participé dans les nominations des prix de l'AEE TUNISIA CHAPTER (Association of Energy Engineers) de l'année 2017, dans la catégorie 'Research / Graduation project in Energy', et il a gagné le prix [84].



**Partie (B)**  
**Séchoir Solaire pour**  
**Tomates**



## *Chapitre V*

### *Conception et Modélisation du Séchoir Solaire pour Tomates*



# Chapitre V :

## Conception et Modélisation du Séchoir Solaire pour Tomates

### V.1 Introduction

L'étude présentée dans cette partie entre dans le cadre d'un Programme de Recherche Fédérée Tunisien (PRF) et a pour but de concevoir et d'optimiser un séchoir solaire pour les tomates. Les objectifs généraux du programme sont de réduire la consommation d'énergie du séchage industriel des tomates tout en assurant une haute qualité des produits, et de permettre aux petites entreprises d'accéder à un séchoir à énergie « propre » et à faible coût.

Dans ce chapitre, nous exposons les cinétiques de séchage des tomates qui ont été obtenues expérimentalement. Ces cinétiques permettent de déterminer les paramètres contrôlant l'opération (la température et l'humidité relative de l'air de séchage et le temps de séchage). Ils serviront, par la suite, comme données d'entrée pour la simulation du séchoir complet.

### V.2 Présentation du projet PRF : Séchoir solaire pour les tomates

Le Programme de Recherche et de Développement Fédéré Tunisien (PRF) [85] implique plusieurs laboratoires tunisiens et est financé par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique. Le projet a pour but de concevoir, réaliser et installer un prototype de séchoir solaire pour les tomates.

Le projet est géré par l'Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie (ANME) et comporte plusieurs équipes de recherche :

- Le Laboratoire d'Etudes des Systèmes Thermiques et Energétiques (LESTE) de L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir (ENIM).
- Groupe de Recherche en Génie des Procédés Agro-Alimentaires, Laboratoire de Recherche en Mécanique des Fluides Appliquée de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS)
- Le laboratoire d'Energétique et des Transferts Thermiques et Massiques (LETTM) de la Faculté des Sciences de Tunis (FST).

Chaque équipe est responsable d'un aspect du projet en complémentarité avec le reste des équipes qui collaborent en partenariat avec l'industriel spécialisé en séchage des tomates AGRIFOOD.



## V.3 Démarche de la Modélisation du Séchoir Solaire pour les Tomates

### V.3.1 Exploitation de la Cinétique de Séchage

#### V.3.1.1 Cinétique de Séchage

La variabilité et la diversité des tomates laissent envisager que le meilleur moyen pour caractériser leur comportement au cours du séchage consiste à déterminer expérimentalement leurs cinétiques de séchage.

L'expérience de base consiste à placer les tomates dans un courant d'air chaud dont la température, l'humidité et la vitesse sont contrôlées et d'estimer la valeur de la teneur en eau de la tomate durant le processus de séchage, par des pesées à intervalles de temps réguliers.

#### V.3.1.2 Etablissement de la Cinétique de Séchage pour un Ecoulement Horizontal

Lors du processus de séchage, il se produit dans le produit à sécher des transferts thermique et massique. La courbe de séchage représentant l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps,  $X = f(t)$ , contient toutes les informations sur les transferts de chaleur et de masse qui ont lieu entre le produit à sécher et l'air de séchage.

La cinétique de séchage des tomates a été obtenue expérimentalement dans la soufflerie du Laboratoire de Mécanique des Fluides Appliquée, Génie des Procédés et Environnement de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS), Université de Sfax, et nous a été transmise par le Groupe de recherche en Génie des Procédés Agroalimentaire, GP2A, partenaire du projet PRF dont fait partie ce travail. La variété étudiée est la tomate « ronde » cultivée sous serre et fournie par la société Tunisienne « AGRIFOOD », partenaire industriel du projet, spécialisée dans le séchage de tomate, calamar et poulpe.

Dans la veine d'essais, l'écoulement de l'air de séchage est horizontal et est parallèle à la surface du produit à sécher. Une fois les conditions expérimentales sont stables, les cinétiques de séchage sont déterminées à partir des mesures de la variation de la masse des échantillons de tomates le long du processus de séchage. Le dispositif expérimental comporte un ordinateur équipé d'une sortie de données permettant l'acquisition de la masse au cours du temps [41].

À partir de la cinétique de séchage, établie pour des conditions déterminées (vitesse, température et humidité de l'air de séchage), on peut déterminer le temps de séchage correspondant à l'atteinte de la teneur en eau requise et les propriétés de l'air à la sortie du séchoir.



Les conditions de séchage pour le cas de référence pour cette étude sont (Figure V.1) :

- Vitesse de l'air = 1,6 m/s
- Température d'entrée de l'air de séchage = 55°C
- Humidité relative d'entrée de l'air de séchage = 20%
- Masse totale initiales des tomates fraîches = 315 kg
- Température ambiante = 12 °C
- Humidité relative ambiante = 75 %
- Teneur en eau finale des tomates = 20%

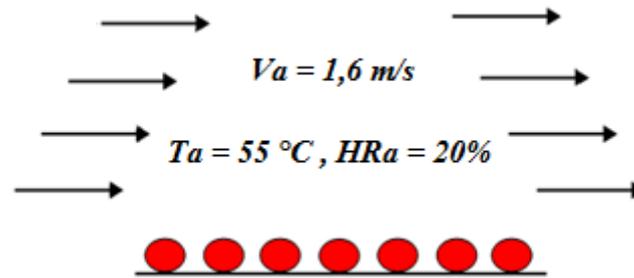


Figure –V.1-Ecoulement Horizontal de l'Air de Séchage

La Figure V.2 présente un exemple de cinétique de séchage de tomates, servant à déterminer la température et l'humidité relative de l'air à la sortie de la chambre de séchage en appliquant la première loi de la thermodynamique, la loi de la conservation de la masse d'eau et le diagramme psychrométrique.

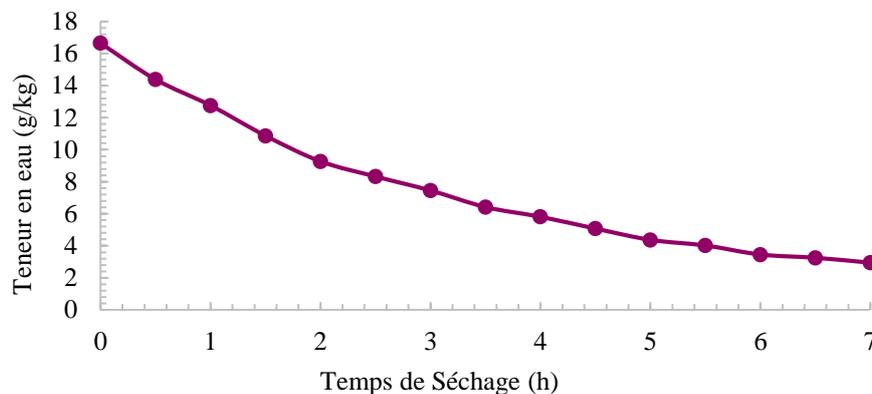


Figure-V.2-Cinétique de Séchage Horizontal des Tomates (mesures de [41])

Afin de conserver l'énergie, une grande partie de l'air de séchage est recyclée en la mélangeant avec la bonne proportion d'air ambiant pour ajuster son humidité. Pour cela, la température et l'humidité relative de l'air à la sortie de la chambre de séchage sont nécessaires. Ces dernières ont été calculées à partir de la cinétique de séchage obtenue expérimentalement, en utilisant la première loi de la thermodynamique, la loi de la conservation de la masse d'eau et le diagramme psychrométrique comme suit.



La température et l'humidité absolue de l'air de sortie sont données par les relations suivantes :

La loi de la conservation de la masse d'eau :

$$\omega_o = \omega_i + \frac{\dot{m}_{evap}}{\dot{m}_{air}} \quad (V.1)$$

Où :

$\omega_i$  : Humidité absolue de l'air à l'entrée de la chambre de séchage ( $\text{g}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{air sec}}$ ).

$\omega_o$  : Humidité absolue de l'air à la sortie de la chambre de séchage ( $\text{g}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{air sec}}$ ).

$\dot{m}_{evap}$  : La masse d'eau évaporée (kg/h).

$\dot{m}_{air}$  : La masse de l'air (kg/h).

Le premier principe de la thermodynamique appliqué à l'air de séchage entre l'entrée et la sortie de l'enceinte de séchage, en ignorant la phase de préchauffage des tomates :

$$\dot{m}_{air} C_{p_{air}} T_o = \dot{m}_{air} C_{p_{air}} T_i + \dot{m}_{evap} h_{fg} \quad (V.2)$$

Où :

$C_{p_{air}}$  : Capacité calorifique de l'air (J/kg.K).

$T_o$  : Température de sortie de l'enceinte de séchage (K).

$T_i$  : Température d'entrée de l'enceinte de séchage (K).

$h_{fg}$  : Chaleur latente de vaporisation (KJ/kg).

Ce qui donne :

$$T_o = T_i - \frac{\dot{m}_{evap}}{\dot{m}_{air}} \frac{h_{fg}}{C_{p_{air}}} \quad (V.3)$$

La masse évaporée  $\dot{m}_{evap}$  est obtenue à partir de la dérivée par rapport au temps de la teneur en eau des tomates multipliée par la masse sèche des tomates.

Les figures V.3 et V.4 présentent respectivement les profils de la température et l'humidité relative de l'air de séchage à la sortie du séchoir. On remarque que vers la fin du processus de séchage, la valeur de la température de l'air à la sortie de la chambre de séchage est presque égale à sa valeur d'entrée, ce qui confirme la fin de l'évaporation de l'eau contenue dans les tomates. La même remarque est valable pour l'humidité relative de sortie de l'air de séchage.

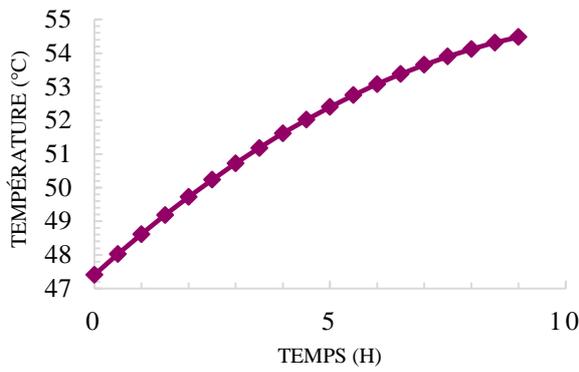


Figure -V. 3-Température de sortie de l'air de séchage

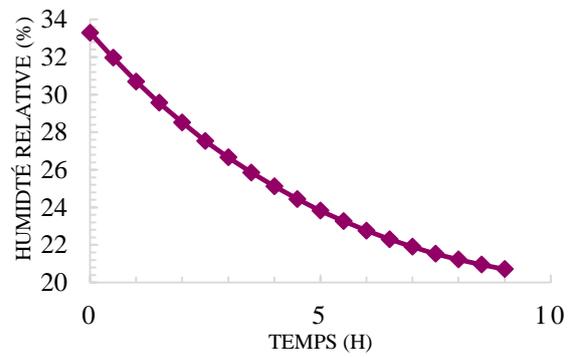


Figure -V. 4-Humidité relative de sortie de l'air de séchage

Les proportions des débits massiques dans le mélangeur à renouvellement d'air, composant un débit d'entrée à la chambre de séchage de l'ordre de 18 750 kg/h, sont déterminées à partir de la loi de conservation de la masse de l'eau dans l'air, connaissant la température et l'humidité absolue de l'air à la sortie de la chambre de séchage (figure V.5).

La loi de la conservation de la masse de l'eau :

$$\frac{\dot{m}_{amb}}{\dot{m}_{tot}} = \frac{\omega_{air\ mixer} - \omega_{recycled}}{\omega_{amb} - \omega_{recycled}} \tag{V.4}$$

Où :

$\dot{m}_{tot}$  : La masse totale de l'air (kg/h)

$\dot{m}_{amb}$  : La masse de l'air ambiant (kg/h)

$\omega_{air\ mixer}$  : Humidité absolue de l'air dans le mélangeur (g<sub>eau</sub>/kg<sub>air sec</sub>).

$\omega_{recycled}$  : Humidité absolue de l'air recyclé (g<sub>eau</sub>/kg<sub>air sec</sub>).

$\omega_{amb}$  : Humidité absolue de l'air provenant de l'ambiance (g<sub>eau</sub>/kg<sub>air sec</sub>).

Dans le mélangeur à renouvellement d'air, la régulation consiste à agir sur le taux d'air neuf de manière à ajuster la quantité d'air recyclée pour obtenir l'humidité absolue de l'air à l'entrée du séchoir (figure V.3), c'est-à-dire la température et l'humidité relative de l'air, requises à l'entrée de la chambre de séchage.

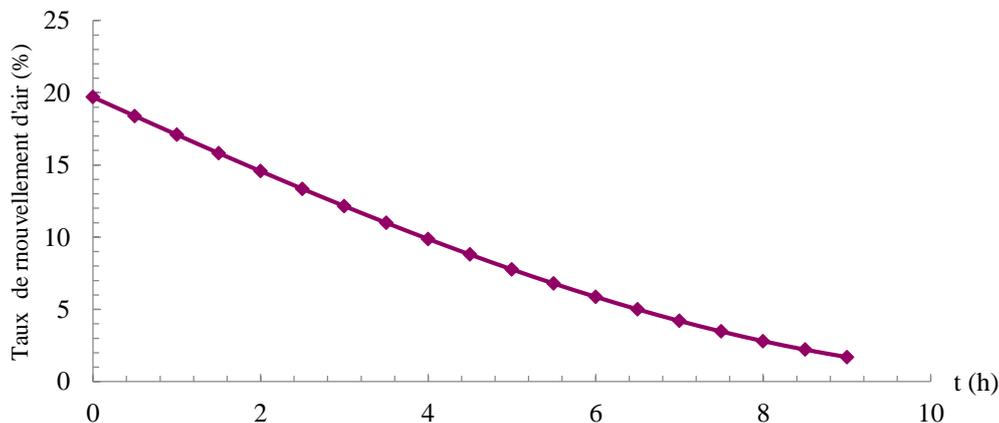


Figure -V. 5- Proportion du débit de l'air ambiant dans le mélangeur à renouvellement d'air au cours d'un cycle de séchage



### V.3.2 Modélisation sous TRNSYS

Dans tout travail de conception, il faut identifier toutes les alternatives possibles et évaluer les avantages et inconvénients de chacun. Dans ce qui suit, nous présenterons quelques modèles de séchoirs solaires développés dans l'environnement de simulation complet et extensible du logiciel flexible TRNSYS dont la description a été présentée dans le chapitre II. Après leur discussion, la configuration la plus adéquate sera retenue pour le dimensionnement du séchoir.

En conformité avec les pratiques du partenaire industriel du projet, le séchoir doit fonctionner avec une température de l'air de 55°C et une humidité relative de 20% à l'entrée de l'enceinte de séchage. La vitesse de l'air de séchage à travers les claies est de 1,6 m/s. La capacité du séchoir est de 315 kg de tomates fraîches, réparties sur 3 chariots contenant vingt-une claies chacun. Les dimensions des claies sont les suivantes : longueur 90 cm, largeur 60 cm et espacement entre les claies 6 cm.

#### V.3.2.1 Séchoir avec Capteurs Solaires et sans Stockage

Parmi les configurations proposées, nous avons considéré le séchoir avec capteurs solaire à air et sans stockage (figure V.6).

Cette configuration est la plus simple, puisqu'on chauffe directement l'air de séchage, sans recourt à un fluide caloporteur, et la moins coûteuse, puisqu'elle évite l'utilisation de stockage et d'échangeurs de chaleur. C'est un circuit d'air en boucle ouverte. Afin de vérifier son adéquation, nous l'avons modélisé dans l'interface de simulation TRNSYS pour étudier son comportement thermodynamique.

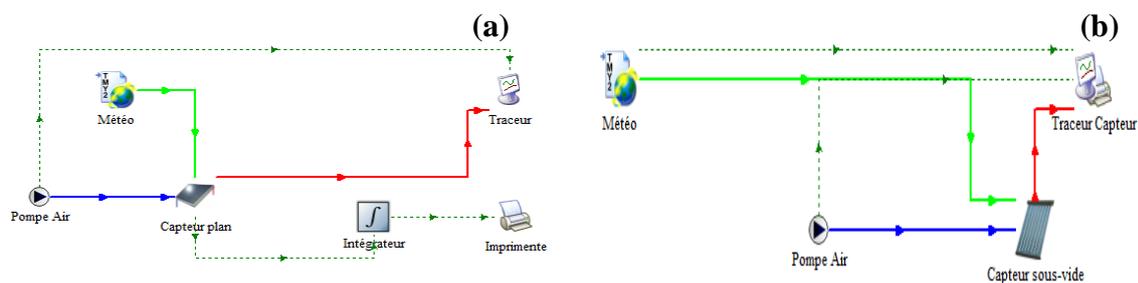


Figure -V. 6- Modèle sous TRNSYS du séchoir solaire pour tomates sans stockage et avec (a) capteurs à air plan ; et (b) capteurs à air sous-vide.

Les simulations faites dans l'interface de travail du logiciel de simulation TRNSYS, sont basées sur la notion de la journée typique, on a choisi le 15 Janvier comme journée d'étude correspondante à la saison hivernale et le 15 Juillet pour l'été, le processus de séchage commence à partir de 8h00 du matin pour durer 9 heures (d'après la durée de séchage



discutée ci-haut. C'est approximativement le temps de séchage des tomates dans la littérature aussi).

### V.3.2.1.1 Simulation du séchoir avec capteur solaire à air plan

La simulation du fonctionnement du séchoir sans stockage (Figure V.6a) donne une surface de captation des capteurs solaires plans de 230 m<sup>2</sup> et une température de l'air de séchage fluctuante et qui suit la variation des radiations solaires (Figure V.7). Elle n'atteint la température de 55°C désirée que pendant une seule heure (de 14h00 à 15h00 le 15 Janvier) de la durée de séchage, ce qui fait que pour satisfaire les besoins de toute la durée de l'opération, il faut encore augmenter la surface de captation. Donc, bien que cette surface soit élevée, le séchage ne peut pas être assuré avec cette configuration.

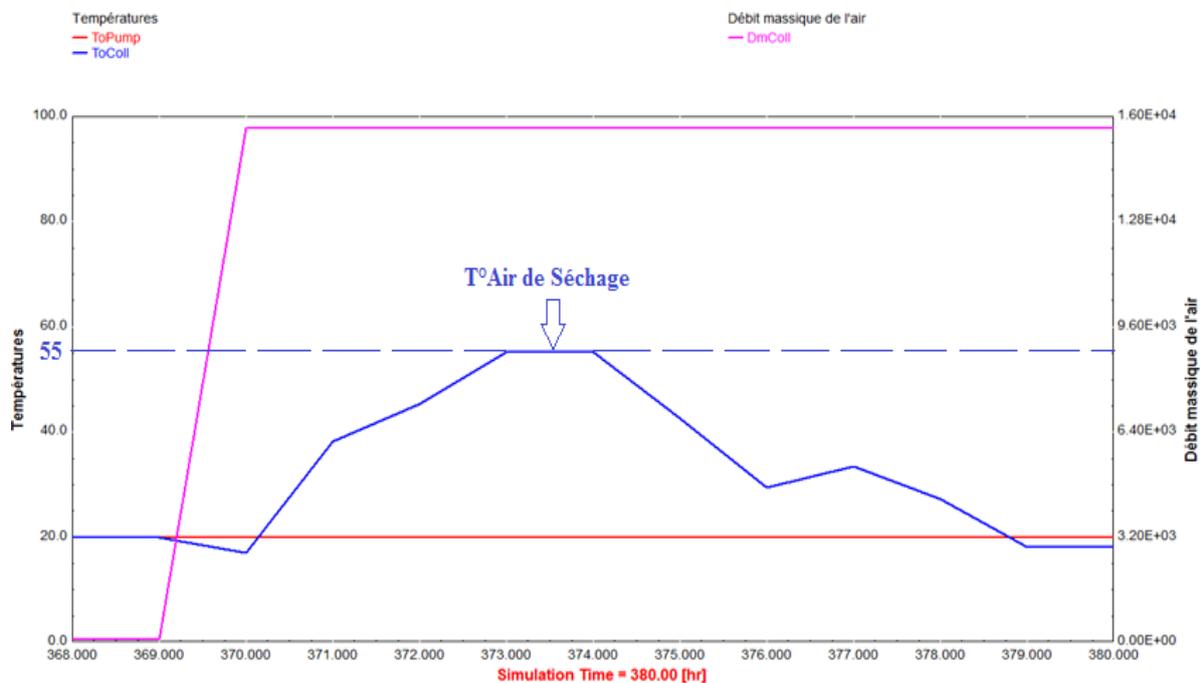


Figure -V. 7- Débit massique et températures d'entrée/ sortie de l'air des capteurs solaires de type

### V.3.2.1.2 Simulation du séchoir avec capteur solaire à air sous-vide

La Figure V.8 présente la température de l'air de séchage (représentée par la courbe en bleu) pour une surface de capteurs à air sous vide de 85 m<sup>2</sup>. Malgré l'importance de la surface de captation, la température de l'air n'atteint les 55°C que pour un laps de temps très court par rapport à la durée totale du séchage. Si on augmente cette surface, on aura une température plus importante sur tout le processus. Cependant, on ne pourra pas éliminer sa variabilité.

D'après les résultats des simulations pour le séchoir solaire avec capteurs à air et sans stockage, il est évident que les capteurs à air, qu'ils soient plans ou sous-vide, requièrent une



surface de captation très élevée, d'où une occupation de terrain conséquente et un coût d'investissement important. De plus, un système sans stockage ne permet pas de remplir une condition nécessaire pour le bon déroulement du processus de séchage, c'est-à-dire avoir une température constante et régulée de l'air soufflé. Donc, un séchoir couplé à des capteurs à air et sans stockage de l'énergie thermique, semble être une configuration inadéquate.

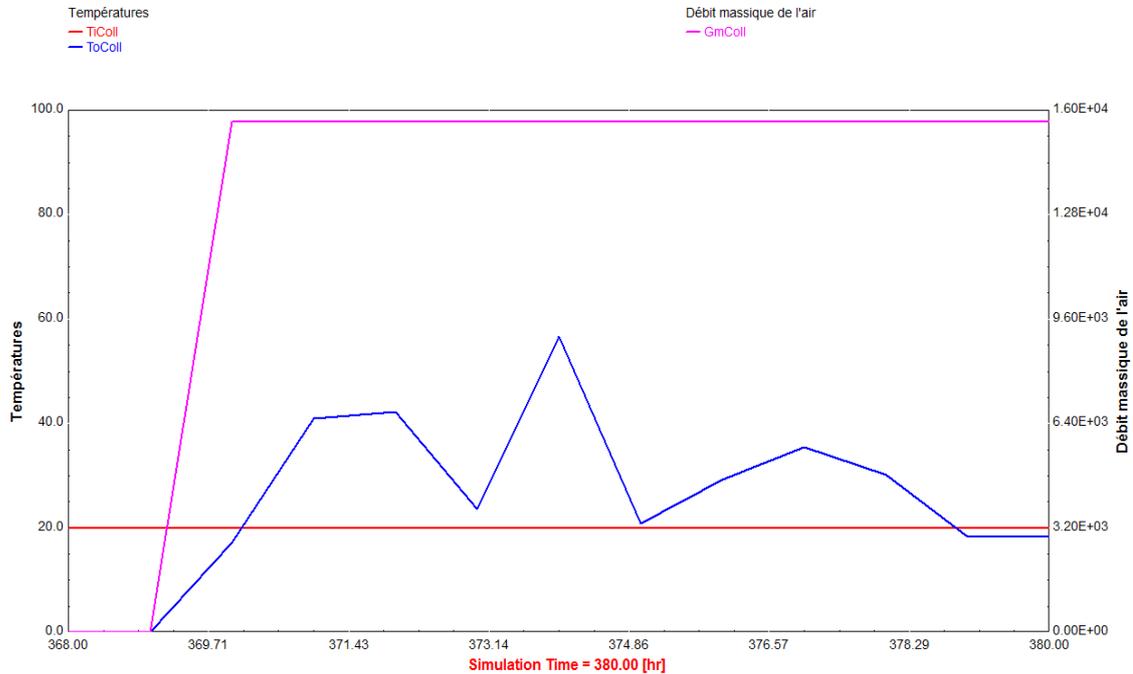


Figure -V. 8- Débit massique et températures d'entrée/ sortie de l'air des capteurs solaires de type tubes sous-vide

### V.3.2.2 Séchoir Solaire avec Stockage de l'Energie Thermique

Le séchoir considéré dans cette partie suit la même analyse globale de la cellule solaire présentée dans le chapitre II. Il est muni d'une unité de chauffage composée des capteurs solaires fonctionnant comme la source d'énergie thermique, connectée à une unité de stockage qui assure le fonctionnement continu du système et une unité de séchage constituée par la chambre contenant les tomates à sécher.

Dans ce cas, nous avons étudié deux conceptions. La première consiste à chauffer l'air dans un champ de capteurs solaires à air sous-vide puis le stocker dans un lit de roches, dont la chaleur spécifique correspond à la moitié de celle de l'eau (soit presque 2091 J/kg.K [86]) connecté à un échangeur de chaleur air-air. La température de sortie de l'air de l'échangeur dépendra de l'évolution de la température de l'air stockée (figures V.9).

Dans les systèmes de stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible, les deux matériaux les plus utilisés sont la roche et l'eau, ils présentent une importante chaleur spécifique et de bonnes caractéristiques thermiques.

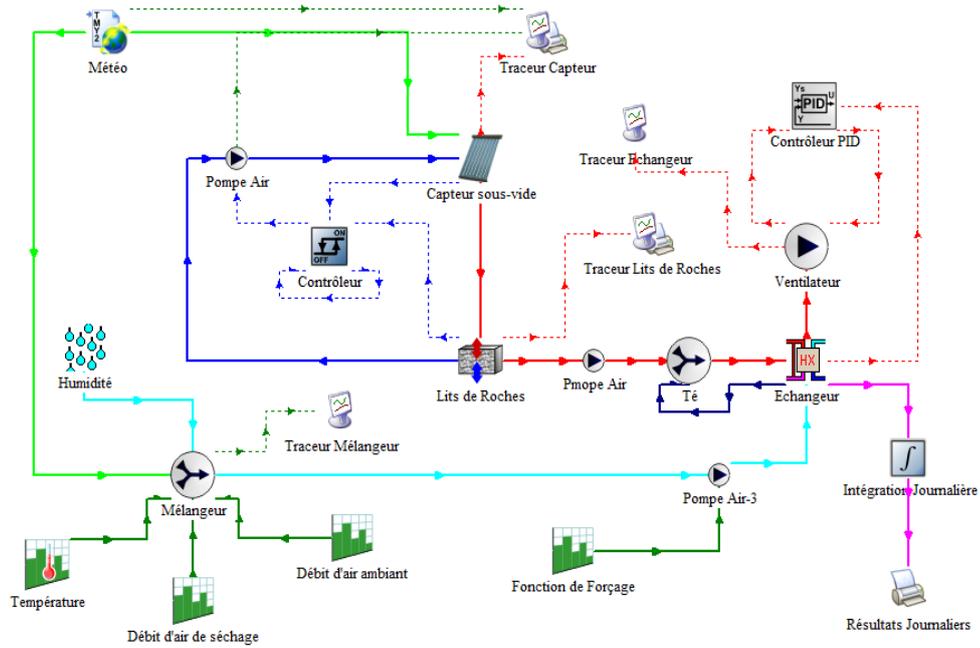


Figure -V. 9-Modèle TRNSYS du séchoir solaire avec stockage d'air chaud

Pour le deuxième design, le séchoir solaire est composé d'une unité de stockage d'eau chaude venant des capteurs solaires à eau, suivi d'un échangeur de chaleur eau-air qui permet de contrôler la température de l'air à l'entrée de la chambre de séchage à partir d'un by-pass au niveau du débit de l'eau (figures V.10).

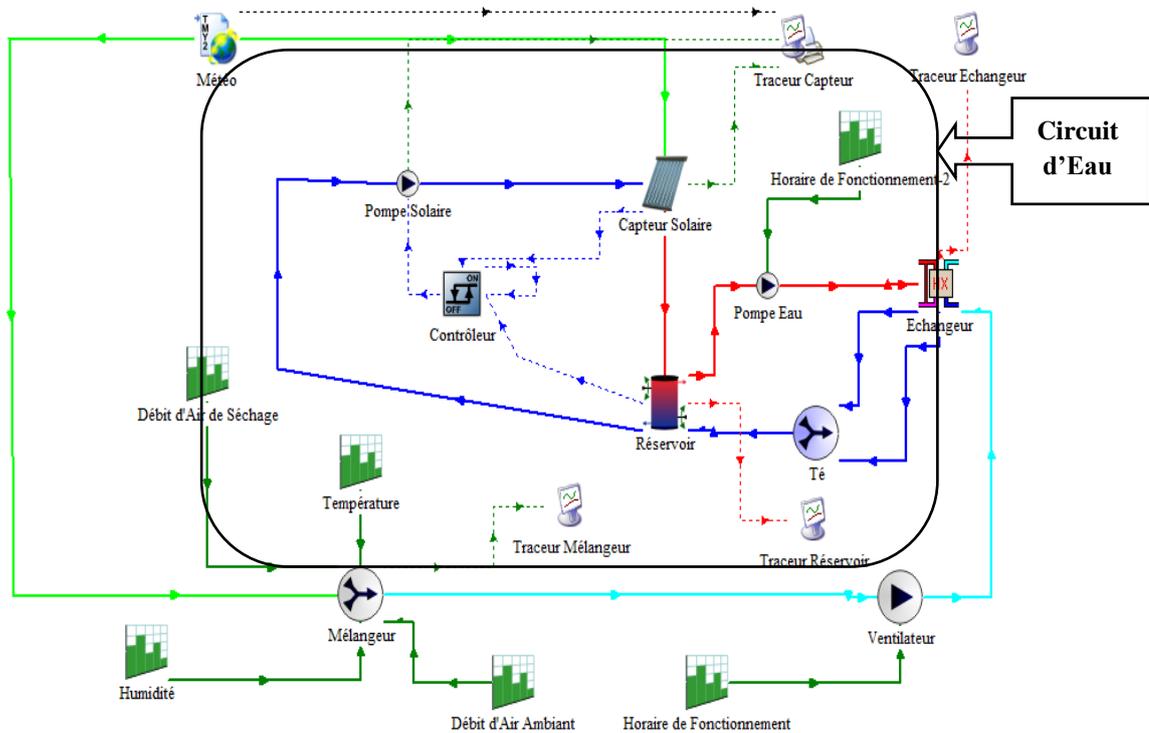


Figure -V. 10-Modèle TRNSYS du séchoir solaire avec stockage d'eau chaude



### V.3.2.2.1 Résultats des Simulations des Séchoirs Solaires avec Stockage

Les résultats des simulations pour les deux configurations de séchoirs solaires avec stockage considérés sont résumés dans le tableau V.1. Nous remarquons qu'au niveau de la surface de captation, en hiver ou en été, quel que soit le fluide caloporteur (eau ou air), les capteurs solaires plans représentent la surface la plus importante dans toutes les alternatives de configurations proposées, elle est presque le double de la surface des capteurs solaires de type tubes sous vide.

La même remarque est valable pour le système de stockage, en utilisant un réservoir de stockage d'eau chaude ou bien un lit de roches où circule de l'air chaud, les capteurs solaires de type tubes sous vide demandent presque le 1/3 du volume de stockage que les capteurs solaires plans, et ceci pour les deux fluides caloporteurs et les deux différentes saisons.

**Tableau- V. 1-Comparaison entre les deux types de séchoir solaire avec stockage**

Saison	Hiver				Eté			
	Eau		Air		Eau		Air	
Type des Capteurs	Plan	SV	Plan	SV	Plan	SV	Plan	SV
Surface de Captation (m <sup>2</sup> )	150	65	220	126	70	30	200	100
Type de Stockage	Réservoir Stratifiée		Lits de Roches		Réservoir Stratifiée		Lits de Roches	
Volume de Stockage	5 m <sup>3</sup>	3,8 m <sup>3</sup>	6 m <sup>3</sup>	4 m <sup>3</sup>	2 m <sup>3</sup>	1,5 m <sup>3</sup>	6 m <sup>3</sup>	4 m <sup>3</sup>
Durée de Séchage	9 heures							
Nombre de Shifts	1		1		2		1	

En conclusion, pour une durée de 9 heures du processus de séchage, et pendant les deux saisons (été et hiver), le séchoir solaire avec stockage d'eau chaude est plus intéressant du point de vu coût d'investissement puisque la surface de captation des capteurs solaires à eau est très petite par rapport à celle avec des capteurs solaires à air (tableau V.1). De plus, le stockage de l'énergie thermique dans l'eau chaude est plus simple à réaliser techniquement que le stockage de la chaleur de l'air dans un lit de roches dont le volume est plus important.

Le séchoir avec capteurs solaires à eau de type sous vide et un réservoir de stockage présente un autre avantage dans le fait que nous pouvons avoir deux cycles de séchage des



tomates en été, un meilleur retour sur investissement pour cette configuration. Cela correspond également à la période de l'année où la récolte des tomates est la plus abondante.

Donc, à partir des résultats précédents, le concept le plus adéquat et le plus abordable pour notre étude et qui répond le mieux aux besoins de séchage des tomates est le séchoir solaire avec capteurs solaires à eau de type tubes sous-vide muni d'un réservoir de stockage d'eau chaude.

### V.3.2.2.2 Description du fonctionnement du Séchoir Solaire de Référence

D'après la discussion ci-dessus, et après avoir envisagé plusieurs configurations de l'installation solaire, la configuration retenue du séchoir solaire, illustrée dans la figure V.11, se compose des capteurs solaires de type tubes sous vide, un réservoir de stockage à deux degrés de stratification, un échangeur de chaleur eau-air, une chambre de séchage et un mélangeur à renouvellement d'air. Ce dernier a pour rôle de réaliser un mélange d'air provenant de l'unité de séchage et d'air ambiant dans des proportions bien déterminées afin d'obtenir l'humidité absolue requise à l'entrée de l'enceinte de séchage, indépendamment des conditions météorologiques du lieu d'implantation du séchoir.

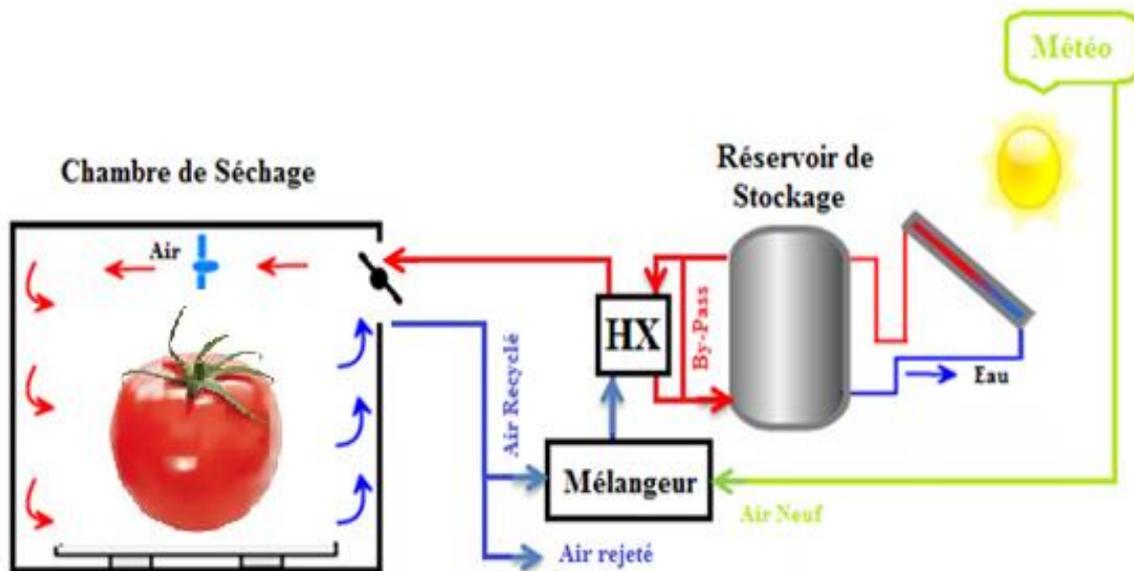


Figure -V. 11-Installation pour le séchage solaire des tomates

Le fonctionnement du système passe par deux phases. La première consiste à faire fonctionner le circuit d'eau (figure V.10) afin de préchauffer l'eau du système de stockage jusqu'à une température plus importante que la température d'air souhaitée pour le séchage et aussi jusqu'à accumuler une masse de stockage suffisante pour le fonctionnement nocturne (nous avons vu qu'il est possible de faire deux cycles de séchage en une journée, pendant la saison estivale).

Une fois la limite inférieure de la température de l'eau (à peu près 65°C dans le haut du réservoir de stockage pour assurer une température de séchage qui est de l'ordre de 55 °C) est



atteinte, on passe à la deuxième phase par le déclenchement de l'échangeur de chaleur pour chauffer un débit massique de 18750 kg/h d'air servant à sécher 315 kg de tomates fraîches.

### V.3.2.2.3 Etude d'un Echantillon de Simulation du Séchoir Solaire pour Tomates

Pour la bonne conduite du séchage, on doit contrôler la température et l'humidité relative de l'air entrant dans le séchoir. Le contrôle de l'humidité est obtenu dans le mélangeur à renouvellement d'air et c'est dans l'échangeur de chaleur eau-air qu'on ajuste la température.

La température de l'air à la sortie de l'échangeur, qui correspond aussi à la température à l'entrée de l'enceinte de séchage, comme le montrent les figures V.12 à V.15, suit une courbe essentiellement constante à une valeur égale à 55°C (courbe en bleu) maintenue pendant le déroulement du séchage grâce à la variation du transfert thermique de l'eau vers l'air au sein de l'échangeur. Ce qui confirme le bon fonctionnement du contrôleur qui régule la température de l'air en variant le débit de l'eau en fonction des températures de l'eau du réservoir de stockage, la température désirée de l'air et sa température d'entrée.

Les simulations pour trois jours consécutifs en hiver (figure V.13), montrent l'important rôle du système de stockage puisque le processus de traitement se déroule dans de bonnes conditions. Nous remarquons aussi l'efficacité de la présence du système de stockage dans le fonctionnement estival (figures V.14 et V.15). En effet, nous pouvons exploiter le séchoir quotidiennement en pratiquant deux shifts au lieu d'un seul.

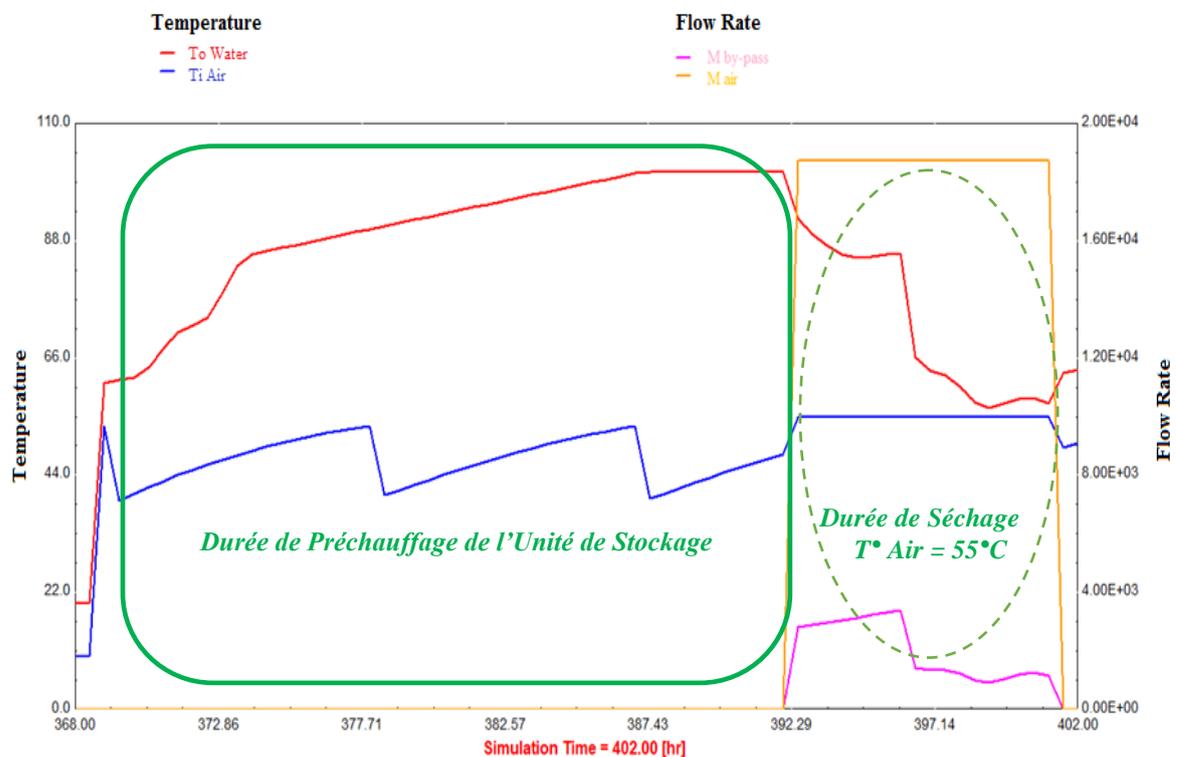


Figure -V. 12- Températures d'entrée de l'eau et de sortie de l'air avec les débits correspondants dans l'échangeur de chaleur eau/air en hiver pendant une seule journée

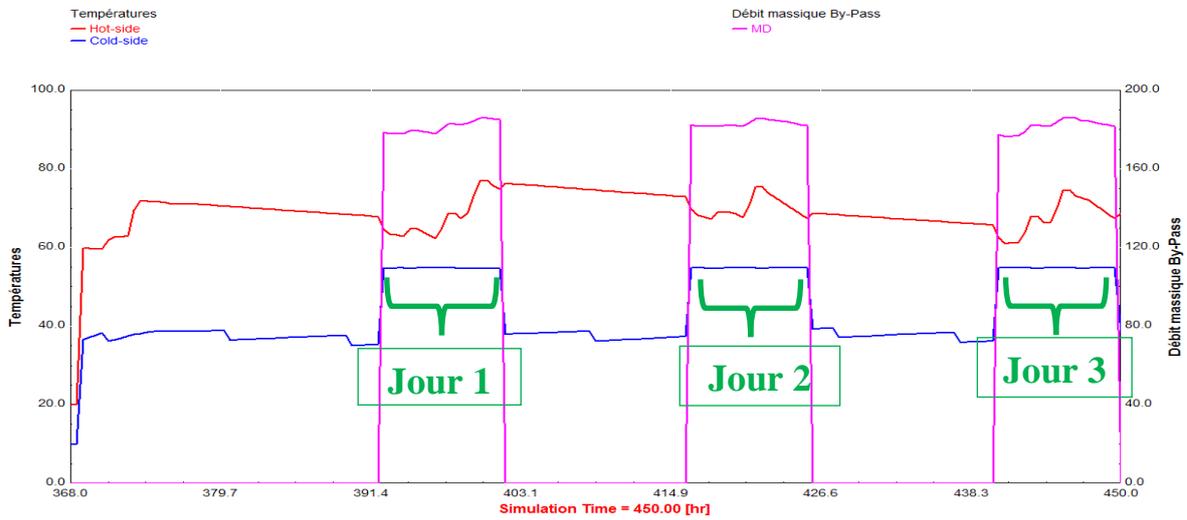


Figure -V. 13- Température d'entrée et de sortie de l'échangeur de chaleur eau/air en hiver pendant trois jours successifs

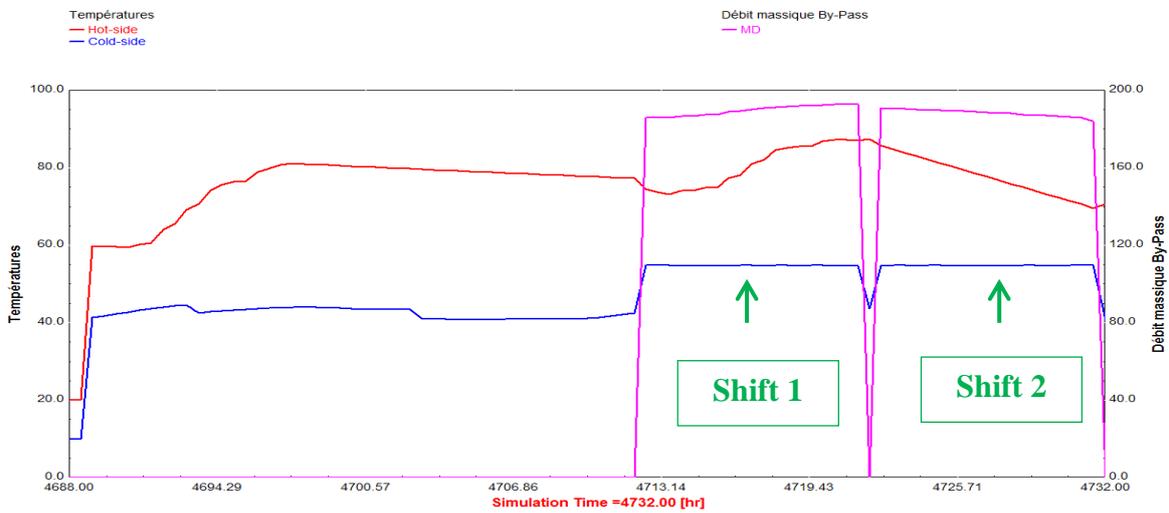


Figure -V. 14- Température d'entrée et de sortie de l'échangeur de chaleur eau/air en été pendant une seule journée

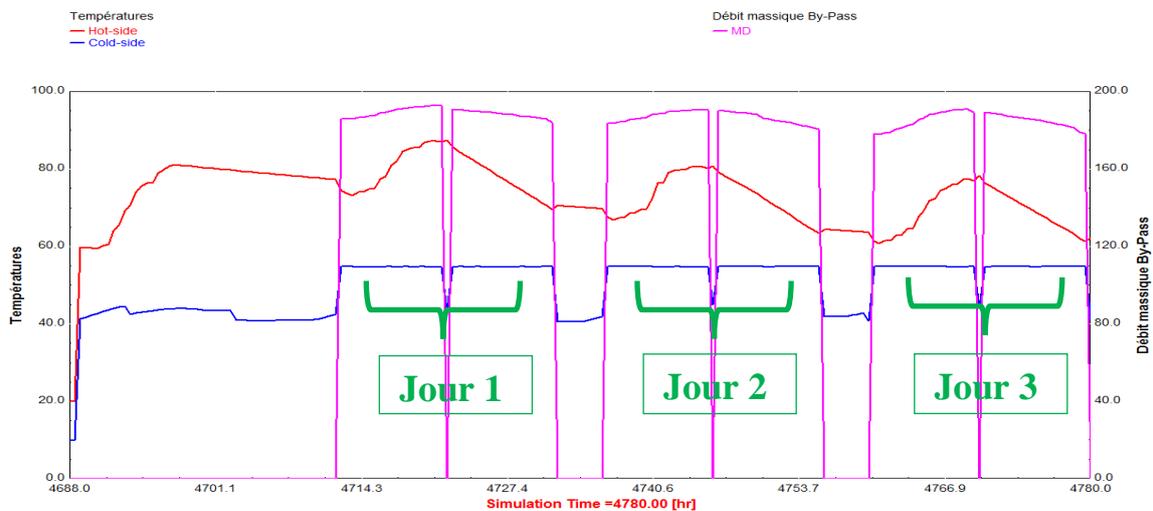


Figure -V. 15- Température d'entrée et de sortie de l'échangeur de chaleur eau/air en été pour trois jours successifs



Les résultats des simulations TRNSYS, en tenant compte des jours de repos imposés par l'industrie Tunisienne, sont présentés pour une année entière (figure V.16) et pour une semaine estivale et une autre hivernale (figures V.17 et V.18), nous remarquons, que pendant l'été, le processus de séchage se déroule dans les bonnes conditions, c'est-à-dire que la température de l'air de séchage est maintenue à la température désirée pendant toutes les périodes de séchage. Alors qu'en hiver, cette température varie légèrement à cause du faible rayonnement et de l'importante fluctuation solaire pendant cette saison, mais la variation de la température de séchage reste faible et ne dépasse pas les 5 °C.

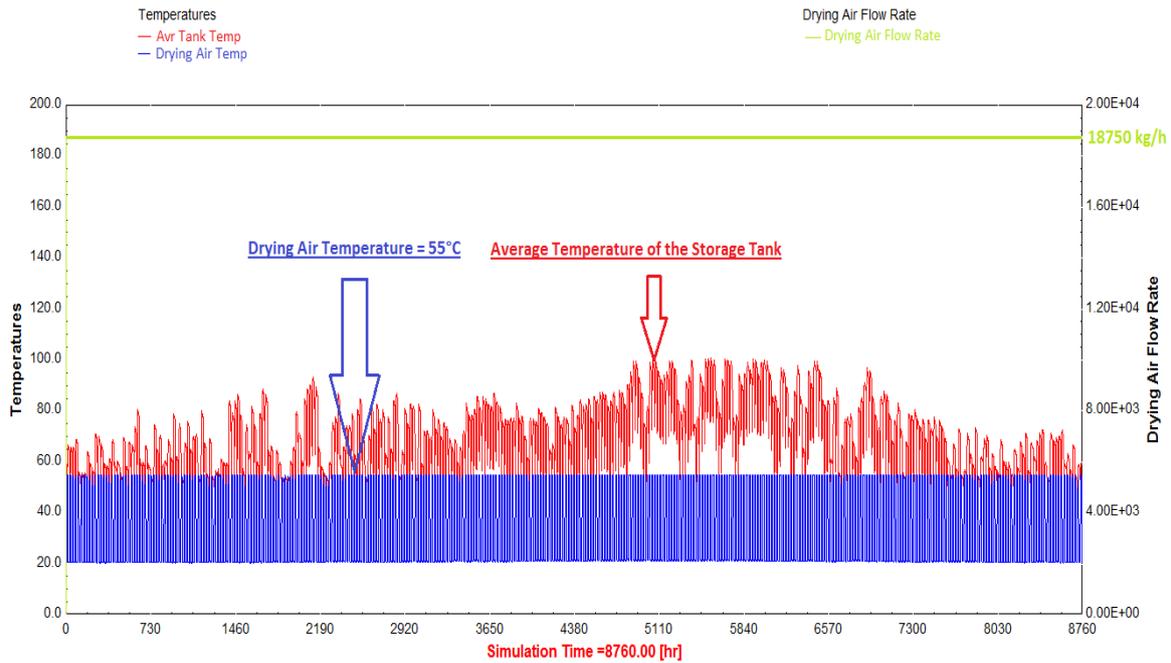


Figure -V. 16- Performances Thermiques du séchoir solaire pour une année typique

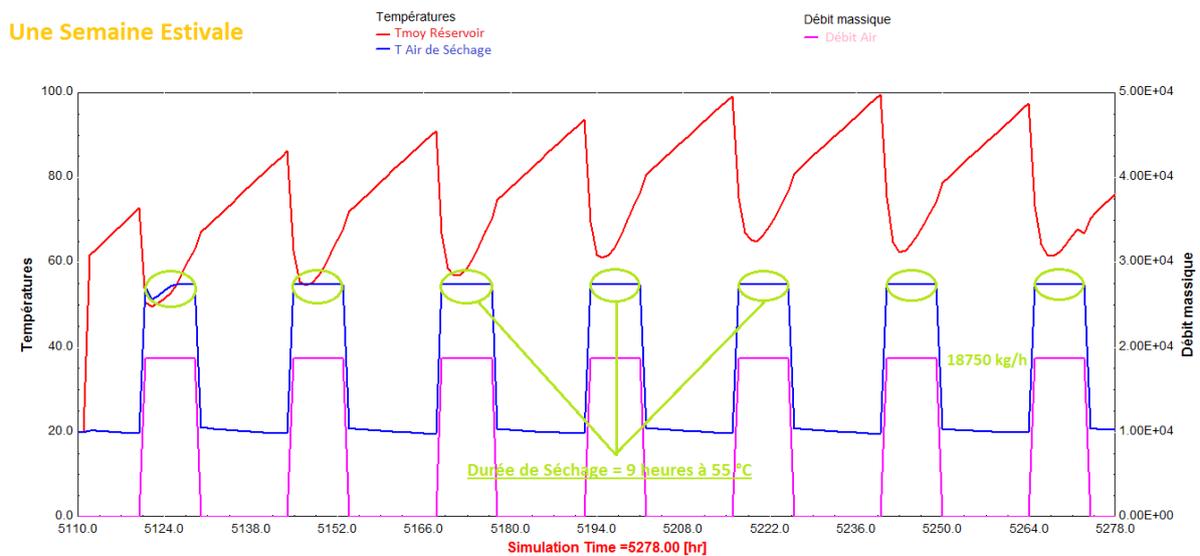


Figure -V. 17- Températures de l'eau de stockage, température et débit de l'air de séchage dans l'échangeur de chaleur pour une semaine estivale (Température de l'air de consigne = 55°C)



### Une Semaine Hivernale

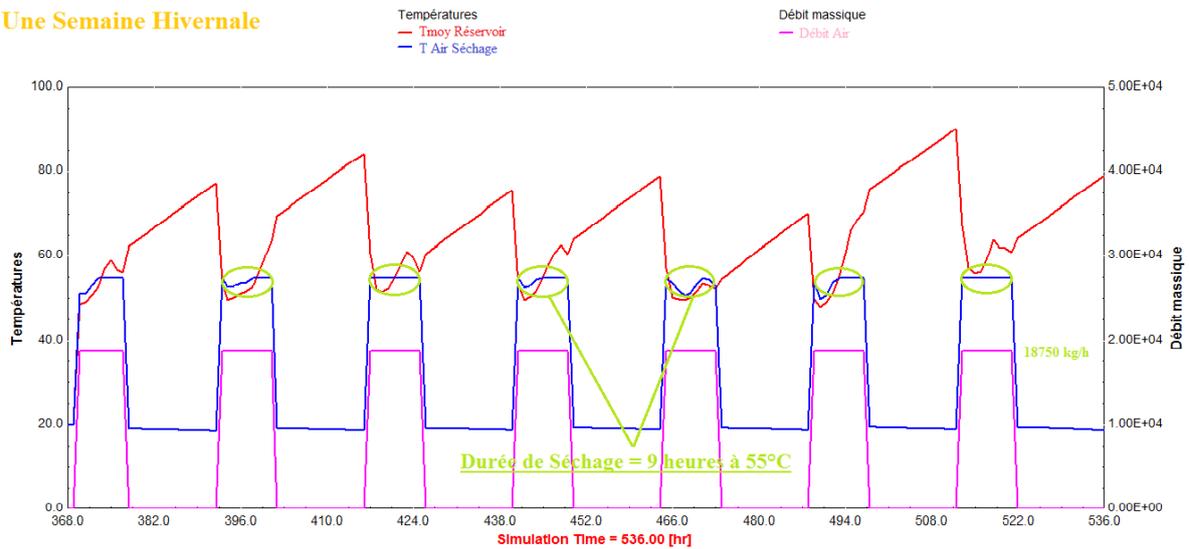


Figure -V. 18- Températures de l'eau de stockage, température et débit de l'air de séchage dans l'échangeur de chaleur pour une semaine hivernale (Température de l'air de consigne = 55°C)

## V.4 Conclusion

Dans ce chapitre, une cinétique de séchage expérimentale des tomates a été utilisée pour déterminer le temps de séchage et les propriétés de l'air de séchage. Les résultats sont ensuite utilisés pour simuler le comportement thermodynamique du système de séchage solaire complet.

Afin d'évaluer les différentes alternatives de conception puis dimensionner et optimiser le séchoir solaire, des simulations thermodynamiques de l'ensemble du système, y compris la cellule de séchage, les capteurs solaires, le réservoir de stockage de l'énergie thermique, l'échangeur de chaleur eau-air et le mélangeur à renouvellement d'air, ont été effectuées en utilisant le logiciel TRNSYS, en démontrant la faisabilité du concept.



## *Chapitre VI*

### *Simulation et Optimisation du Séchoir Solaire pour Tomates*



# *Chapitre VI :*

## *Simulation et Optimisation du Séchoir Solaire pour Tomates*

### **VI.1 Introduction**

Ce chapitre est consacré à l'estimation et l'optimisation de la surface de captation et du volume de l'eau de stockage thermique pour fournir l'énergie thermique nécessaire au processus de séchage solaire des tomates, suivi d'une analyse de sensibilité de ses paramètres. L'étude sera faite pour le séchage de 315 kg des tomates fraîches, soit la capacité des séchoirs du partenaire industriel du PRF.

### **VI.2 Optimisation du Séchoir Solaire pour les Tomates**

Bien que le flux rayonné par le Soleil est relativement constant, l'intensité solaire à la surface de la Terre en un lieu donné varie considérablement, notamment saisonnièrement. Pour cette raison, dans le but d'optimiser le séchoir solaire et éviter son surdimensionnement, et afin de minimiser l'investissement initial tout en assurant la couverture la plus large des besoins de séchage, nous avons étudié la surface de captation et le volume de stockage en fonction des paramètres atmosphériques.

Les figures VI.1 et VI.2 montrent respectivement la surface de capteurs solaires requise et le volume du réservoir de stockage requis pour les différents mois de l'année, en se basant sur la notion d'une journée type pour chaque mois, pour un séchoir fonctionnant avec les conditions climatiques de Tunis. Les dimensions des composants du séchoir sont ajustées de manière itérative jusqu'à ce que la configuration obtenue fournisse le débit d'air requis à la température souhaitée tout au long du processus de séchage.

On constate que la courbe de variation de la surface de captation présente deux paliers dont l'un est à 30 m<sup>2</sup> correspondant aux besoins de la saison estivale, et l'autre à 45 m<sup>2</sup> correspondant aux mois de février à mai. Si on choisit une installation avec des surfaces de captation de 30 m<sup>2</sup>, l'utilisation d'une énergie auxiliaire est nécessaire du mois d'octobre au



mois de mai. Par contre, pour une installation dont la surface de captation est de 45 m<sup>2</sup>, le recours au chauffage auxiliaire sera limité aux trois mois de décembre, janvier et février, cependant l'installation sera surdimensionnée pour les besoins des mois de juin à octobre.

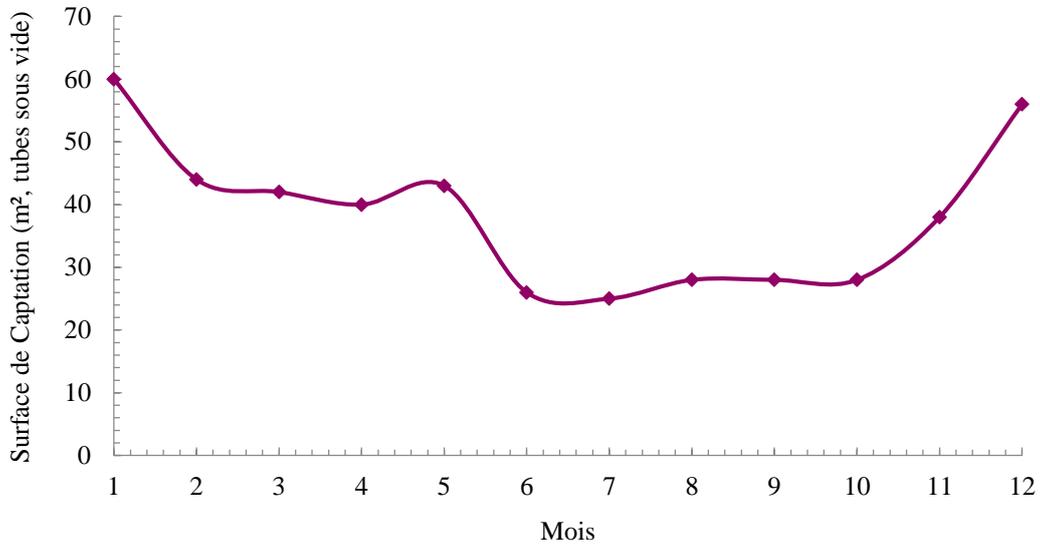


Figure -VI. 1- Variations mensuelles de la surface de captation

La courbe de variation du volume du réservoir de stockage (figure VI.2) suit un profil similaire à celui de la surface de captation avec un rapport presque constant du volume du réservoir de stockage et la surface de captation de 80 litres/m<sup>2</sup> (figure VI.3). C'est une valeur qui indique le bon dimensionnement du séchoir puisqu'elle est dans les normes de la littérature des systèmes solaires [45, 87].

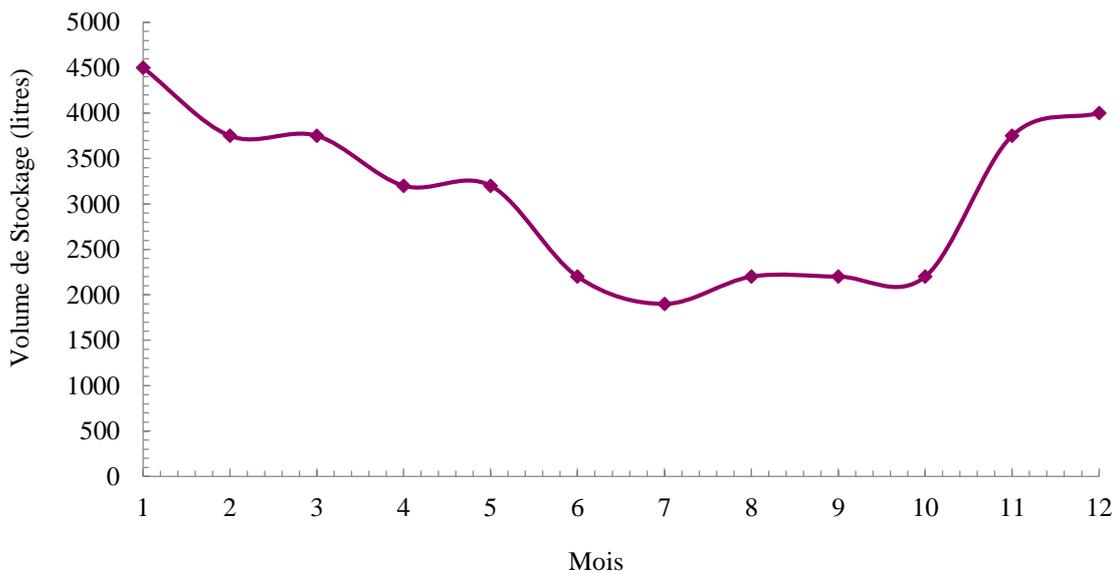
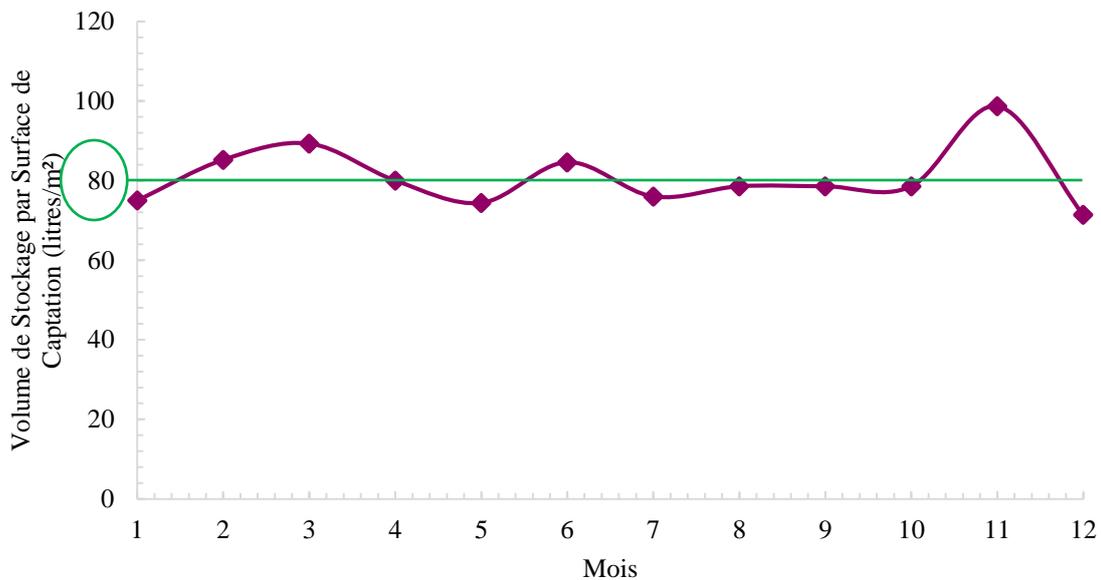


Figure -VI. 2 Variations mensuelles du volume de stockage



**Figure -VI. 3- Variations mensuelles du rapport entre le volume de stockage et la surface de captation**

Nous devons faire le choix entre ces deux alternatives de dimensionnement en se basant sur le critère du coût d'investissement et opérationnel en supposant l'énergie auxiliaire est produite par la combustion du Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL), actuellement employé par le partenaire industriel. Une évaluation très sommaire du temps de retour sur investissement est faite dans les deux cas, basée sur les prix de 2017 en Tunisie.

Si on utilise 45 m<sup>2</sup> de surface de captation, les besoins énergétiques du séchoir sont couverts par les capteurs solaires de février à novembre. En prenant comme référence une production de la chaleur requise par combustion du GPL, on obtient un temps de retour sur investissement de 8 ans pour les 45 m<sup>2</sup> de capteurs. Pour ce cas, la source d'énergie auxiliaire n'est nécessaire que de décembre à janvier avec une consommation de 95 kg de GPL et un coût correspondant de 131 DT/an. Si nous considérons de couvrir l'ensemble des besoins à travers l'énergie solaire, c'est-à-dire en utilisant 60 m<sup>2</sup> de capteurs solaires, le temps de retour pour les 15 m<sup>2</sup> supplémentaires sera 91 ans.

Des calculs similaires ont été effectués pour une surface de captation de 30 m<sup>2</sup>. Dans ce cas, une source d'énergie auxiliaire est nécessaire du mois de novembre au mois de mai, consommant 430 kg de GPL et coûtant 590 DT / an. Le temps de retour pour les 30 m<sup>2</sup> est de 6 ans. Tandis que le temps de retour des 30 m<sup>2</sup> supplémentaires nécessaires pour couvrir l'ensemble des besoins grâce à l'énergie solaire est 40 ans.

Compte tenu des résultats obtenus, il est recommandé d'utiliser des capteurs de type tubes sous vide de 45 m<sup>2</sup> avec un réservoir de stockage stratifié à deux niveaux de 3 600 litres pour le stockage de l'énergie thermique et d'ajouter une source d'énergie auxiliaire au GPL.



### VI.3 Etude Paramétrique du séchoir

#### VI.3.1 Etude de l'effet de la couverture du ciel sur la température de l'air de séchage

Le logiciel de simulation thermodynamique TRNSYS comprend de nombreux composants permettant de tester et de s'assurer du bon fonctionnement d'un modèle développé. Dans notre cas, nous voulons effectuer des simulations du séchoir solaire lorsque le ciel est couvert pour une certaine période, ceci est possible avec le type 68 (ShadingMasks) (figure VI.4) qui crée une atténuation du rayonnement solaire incident.

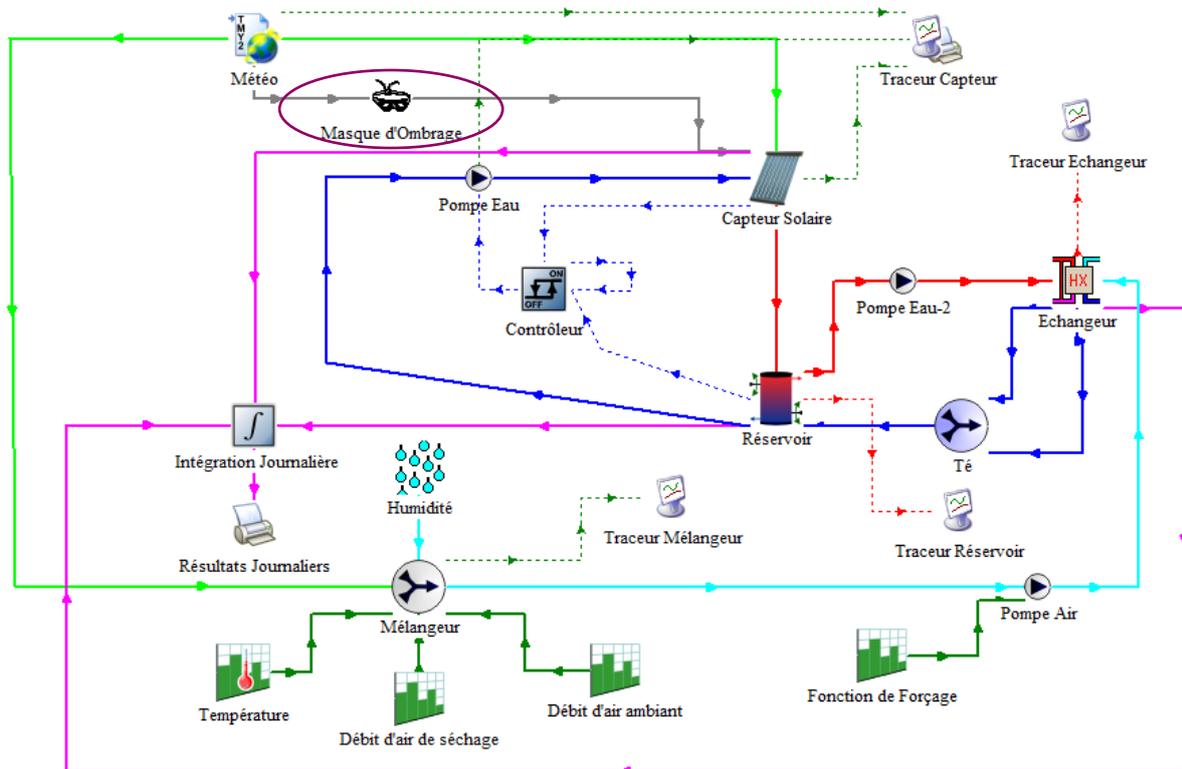


Figure -VI. 4-Modèle TRNSYS du séchoir solaire sans ensoleillement

Une comparaison du comportement du séchoir solaire avec et sans ensoleillement est présentée dans les figures VI.5, 6, 7 et 8 pendant les deux saisons hiver et été. Sous TRNSYS, le composant responsable de la couverture du ciel masque le rayonnement solaire incident le troisième jour du fonctionnement du séchoir.

Nous remarquons que l'effet de cette couverture du ciel sur la température de l'air de séchage (représentée par la courbe en bleu) est essentiellement négligeable surtout en été.

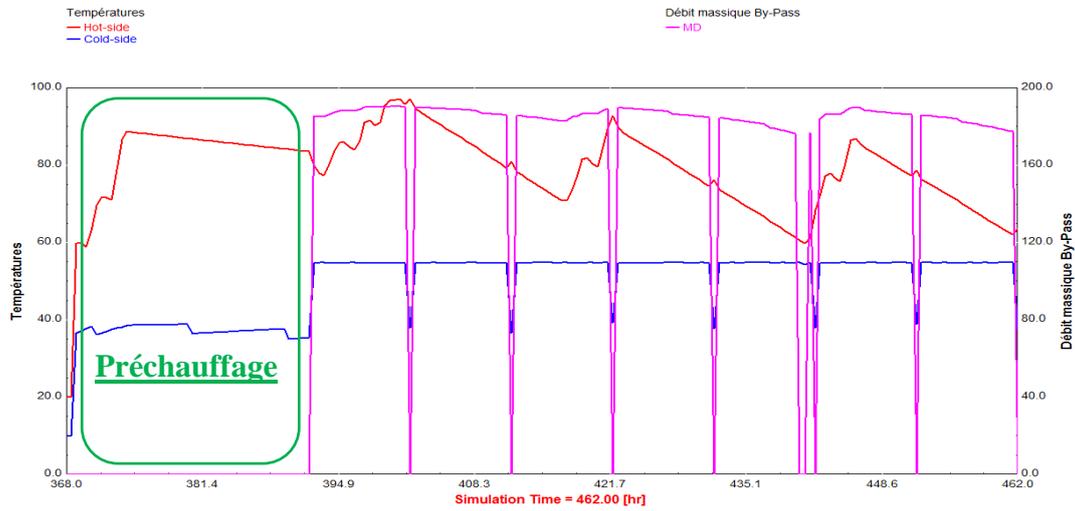


Figure -VI. 5-Température d'entrée et de sortie de l'échangeur de chaleur eau/air en hiver avec ensoleillement sans couverture du ciel.

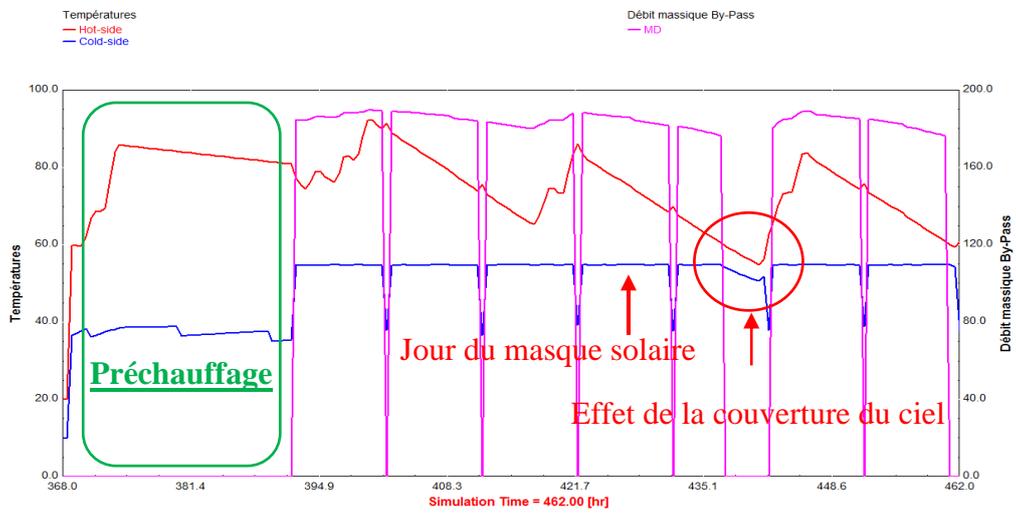
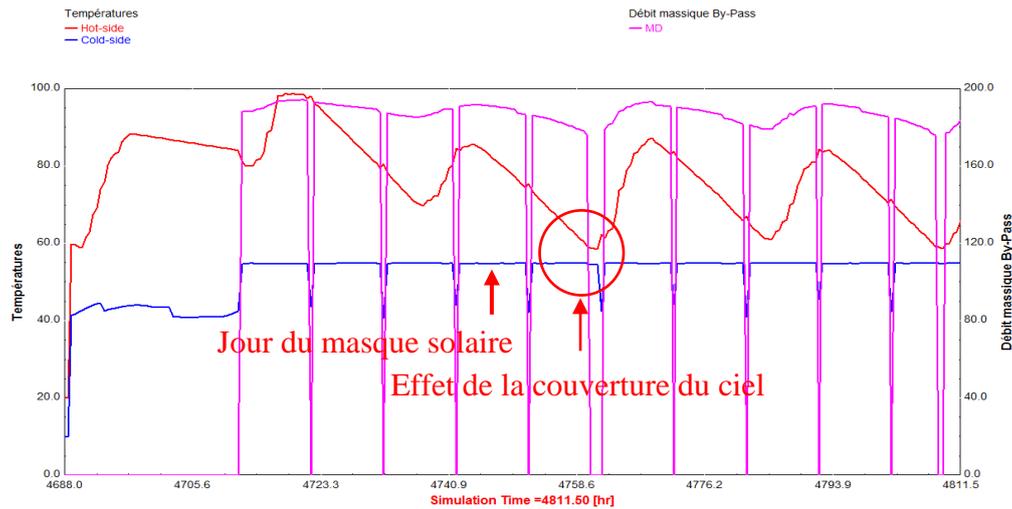


Figure -VI. 6- Température d'entrée et de sortie de l'échangeur de chaleur eau/air en hiver avec une couverture du ciel



Figure -VI. 7- Température d'entrée et de sortie de l'échangeur de chaleur eau/air en été avec ensoleillement sans couverture du ciel



**Figure -VI. 8- Température d'entrée et de sortie de l'échangeur de chaleur eau/air en été avec couverture du ciel**

Par contre, au niveau de l'eau de stockage (représentée par la courbe en rouge), nous observons mieux l'effet de la couverture du ciel sur les panneaux solaires. En effet, le système est sur le point de ne pas satisfaire les besoins de transfert de chaleur entre l'eau et l'air car la décharge du réservoir de stockage a fait baisser la température de ce dernier en dessous de la température minimale souhaitée. Mais, ce qui est intéressant à noter c'est que le système a été toujours en sécurité puisque les besoins en séchage sont respectés.

Donc nous pouvons confirmer que, mêmes sous les conditions les plus extrêmes, notre installation solaire répond aux exigences du séchage industriel.

### VI.3.2 Etude de l'effet de la température de l'air de séchage sur les dimensions du séchoir

Dans cette partie de l'étude, nous voulons tester le comportement du système solaire face à une variation du plus important paramètre qui est la température de l'air de séchage. La valeur de ce paramètre varie dans le domaine de séchage selon la nature du produit à sécher. Pour les tomates, nous trouvons dans la littérature [40] que les valeurs de la température de l'air asséchant, dans la plupart des industries, sont 45, 55 et 65°C.

Pour cela, nous avons effectué des simulations sur TRNSYS avec chacune de ces valeurs de température de séchage (tableau VI.1) en comparant leur effet sur la surface de captation en particulier et sur le dimensionnement du séchoir en général.



**Tableau - VI -1 : Différentes dimensions des séchoirs en fonction de la température de l'air de séchage**

Température de l'air de séchage (°C)	Durée de séchage (heures)	Surface de Captation (m <sup>2</sup> )	Volume de stockage (litres)
45	16	70	6000
55	9	60	5000
65	7	50	4000

Le tableau VI.1 montre que la durée du séchage des tomates est influencée de façon significative par la température de l'air de séchage, elle diminue avec l'augmentation de cette température.

Le même effet est noté pour la surface de captation et le volume de stockage. En effet, lorsque la température de l'air de séchage augmente, ces deux facteurs subissent une baisse remarquable tout en gardant un rapport du volume de stockage et la surface de captation aux alentours des 80 l/m<sup>2</sup>.

A partir de ce résultat, on peut tirer comme constat que l'influence de la durée de séchage des tomates est très considérable sur les dimensions des unités pertinentes de l'installation solaire de séchage. En effet, lorsque la durée du séchage est importante par rapport à la durée de l'ensoleillement, nous devons investir plus dans le stockage et bien évidemment dans la surface de captation pour stocker la chaleur pour les heures sans ensoleillement.

Les sections qui suivent nous permettent d'analyser de près la variation de ces résultats, et d'observer les effets saisonniers en fonction de la température de l'air sur le fonctionnement du séchoir et ses paramètres et d'optimiser, pour chaque cas d'étude, le dimensionnement proposé.

Les sections qui suivent nous permettent d'analyser de près la variation de ces résultats, et d'observer les effets saisonniers en fonction de la température de l'air sur le fonctionnement du séchoir et ses paramètres et d'optimiser, pour chaque cas d'étude, le dimensionnement proposé.

### **VI.3.2.1 Simulation du séchoir solaire pour une température de l'air 45°C**

Les simulations TRNSYS ont été effectuées en considérant une année typique, sous les mêmes conditions initiales de séchage sauf pour la température de l'air de consigne qui est de 45°C.

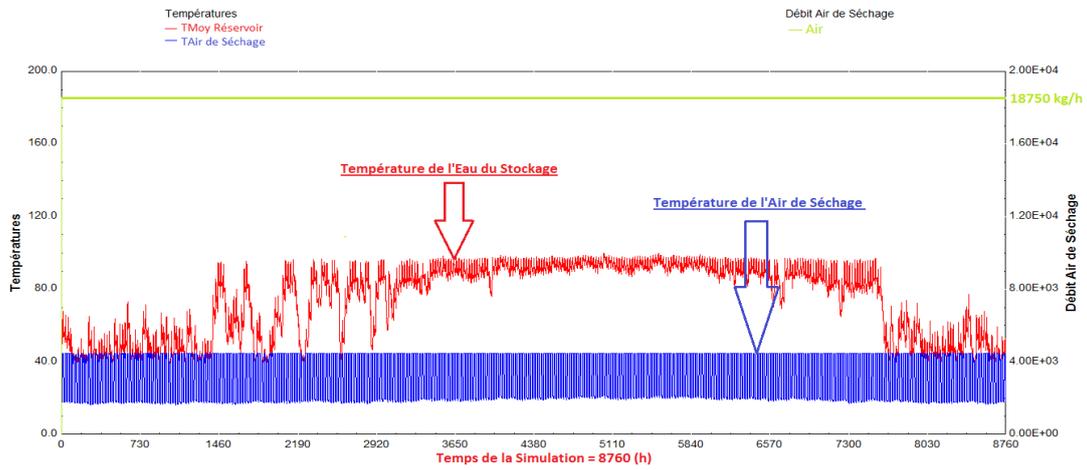


Figure -VI. 9- Températures de l'eau de stockage, température et débit de l'air de séchage dans l'échangeur de chaleur pour toute l'année (Température de l'air de consigne = 45°C)

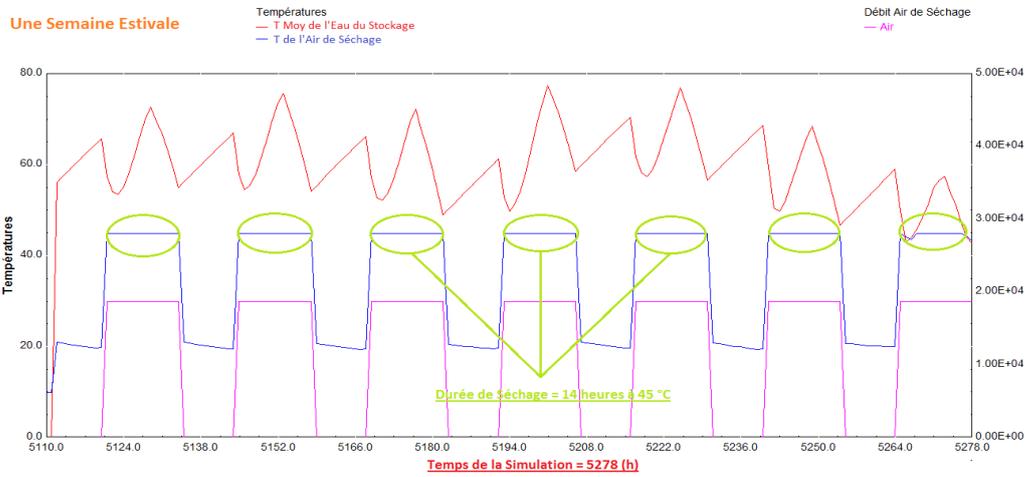


Figure -VI. 10- Températures de l'eau de stockage, température et débit de l'air de séchage dans l'échangeur de chaleur pour une semaine estivale (Température de l'air de consigne = 45°C)

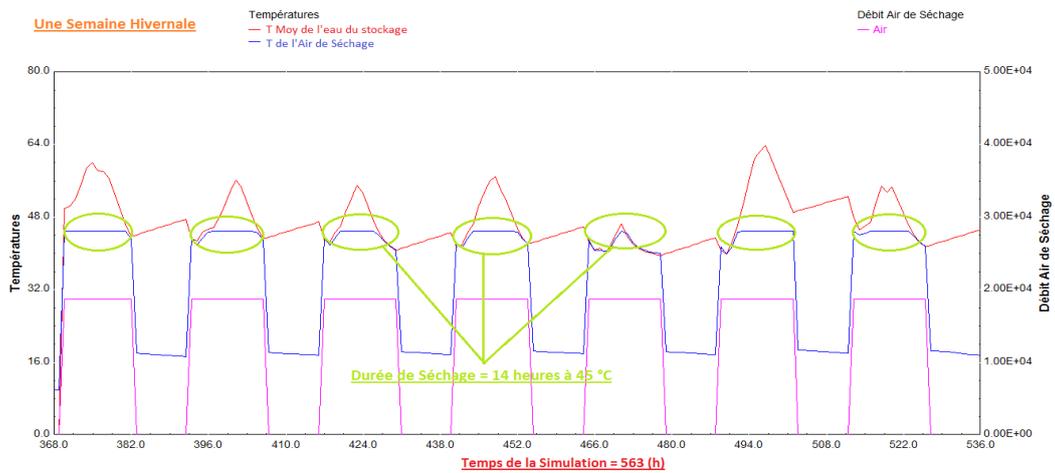


Figure -VI. 11- Températures de l'eau de stockage, température et débit de l'air de séchage dans l'échangeur de chaleur pour une semaine hivernale (Température de l'air de consigne = 45°C)



D'après les figures VI.9, 10 et 11, le séchoir solaire, avec les dimensions correspondantes du tableau VI.1, est toujours capable de fournir les conditions nécessaires au bon déroulement du processus de séchage des tomates même lorsqu'il fonctionne avec une température de l'air de séchage de 45°C.

Vue que la durée de séchage des tomates avec une température de l'air de séchage de 45 °C est de 14 heures et elle dépasse toujours la durée de l'ensoleillement, la surface de captation et le volume de stockage sont importants. Leurs valeurs ont été obtenues par simulations pour des journées représentatives de chaque mois de l'année (figures VI.12 et 13). On peut voir qu'il faut une surface de captation de 50 m<sup>2</sup> et 4600 litres d'eau de stockage pour couvrir les besoins de la saison estivale, et dans ce cas, l'utilisation d'une énergie auxiliaire est nécessaire du mois de décembre au mois de mai. Sinon, sans le recours au chauffage auxiliaire, on aura besoin d'une surface de captation de 85 m<sup>2</sup> et un volume de stockage d'eau chaude de 7500 litres.

Dans les deux cas, le séchoir solaire sera très coûteux et ne satisfait pas les objectifs du PRF car les petites entreprises ne pourront pas accéder à un séchoir à énergie « propre » et à faible coût.

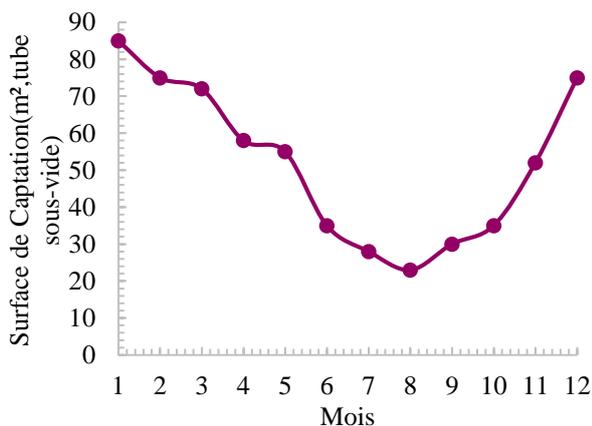


Figure -VI. 12- Variations mensuelles de la surface de captation (Température de l'air de consigne = 45°C)

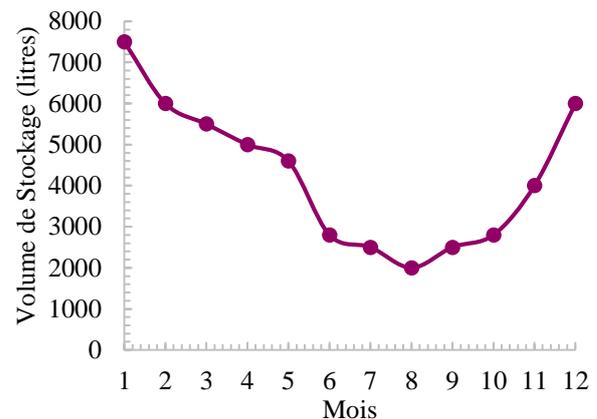


Figure -VI. 13- Variations mensuelles du volume de stockage (Température de l'air de consigne 45°C)

### VI.3.2.2 Simulation du séchoir solaire pour une température de l'air 65°C

Pour une température de l'air de séchage de 65°C, nous observons le même comportement thermodynamique du séchoir solaire, la courbe représentant la température de l'air de séchage (la courbe en bleu), est toujours constante et égale à la valeur désirée tout le long du processus de séchage des tomates pour une année entière (figure VI.14), pour une semaine estivale (figure VI.15) et pour une semaine hivernale (VI.16). En hiver, la petite variation de cette température, qui est aux alentours de 5°C, est due essentiellement au faible rayonnement et à l'importante fluctuation solaire pendant cette saison. Nous remarquons que cette variation



peut se présenter pendant les sept heures de travail, ou un autre jour, pendant quelques heures du temps de travail seulement. Dans ce cas, il faut éviter de travailler lors des journées à faible ensoleillement.

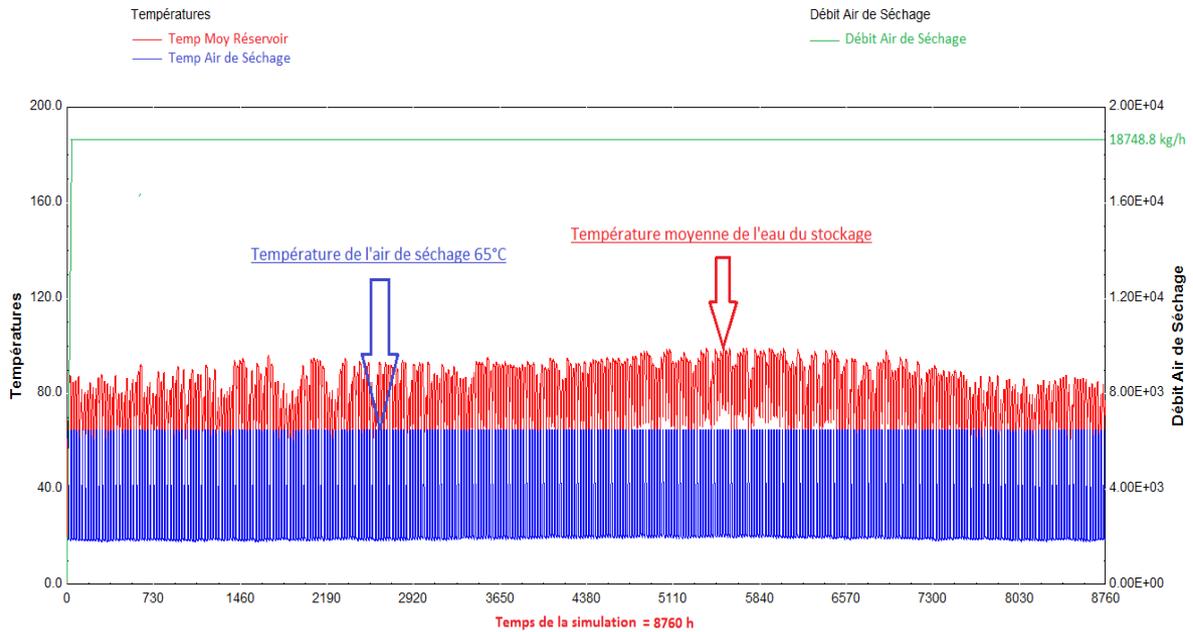


Figure -VI. 14- Températures de l'eau de stockage, température et débit de l'air de séchage dans l'échangeur de chaleur pour toute l'année (Température de l'air de consigne = 65°C)

Une Semaine Estivale

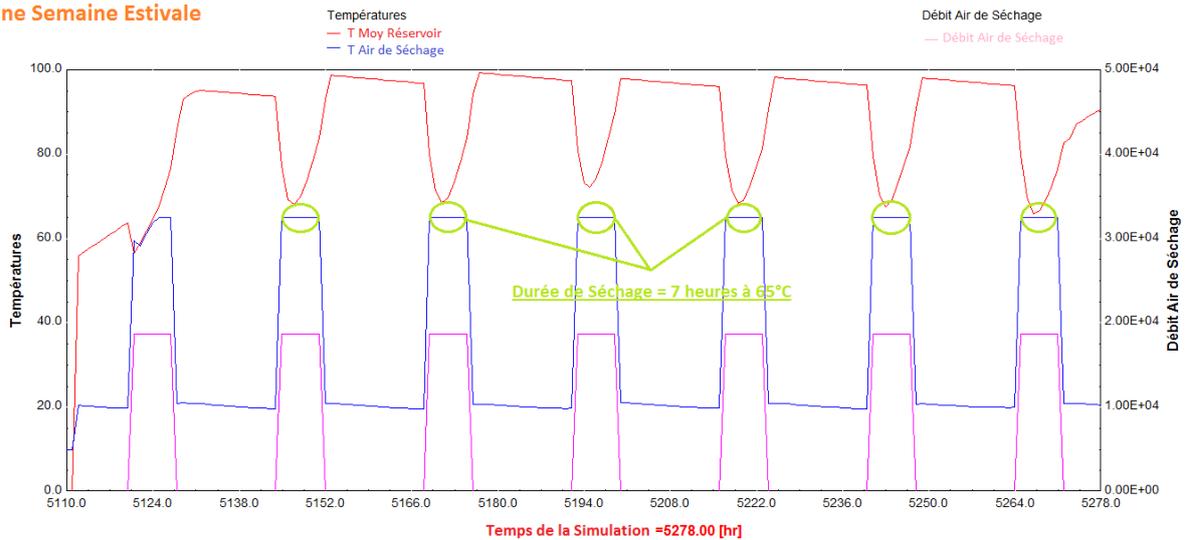
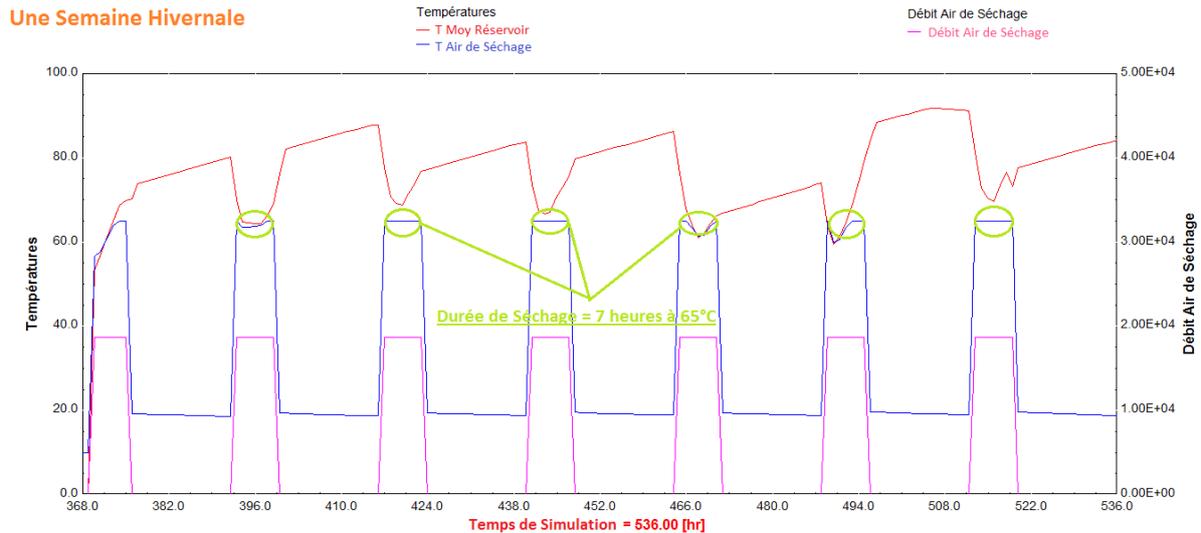


Figure -VI. 15- Températures de l'eau de stockage, température et débit de l'air de séchage dans l'échangeur de chaleur pour une semaine estivale (Température de l'air de consigne = 65°C)



**Figure -VI. 16- Températures de l'eau de stockage, température et débit de l'air de séchage dans l'échangeur de chaleur pour une semaine hivernale (Température de l'air de consigne = 65°C)**

Les figures VI.17 et VI.18 montrent respectivement la surface de capteurs solaires requis et le volume de réservoir de stockage requis pour les différents mois de l'année. On constate que 30 m<sup>2</sup> peuvent couvrir les besoins de la saison estivale, et dans ce cas, l'utilisation de l'énergie auxiliaire (le GPL) est nécessaire du mois de novembre au mois de mars. Une surface de captation de 50 m<sup>2</sup> est nécessaire si on ne veut pas avoir recours au chauffage auxiliaire.

La courbe du volume du réservoir de stockage suit une variation similaire avec un rapport presque constant du volume du réservoir à la surface du collecteur de 80 l/m<sup>2</sup>.

Dans le cadre de l'optimisation de l'investissement initial, on peut dimensionner le séchoir solaire pour une utilisation à pleine capacité en été et l'employer pour une plus petite quantité les autres saisons sans avoir à recourir à l'appoint en GPL. Une autre alternative serait de sécher d'autres denrées en hors saison des tomates. L'idée est que l'investissement initial dans l'installation solaire est amorti par le séchage des tomates l'été. Le reste de l'activité n'aura que le prix des produits frais comme dépenses. On devrait mener une étude technico-économique de ces propositions qui tient compte de la variation sur l'année de la demande de tomates séchées et autres produits, et de la disponibilité et des prix des tomates fraîches et autres denrées.

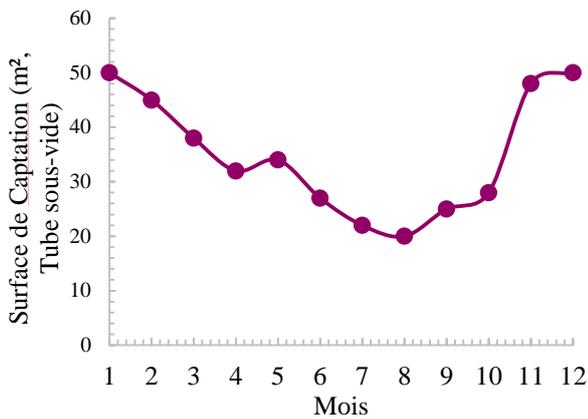


Figure -VI. 17- Variations mensuelles de la surface de captation (Température de l'air de consigne = 65°C)

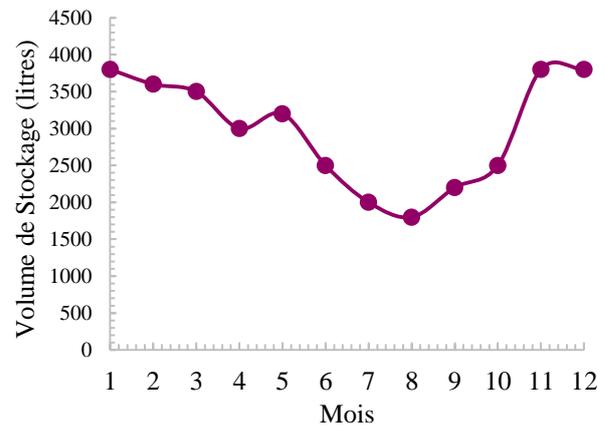


Figure -VI. 18- Variations mensuelles du volume de stockage (Température de l'air de consigne 65°C)

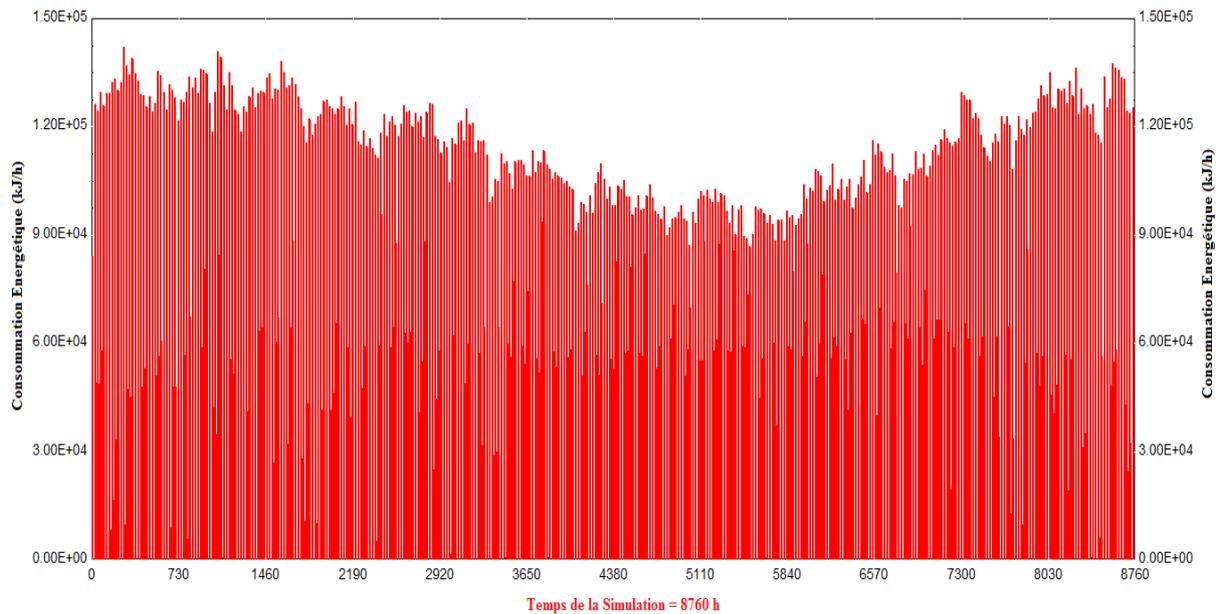
#### VI.4 Comparaison entre le Séchoir Solaire et le Brûleur à Gaz

Dans cette section, on se propose de comparer les séchoirs solaire et à gaz. En ce qui concerne la protection des produits à sécher des mauvais effets des insectes, du vent et de la pluie, les deux types de séchoirs présentent les mêmes avantages et c'est pourquoi nous allons mener la comparaison en termes de consommation énergétique et d'impact environnemental.

Du point de vue réchauffement climatique, le Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) génère moins d'émissions de dioxyde de carbone que les combustibles traditionnels, il est non toxique, respecte l'environnement et l'un des carburants classiques les plus propres qui soient. En revanche, l'énergie solaire n'émet aucun gaz à effet de serre, c'est une énergie propre et renouvelable.

Dans le cas du séchoir d'AGRIFOOD, l'hybridation, en cas de nécessité, entre les deux sources d'énergie est facile. Ce qui nous permet de réduire considérablement les besoins en combustible fossile du séchage.

Les résultats des simulations, obtenus en utilisant le logiciel TRNSYS et présentées dans la figure VI.19, montrent que la consommation énergétique journalière moyenne pour sécher un lot de tomates (315 kg de tomates fraîches) est d'approximativement 14 kWh pour une journée typique de la période de maturation de ce produit (Juin, Juillet, Août). En considérant les rendements du brûleur et les pertes de chaleur (un rendement global de l'ordre de 20%), l'énergie consommée par la combustion du GPL pour une journée est donc de l'ordre de 17,5 kWh. Cette quantité de chaleur requiert 1,369 kg de GPL par jour, soit autour de 123,5 kg pour la saison de maturation des tomates. Considérant que la combustion d'un kg de GPL rejette 3,01 kg de CO<sub>2</sub> [88], on obtient une émission de 371,8 kg de CO<sub>2</sub> sur la saison de maturation des tomates.



**Figure -VI. 19- Energie requise annuelle du séchoir solaire pour les tomates**

L'utilisation de l'énergie solaire pour le séchage des tomates permet d'éviter la consommation de 123,5 kg de GPL sur la saison (0,435 kg de GPL par 100 kg de tomates fraîches) et l'émission de 371,8 kg de CO<sub>2</sub> sur la saison (1,308 kg de CO<sub>2</sub> par 100 kg de tomates fraîches). L'attrait de l'énergie solaire est évident du point de vue économie d'énergie et réduction de l'impact négatif sur l'environnement.

## VI.5 Conclusion

Les résultats des simulations obtenus dans ce chapitre, ont permis d'étudier le déroulement du processus de séchage au cours d'une année typique, de prouver la faisabilité technique du concept, d'optimiser la conception et de dimensionner les différents composants du séchoir solaire pour les tomates.

L'optimisation des dimensions du système a montré que pour sécher 315 kg de tomates fraîches, un champ de capteurs solaires de type tubes sous vide de 30 m<sup>2</sup> est recommandé avec un réservoir de stockage de l'énergie thermique à deux degrés de stratification de capacité 2000 litres et une source d'énergie auxiliaire est nécessaire du mois de novembre au mois de mai.

La mise en place du séchoir solaire est située à l'usine du partenaire industriel du PRF : AGRIFOOD à Haouaria qui a réservé une de ses chambres de séchage (la chambre B) pour le montage de l'installation.



## *Chapitre VII*

### *Présentation du Séchoir Solaire pour Tomates*



# Chapitre VII :

## Présentation du Séchoir Solaire pour Tomates

### VII.1 Introduction

Les résultats expérimentaux et numériques ont permis le dimensionnement et la conception du séchoir solaire pour les tomates qui a été installé à l'usine du partenaire industriel du Programme de Recherche Fédérée (PRF), AGRIFOOD à Haouaria. Les détails de la mise en place du séchoir solaire ont été aussi présentés dans ce chapitre.

Le choix des éléments de ce séchoir et ses caractéristiques et dimensions a été présenté au chapitre VI. La sélection d'éléments de régulations et autres composants de protection a été assisté par l'équipe de l'entreprise AES.

### VII.1 Emplacement et Schéma de l'Installation

L'emplacement du séchoir solaire pour les tomates a les coordonnées géographiques suivantes : altitude : 174 m par rapport au niveau de la mer, longitude :  $10^{\circ}54'59.10''E$  et latitude :  $37^{\circ}1'8.21''N$  correspondantes à celles d'AGRIFOOD (figure VII.1). La climatologie du lieu est définie par une température ambiante de 6 à  $33^{\circ}C$  et une humidité relative de 75 % [2].



Figure -VII. 1- Coordonnées géographiques du site du projet PRF

Le séchoir solaire est composé d'un champ solaire d'une surface de captation de  $32\text{ m}^2$ , orienté vers le sud et placé sur le toit de l'usine AGRIFOOD avec une inclinaison de  $6^{\circ}$ , et



relié à un réservoir de stockage à deux degrés de stratification de 2500 litres de volume. La chambre de séchage correspond à la chambre B d'AGRIFOOD, au-dessus de laquelle, l'unité de traitement de l'air et le vase d'expansion ont été fixés. Elle est munie d'armoires de contrôle. Le débit massique de l'air traversant la chambre de séchage est de 18750 kg/h.

## VII.2 Détails de Conception du Séchoir Solaire pour Tomates sur le Site d'Implantation (AGRIFOOD, Haouaria, Tunisie)

Un prototype du séchoir solaire pour tomates, conçu et dimensionné comme décrit au Chapitre IV, a été installé à l'usine du partenaire industriel, AGRIFOOD, à Haouaria (figure VII.2). L'installation est composée de deux boucles, une d'air et l'autre d'eau [88]. La boucle d'air comporte un échangeur de chaleur air-eau, qui relie les deux boucles, un mélangeur d'air et la chambre de séchage (figure VII.3). Cette dernière est présentée en différentes vues dans la figure VII.4. Il s'agit d'une chambre (chambre B) qui existe à l'usine AGRIFOOD et qu'on a décidé de garder. Cette chambre est munie d'un brûleur au GPL et est actuellement employée pour le séchage des tomates. Elle sera équipée, en plus, d'une installation solaire pour un fonctionnement hybride à l'énergie solaire et au GPL.



Figure -VII. 2- Plaque du projet PRF

### Chambre de Séchage des Tomates AGRIFOOD, HAWARIA, TUNISIE

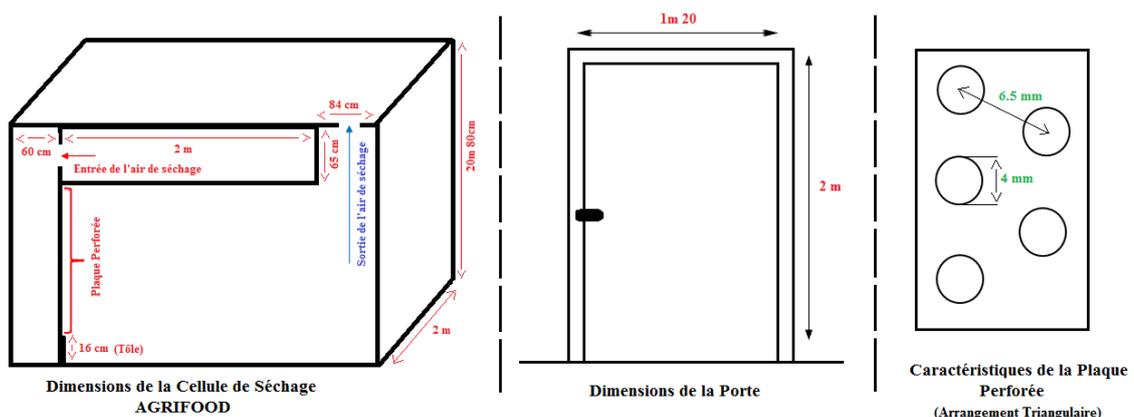


Figure -VII. 3-Dimensions de la chambre de séchage d'AGRIFOOD

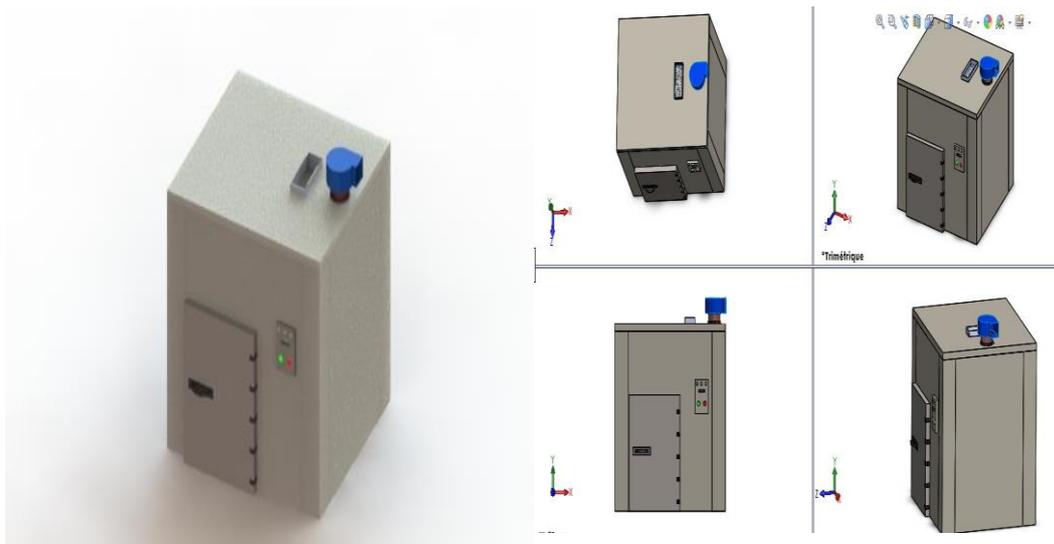


Figure -VII.4 -Chambre de séchage d'AGRIFOOD en différentes vue

La chambre contient trois chariots de vingt-cinq claies qui servent de support pour les 315 kg de tomates à sécher. Dans le sechoir actuel, l'air de séchage est chauffé à l'aide d'un brûleur au GPL avant de pénétrer la cellule en passant par une chambre de tranquillisation et une plaque perforée, servant à homogénéiser le soufflage à travers les claies (figures VII.6, VII.7, VII.8). Par la suite, l'air sort à travers un registre d'air suivi d'un ventilateur centrifuge afin de régler les proportions des débits à renouveler et à recycler (figure VII.5).

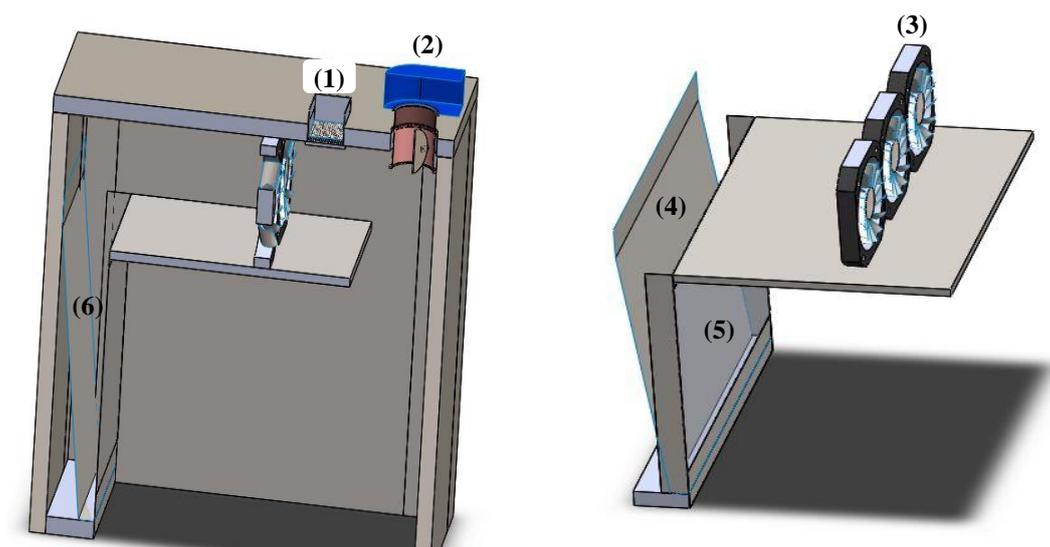


Figure -VII. 5-Equipements de l'intérieur de la chambre de séchage

- (1) Deux registres de plafond d'entrée de l'air de séchage (2) Un registre et un ventilateur centrifuge pour la sortie de l'air de séchage (3) Trois ventilateurs axiaux de soufflage (4) Tôle inclinée (5) Plaque perforée (6) Chambre de tranquillisation.

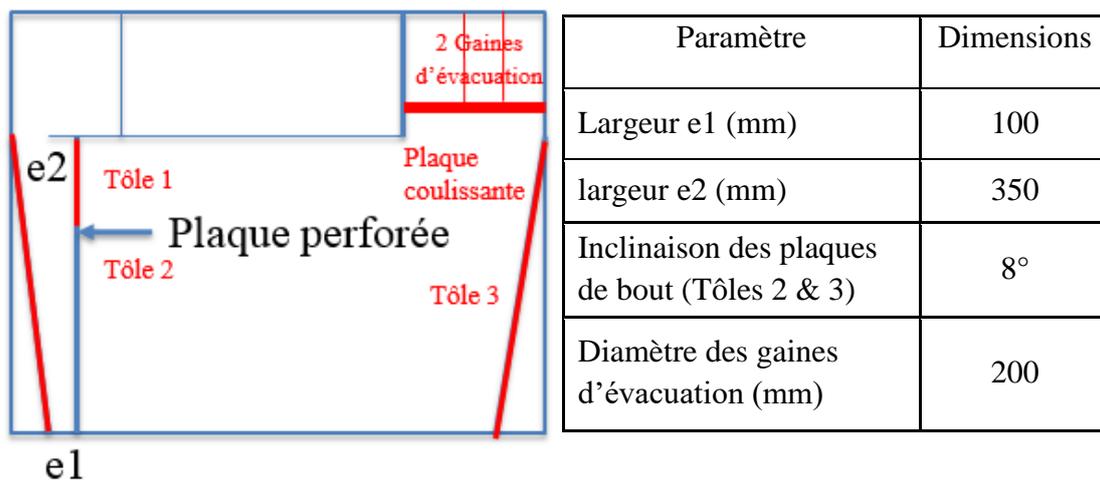


Figure -VII. 6-Modifications à apporter à la cellule de séchage

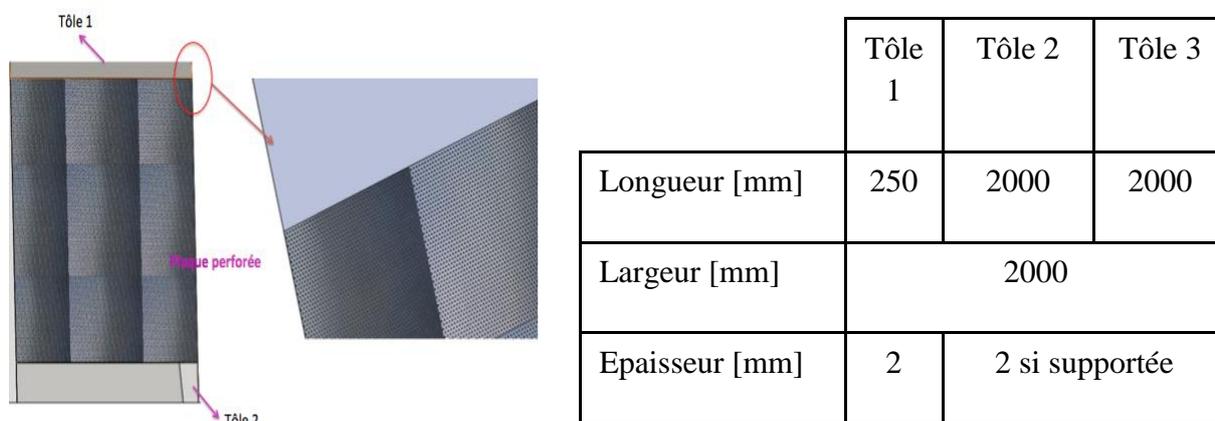


Figure -VII. 7-Tôle à mettre au-dessus de la partie supérieure de la plaque perforée existante

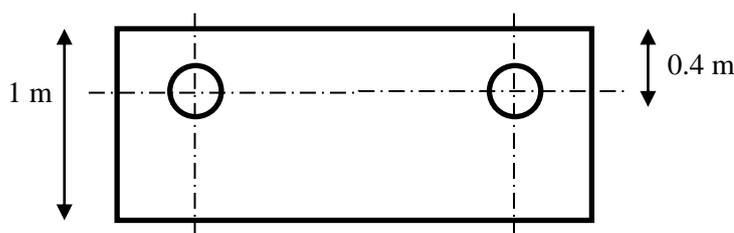


Figure -VII. 8-Plaques coulissantes (permettant de changer d'un fonctionnement au GPL à solaire)

Afin d'ajouter l'énergie solaire comme source de chaleur, une unité de traitement d'air sera ajoutée au réseau d'air. Pour gagner de l'espace, elle sera installée dans l'entretoits, au-dessus de la chambre de séchage, comme le montre la figure VII.9. Elle contient le mélangeur à renouvellement d'air, les filtres à air et l'échangeur de chaleur eau-air.

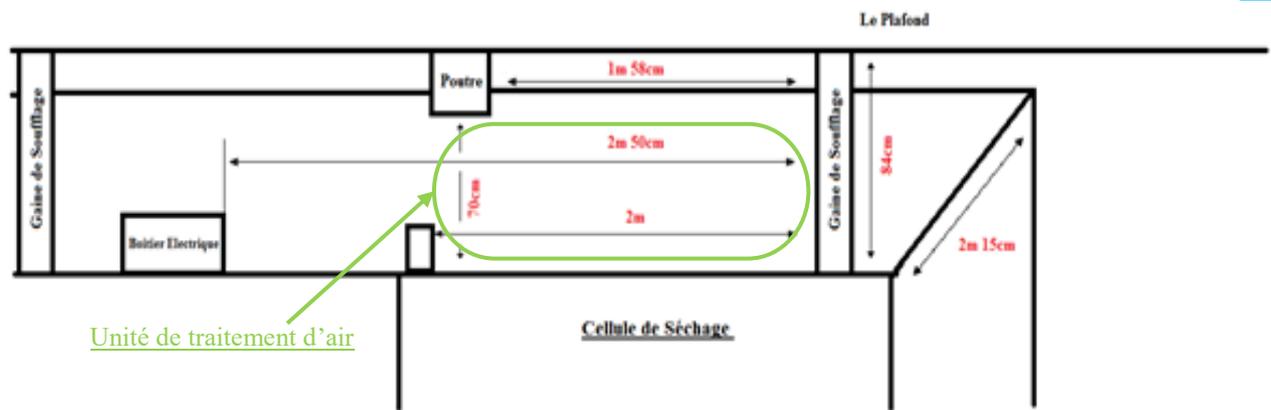


Figure -VII. 9- Emplacement de l'unité de traitement d'air

Le circuit d'eau, ainsi couplé, se compose principalement, d'un champ de capteurs solaires de type tubes sous-vide installé sur la charpente du toit de l'usine d'AGRIFOOD dans la direction sud, et d'un réservoir de stockage de l'énergie thermique dont l'emplacement est à côté du mur dans la direction nord du bâtiment comme montré dans la figure VII.10.

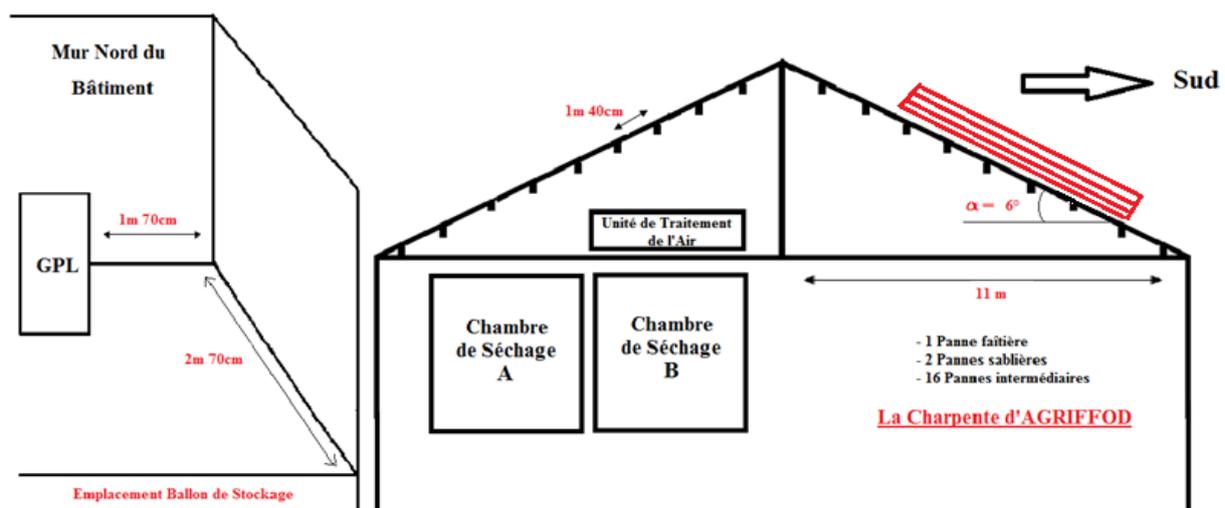


Figure -VII. 10-Emplacement du champ solaire et du ballon de stockage

Sur la base des calculs et des considérations particulières du site présentés ci haut, un cahier des charges techniques détaillé et complet, similaire à celui présenté à l'Annexe A, a été préparé pour faire partie de la consultation lancée par l'ANME et attribué à l'entreprise AES pour la construction du prototype.

### VII.3 Composition du Séchoir Solaire pour les Tomates

Le séchoir solaire a été installé par l'entreprise AES qui a gagné la consultation de construction, lancée par l'ANME. L'installation du séchoir est composée des éléments suivants (figure VII.11).



Figure -VII. 11- Le prototype du séchoir solaire pour les tomates (A) Schéma synoptique du prototype [86] (B) Le champ solaire (C) Le réservoir de stockage (D) L'unité de traitement de l'air (E) La chambre du traitement phytosanitaire (F) Chariot des tomates à l'intérieur



Les capteurs solaires : 20 capteurs de type "tube sous vide" fabriqués par Solar Key Mark (EN 12975-1/2), leur surface totale est 32 m<sup>2</sup> (réparties sur 5 batteries de 4 capteurs comme le montre la figure VII.12) avec un angle d'inclinaison de 6°.

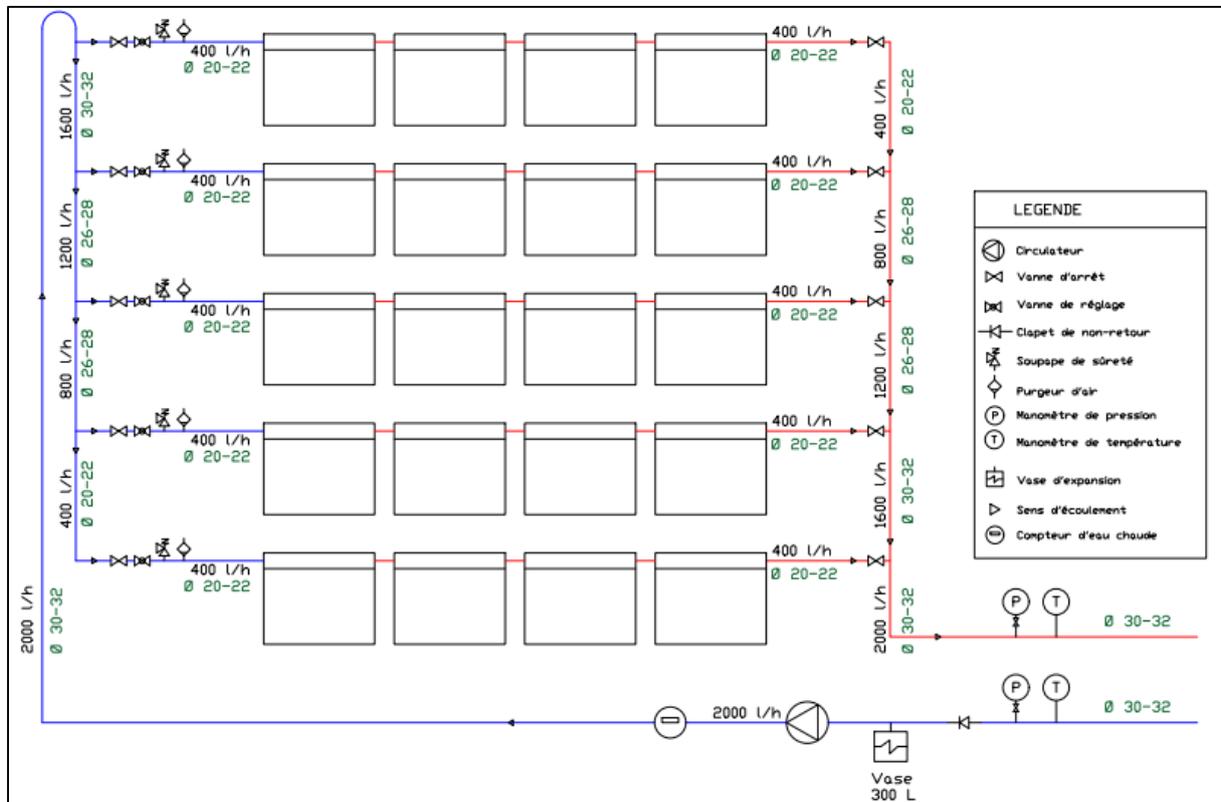


Figure -VII.12 - Schéma d'implantation des capteurs solaires du séchoir solaire pour les tomates [88]

Pompe de circulation (champ solaire) : c'est une pompe à 3 vitesses, d'une hauteur manométrique totale HMT de 5 m supportant une température du fluide de -10°C à 110°C et un débit de 2,55 m<sup>3</sup>/h.

Ballon de stockage de l'eau chaude : la capacité du ballon maintenue verticalement est de 2500 litres dont la température de stockage désirée est 90°C. Le ballon est calorifugé en Armaflex souple d'épaisseur 19 mm.

Centrale de traitement d'air : la centrale est constitué essentiellement d'un caisson de mélange (le mélangeur à renouvellement d'air) avec deux registres à réglage automatique, un préfiltre d'efficacité 95 %, un ventilateur de soufflage poulie courroie réglable pour assurer un débit de 16000 m<sup>3</sup>/h monté avant la batterie chaude. Cette dernière est réellement l'échangeur de chaleur eau-air avec un by-pass côté eau assuré par une pompe à 3 vitesses muni d'un contrôleur de température numérique de type PID pour commander la vanne à 3 voies. Le taux de renouvellement de l'air dans le caisson de mélange varie entre 0 et 30%.

La chambre de traitement : c'est la cellule existante chez AGRIFOOD (figure VII.4) avec les modifications suivantes :



- Ajout de plaques en inox alimentaire d'une épaisseur minimale de 0,6 mm comme montré à la figure VII.5.
- Ajout d'un système pour changer d'un fonctionnement au GPL (existant) à un fonctionnement à l'énergie solaire (figures VII.6-VII.7).

Vase d'expansion : le volume du vase est 300 litres avec une pression de gonflage de 5 bars.

Système de mesure : l'installation est munie d'un système de mesure capable de mesurer et d'enregistrer jusqu'à 8 signaux d'entrée analogiques pour mesurer l'ensoleillement et les températures dans différents points du système, des thermomètres, des manomètres, des débitmètres et un mini PC portable pour le contrôle et l'acquisition des données (figure VII.13).



**Figure -VII. 13-Exemples des appareils de mesures et de contrôle (A) Manomètre (B) Ensemble des appareils de mesures pour une conduite (C) Les armoires électriques de contrôle et de commande (D) Le mini PC de contrôle**



L'exploitation du séchoir est très facile pour tout utilisateur, il suffit juste de faire tourner le bouton de commande vers le voyant en couleur verte comme le montre la figure VII.14 (A), et la circulation de l'air de séchage dans l'enceinte de traitement sera automatiquement déclenchée avec la température de consigne désirée (figure VII.14 (B)).

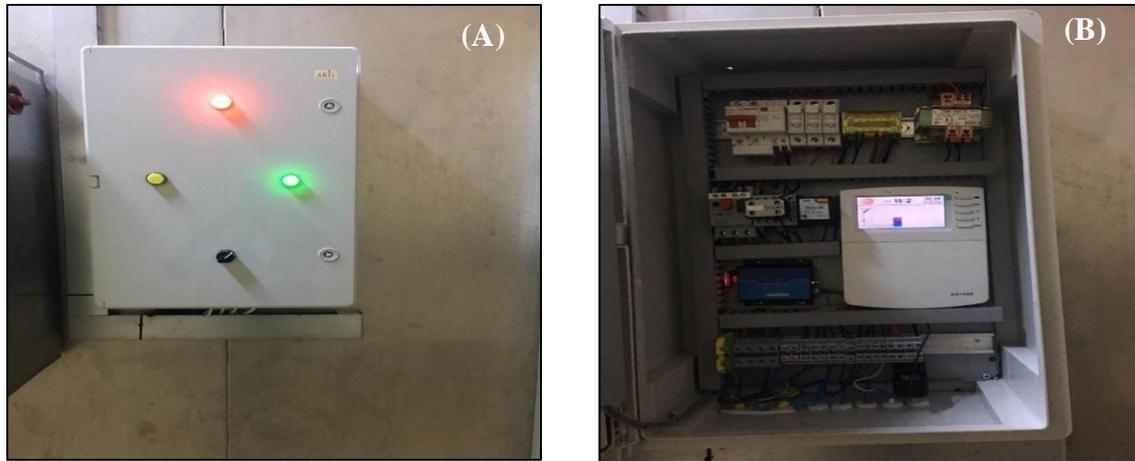


Figure -VII. 14-Appareils de commande du séchoir(A) Boutons de Marche/Arrêt du circuit d'air (B) Afficheur de la température de consigne de l'air de traitement

#### VII.4 Conclusion

Dans ce chapitre, une description détaillée de la mise en place du prototype du séchoir solaire pour les tomates installé chez AGRIFOOD a été présentée. Comme perspectives, l'installation fera l'objet de plusieurs études expérimentales approfondies et servira de banc de tests pour le séchage d'autres fruits ou plantes médicinales et aromatiques.

Cette étude a fait l'objet de deux symposiums de clôture du projet organisés par les partenaires du projet PRF où industriels, ministères de tutelle et chercheurs ont été invités.

Le premier symposium s'est déroulé le 10 avril 2019, à la salle polyvalente de la Faculté des Sciences de Tunis. Tandis que le deuxième symposium a eu lieu à l'Amphithéâtre « Sassi Ben Nasrallah » de l'ENIM le 06 novembre 2019.

Dans ce cadre, nous avons préparé une brochure (Annexe B) à distribuer lors des symposiums servant à promouvoir et diffuser les résultats de notre travail aux experts du séchage des produits agro-alimentaires. Nous y avons présenté un film documentaire tourné sur ce séchoir solaire et qui est désormais disponible sur YouTube [89]. Il a été aussi présenté lors de la fête de la science les 30 et 31 octobre 2019 à la Cité de la Science de Tunis [90].



# *C*onclusion *G*énérale



# Conclusion Générale

La Tunisie, dans la perspective d'économie d'énergie et de minimisation de l'impact négatif sur l'environnement, encourage le secteur industriel, notamment l'industrie du séchage, à l'utilisation des énergies renouvelables. Dans ce contexte, deux projets nationaux en séchage solaire, impliquant plusieurs laboratoires tunisiens en collaboration avec des industriels spécialisés dans le domaine du séchage, ont été lancés.

Le premier est un projet dans le cadre du Programme National de Recherche et Innovation (PNRI) du Ministère de l'Industrie, visant la conception et la mise sur le marché d'une cellule, fonctionnant à l'énergie solaire, pour le séchage et le traitement thermique phytosanitaire du bois d'emballage selon la Norme Internationale pour les Mesures Phytosanitaires NIMP n°15. Le second projet entre dans le cadre d'un Programme de Recherche Fédéré (PRF) du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique. Son but est de modéliser, concevoir, dimensionner et optimiser un séchoir solaire pour les tomates.

La première phase du projet PNRI a permis de développer et valider un modèle numérique de séchage du bois pour l'utiliser par la suite dans la simulation du traitement thermique phytosanitaire du bois. Il permet notamment de déterminer le temps de traitement et les propriétés du bois et de l'air à la sortie de la cellule. Les résultats du code ont ensuite été utilisés comme données d'entrée pour simuler, dans le logiciel commercial TRNSYS, le comportement dynamique d'un système solaire complet de traitement phytosanitaire.

Cette étude a démontré la faisabilité technique du concept, a permis le dimensionnement et l'optimisation des composants du système et l'installation d'un prototype à Tunis. En effet, les simulations ont prouvé la possibilité d'obtenir et de contrôler les conditions d'air désirées pour le traitement phytosanitaire avec un système solaire sans appoint. L'optimisation du séchoir solaire a montré que, pour une pile de bois de 1 m<sup>3</sup>, soit 0,52 m<sup>3</sup> de bois (réduit à 0,31 m<sup>3</sup> en hiver), un champ de capteurs solaires de type tube sous vide de 22 m<sup>2</sup> de surface de captation et un réservoir d'eau de stockage de 1500 litres seront nécessaires.



Les premiers tests expérimentaux sur le prototype, installé à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT), ont confirmé le bon fonctionnement de l'installation pour le traitement phytosanitaire. Une étude expérimentale complète des performances détaillées de l'installation sous différentes conditions fera l'objet d'une continuation prochaine du projet.

La deuxième partie du présent travail qui représente la contribution de notre laboratoire au Programme de Recherche Fédérée (PRF), a été la modélisation, la conception, le dimensionnement et l'optimisation d'un séchoir solaire pour tomates. En première partie, une cinétique de séchage expérimentale des tomates, obtenue par un des partenaires du PRF, a été utilisée pour déterminer le temps de séchage et la variation avec le temps des propriétés de l'air de séchage à la sortie de la cellule. Ces résultats sont ensuite utilisés pour simuler le comportement dynamique d'un système de séchage solaire complet à l'aide du logiciel TRNSYS. Les simulations ont prouvé la faisabilité du concept et ont permis l'optimisation de l'installation solaire. Pour sécher 315 kg de tomates fraîches, deux scénarios de dimensionnement ont été obtenus. Pour le premier scénario, le séchoir doit comprendre 45 m<sup>2</sup> de capteurs solaires de type tubes sous vide et 3600 litres d'eau de stockage d'énergie thermique et l'énergie auxiliaire ne sera nécessaire que pour deux mois seulement : Décembre et Janvier.

Dans le cas du deuxième scénario, une surface de captation de 30 m<sup>2</sup> et un réservoir de stockage de 2000 litres sont recommandées, une source d'énergie auxiliaire est nécessaire du mois de Novembre au mois de Mai.

Comme perspective à ce travail, nous devons tester le prototype de traitement phytosanitaire du bois à l'énergie solaire tout le long de l'année pour apporter les ajustements et les modifications nécessaires et améliorer son efficacité, ainsi que pour valider expérimentalement le modèle numérique sous différentes conditions. Nous souhaitons aussi lui ajouter un humidificateur et une boucle de régulation d'humidité afin d'étendre l'utilisation de l'installation au séchage de différentes essences de bois selon les tables de séchage industrielles.

Pour le séchoir solaire pour les tomates, une validation du système solaire de séchage doit être réalisée. Pour les périodes creuses de séchage des tomates, le séchage d'autres fruits ou plantes médicinales et aromatiques sera testé.

En conclusion, nous pouvons dire que, en vue de l'originalité des prototypes conçus et d'après tous les résultats et les simulations faites dans cette recherche et les estimations sur le temps de retour sur investissement, on peut passer à la phase de commercialisation des séchoirs solaires pour les deux applications étudiées.



# *R*éférences *B*ibliographiques



# Références Bibliographiques

- [1] Ministère de l'Industrie et des petites et moyennes entreprises, ANME, *Projet d'Énergie Renouvelable en Tunisie, Guide détaillé*, Mai 2019.
- [2] *Tunisie en chiffres / Statistiques Tunisie 2021*. Institut National de la Statistique.
- [3] Page Web : Centre Technique de l'Industrie du Bois et de l'Ameublement (CETIBA). Ministère de l'Industrie et des Petites et Moyennes Entreprises. République Tunisienne 2019.
- [4] Page Web : Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Énergie (ANME). Ministère de l'Industrie et des Petites et Moyennes Entreprises. République Tunisienne 2021.
- [5] D. Aléon, *Traitement phytosanitaire du bois par chauffage à cœur*. Centre Technique du Bois et de l'Ameublement, Paris (France). Bulletin OEPP/EPPO 34, 133–138, 2004.
- [6] V. Belessiotis, E. Delyannis, *Solar drying*. *Solar Energy*; 85: 1665-1691, 2011.
- [7] M.H. Ramage, H. Burrige, M. Busse-Wicher, G. Fereday, *The wood from the trees: The use of timber in construction*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68; 333–359, 2017.
- [8] P.H.M. Marfil, E.M. Santos, V.R.N. Telis, *Ascorbic acid degradation kinetics in tomatoes at different drying conditions*. *Food Science and Technology*; 41: 1642-1647, 2008.
- [9] N. Kannan, D. Vakeesan, *Solar energy for future world: - A review*. *Renewable and sustainable Energy Reviews*; 62: 1092-1105, 2016.
- [10] NS. Lewis, *Toward cost-effective solar energy use*. *Science*; 315(5813):798-801, 2007.
- [11] N. Armaroli, V. Balzani, *The future of energy supply: challenges and opportunities*. *Angewandte Chemie International Edition*; 46 (1-2):52-66, 2007.
- [12] Solar GIS, Global Horizontal Irradiation (GHI). Available from (<http://solargis.info/doc/freemaps/1000px/ghi/SolarGIS-Solar-map-World-map-en.png>), 2016.
- [13] S. Shane, S. Thomas, M. Matsui, O. Michael, *Document explicatif de la NIMP 15 (Réglementation des matériaux d'emballage en bois utilisés dans le commerce international)*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) 2017.
- [14] A.G.M.B. Mustayen, S. Mekhilef, R. Saidur. *Performance study of different solar dryers: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 34; 463-470, 2014.



- [15] G. Pirasteh, R. Saidur, S.M.A. Rahman, N.A. Rahim, *A review on development of solar drying applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews; 31: 133-148, 2014.
- [16] I. Kamfa, J. Fluch, R. Bartali, D. Baker, *Solar-thermal driven drying technologies for large-scale industrial applications : State of the art, gaps, and opportunities*, International Journal of Energy Research ; 44:9864–9888, 2020.
- [17] P. Udomkun, S. Romuli, S. Schock, B. Mahayothee, M. Sartas, T. Wossen, E. Njukwe, B. Vanlauwe, J. Müller, *Review of solar dryers for agricultural products in Asia and Africa : An innovation landscape approach*, Journal of Environmental Management 268, 2020.
- [18] P. Harshit P, B. Chetankumar, M. Patel, *Performance Evaluation of Various types of Solar Dryer and Drying Technologie*. International Journal of Advanced Science and Technology, Vol. 29, No. 9s, pp. 6020-6032, 2020.
- [19] M. Dronachari, Shriramulu, *Application of Different Types Solar Dryers in Agriculture Crops- A Review*, International Journal of Pure and Applied Bioscience 7 (2): 303-326, 2019.
- [20] A.A. El-Sebaili, S.M. Shalaby, *Solar drying of agricultural products: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16; 37-43, 2012.
- [21] U. Toshniwal, S.R Karale. *A review paper on Solar Dryer*. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) Vol. 3, Issue 2, pp.896-902, March -April 2013.
- [22] V. VenkataRaman, S. Iniyan, R. Goic, *A review of solar drying technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16; 2652-2670, 2012.
- [23] A. Boulemtafes et al. *Energy and Exergy analysis of the solar drying process of Mint*. 1st Conference & Exhibition Impact of Integrated Clean Energy on the Future of the Mediterranean, Beirut Lebanon, April 14th -16th 2011.
- [24] L. Bennamoun, *Reviewing the experience of solar drying in Algeria with presentation of the different design aspects of solar dryers*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15; 3371-3379, 2011.
- [25] A. Sharma, C.R. Chen, N. Vu Lan, *Solar-energy drying systems: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009 ; 13 : 1185-1210, 2009.
- [26] A. Boussalia, *Contribution à l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux. Faculté des Sciences de l'Ingénieur*. Université Mentouri – Constantine. Algérie 2010.
- [27] C. Verreault, F. Bouchard, *Conception d'un séchoir pour des cerises à grappes*. Université du Québec à Chicoutimi, 2010.
- [28] A. Agrawal, R.M. Sarviya. *A review of research and development work on solar dryers with heat storage*. International Journal of Sustainable Energy, 2014.



- [29] B. Ternenge Abur, H. Dandakouta, A.B. Adisa, R.I. Ejilah, *Parametric study for Solar Dryer Design*, Discovery, 55 (284), August, 2019.
- [30] J.A. Carcel, J.V. Garcia-Perez, E. Riera, A. Mulet, *Influence of high intensity ultrasound on drying kinetics of persimmon*. Dry Technol; 25(1): 185-93, 2007.
- [31] G. Clemente, J. Bon, J.V. Garcia-Perez, A. Mulet, *Natural convection drying at low temperature of previously frozen salted meat*. Dry Technol; 25(11): 1885-91, 2007.
- [32] M.H. Riahi, I.C. Trelea, M.N. Leclercq-Perlat, D. Piacque, G. Corrieu, *Model for changes in weight and dry matter during the ripening of a smear soft cheese under controlled temperature and relative humidity*. Int Dairy J; 17(8): 946-53, 2007.
- [33] K. Nogaya, Y. Li, Z. Jin, M. Fukumuro, Y. Ando, A. Akaishi, *Low temperature desiccant-based food drying system*. J Food Eng; 75: 71-7, 2006.
- [34] N. Bashir, M. Ahmad Bhat, B.N. Dar and M.A. Shah. *Effect of different drying methods on the quality of tomatoes*. Advances in Food Sciences, Volume 36 – No 2, 2014.
- [35] T.S. Workneh, V. Raghavan, Y. Garipey, *Microwave assisted hot air ventilation drying of tomato slices*. Paper presented at the Int. Conf. On Food Eng. And Biotechnology. Singapore: IACSIT Press 2011.
- [36] K.Y. KONE, *Amélioration de la qualité de la tomate séchée par microondes assistés par air chaud avec pilotage de la puissance spécifique*, Thèse, L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), Institut Polytechnique Lasalle-Beauvais, 2011.
- [37] J.S. Souza, M.F.D. Medeiros, M.A. Margarida, M.M.A. Magalhaes, S. Rodrigues, F.A.N. Fernandes, *Optimization of osmotic dehydration of tomatoes in a ternary system followed by air-drying*. J Food Eng; 83: 501-9, 2007.
- [38] A. Heredia, C. Barrera, A. Andre's, *Drying of cherry tomato by a combination of different dehydration techniques. Comparison of kinetics and other related properties*. J Food Eng; 80: 111-8, 2007.
- [39] P. Catalano, F. Fucci, F. Giametta, A. La Penna, G. La Fianza, *Experimental system and tests to optimize a tomato drying process*. Open Agric J 7:73–79, 2013.
- [40] L. Azeez, S.A. Adebisi, A.O. Oyedeji, R.O. Adetoro, K.O. Tijani. *Bioactive compounds' contents, drying kinetics and mathematical modelling of tomato slices influenced by drying temperatures and time*. Journal of the Saudia Society of Agricultural Sciences, 2017.
- [41] N. Bahloul, M. A. Balti, M. S. Guellouz, N. Kechaou, *Effets des conditions de séchage convectif, par rayonnements micro-ondes et du séchage couplé sur les cinétiques et la qualité des tomates*, 5ème Séminaire Maghrébin sur les Sciences et les Technologies du Séchage, Ouargla (Algérie), 22-24 Novembre, 2015.
- [42] S. Manaa, M. Younsi, N. Moumami, *Solar drying of tomato in the arid area of TOUAT (Adrar, Algeria)*. Energy Procedia 36: 511 – 514, 2013.



- [43] A.J.N. Khalifa, A.M. Al-Dabagh, W.M. Al-Mehemdi, *An Experimental Study of Vegetable Solar Drying Systems with and without Auxiliary Heat*, International Scholarly Research Network. *Renew Energy*: 1-8, 2012.
- [44] F. Hahn, G. Hernandez, J. Hernandez, C. Perez, and J.M. Vargas. *Optimization of roselle drying time and drying quality*. *Can Biosyst Eng* ; 53 : 31-8, 2011.
- [45] D. Luna-Sanchez, *Modélisation et conception préliminaire d'un séchoir solaire pour bois de Pin avec stockage d'énergie*, Thèse, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, Juillet 2008.
- [46] D. Luna, J.P. Nadeau, Y. Jannot, *Solar timber kilns: state of the art and foreseeable developments*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 13 (6-7): 1446-55, 2009.
- [47] S. El Mokretar, R. Miri, M. Belhamel, *Etude du Bilan d'Energie et de Masse d'un Séchoir de Type Serre, Applications au Séchage des Produits Agro-alimentaires*, *Revue des Energies Renouvelables*, Volume 7, p : 109-123, 2004.
- [48] N. Lahmari, D. Fahloul, I. Azani. *Influence des méthodes de séchage sur la qualité des tomates séchées (variété Zahra)*, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 15 N°2 ; 285 – 295, 2012.
- [49] A.K. Sharma, C. Sharma, C. Subhash, M. Tara, C. Kandpal, *Solar industrial process heating: a review*. *Renew Sustain Energy Rev* 78:124–137. 2017.
- [50] H. Moussaoui, A.A. Aghzzaf, A. Idlimam, A. Lamharrar, *Modeling the solar drying of dandelion leaves by factorial experimental design*. *Euro-Mediterranean J Environ Integr* 4(1):5. 2019.
- [51] W. Wang, M. Li, R.H.E. Hassanien, Y. Wang, L. Yang, *Thermal performance of indirect forced convection solar dryer and kinetics analysis of mango*. *Appl Thermal Eng* 134(310):321, 2018.
- [52] M. Zarezade, A. Mostafaeipour, *Identifying the effective factors on implementing the solar dryers for Yazd province. Iran*, *Renew Sustain Energy Rev* 57:765–775. 2016.
- [53] D. Luna, J.P. Nadeau, Y. Jannot, *Model and simulation of a solar kiln with energy storage*. *Renew Energy* 35:2533–2542. 2010.
- [54] L.M. Bal, S. Satya and S.N. Naik, *Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp 2298–2314, 2010.
- [55] O. Prakash, V. Laguri, A. Pandey, A. Kumar, A. Kumar, *Review on various modelling techniques for the solar dryers*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 62: 396-417, 2016.



- [56] O. Kilanko, T.A. Ilori , R.O. Leramo, P.O. Babalola, S.E. Eluwa , F.A. Onyenma, N.I. Ameh, P.N. Onwordi, A.K. Aworinde, M.A. Fajobi, *Design and Performance Evaluation of a Solar Dryer*, International Conference on Engineering for Sustainable World, Journal of Physics: Conference Series 1378, 2019.
- [57] M. Kumar, S. Kumar Sansaniwal, P. Khatak, *Progress in solar dryers for drying various commodities*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 55; 346–360, 2016.
- [58] A. Fudholi, K. Sopian, M.H. Ruslan, M.A. Alghoul, M.Y. Sulaiman. *Review of solar dryers for agricultural and marine products*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14; 1 – 30, 2010.
- [59] V. Shanmugam, E. Natarajan, *Experimental study of regenerative desiccant integrated solar dryer with and without reflective mirror*. Applied Thermal Engineering, 27(8–9), 1543–1551, 2007.
- [60] Vijay R. Khawale, S. Thakare. *Advancement in Solar Dryer for Agriculture Food Product: a Review*. International Journal of Science and Engineering Investigations, Volume 5, Issue 59, December 2016.
- [61] C.L. Hii, S.V. Jangam, S.P. Ong, A.S. Mujumdar, *Solar Drying: Fundamentals, Applications and Innovations* ISBN: 978-981-07-3336-0. Published in Singapore, pp.1-50, 2012.
- [62] M. Fadhel, R. Abdo, B. Yousif, A. Zaharim, K. Sopian, *Thin layer drying characteristics of banana slices in a forced convection indirect solar drying*. Recent Res Energy Environ 2011.
- [63] S. Janjai, N. Srisittipokakun, B.K. Bala, *Experimental and modeling performance of a roof-integrated solar drying system for drying herb and spices*. Energy; 33:91–103, 2008.
- [64] D. Jain, P. Tewari, *Performance of indirect through pass natural convective solar crop dryer with phase change thermal energy storage*. Renewable Energy ,80, 244–250, 2015.
- [65] K. Karunesh, A. Shukla, A. Sharma, A. Kumar, A. Jain, *Thermal energy storage based solar drying system: A review*. Innovative Food Science and Emerging Technologies 34; 86–99, 2016.
- [66] H.S.F. Awadalla, A.F. El-Dib, M.A. Mohamad, M. Reuss, H.M.S. Hussein, *Mathematical modelling and experimental verification of wood drying process*. Energy Conversion and Management 45; 197–207, 2004.
- [67] R. Rémond, J. Passard, P. Perré. *The effect of temperature and moisture content on the mechanical behaviour of wood: a comprehensive model applied to drying and bending*. European Journal of Mechanics A/Solids 26; 558–572, 2007.
- [68] A. Khouya, A. Draoui. *Détermination des courbes caractéristiques de séchage de trois espèces de bois*. Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°1 ; 87 – 98, 2009.



- [69] N. Bekkioui, *Séchage solaire du bois : Modélisation simplifiée du séchage d'une pile de bois dans un séchoir solaire à parois vitrées*. Thèse de Doctorat. Université Mohammed V, Faculté des Sciences, Rabat, Maroc, 2009.
- [70] S.S. Torres, W. Jomaa, J.R. Puiggali, S. Avramidis, *Multiphysics modeling of vacuum drying of wood*. Applied Mathematical Modelling 35; 5006–5016, 2011.
- [71] M. Simo-Tagne, M. Chinenye Ndukwu, M. Ndi Azese, *Experimental Modelling of a Solar Dryer for Wood Fuel in Epinal (France)*, Modelling, 2020.
- [72] G.J.F. Smit, J.P. du Plessis. *Modelling of airflow through a stack in a timber-drying kiln*. Applied Mathematical Modelling 31, 270–282, 2007.
- [73] D. Aléon, *Traitement phytosanitaire du bois par chauffage à cœur*. Centre Technique du Bois et de l'Ameublement, Paris (France). Bulletin OEPP/EPPO 34, 133–138, 2004.
- [74] Le groupement interprofessionnel des légumes(G.I.L). Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques et de la pêche. République Tunisienne 2018.
- [75] N. Nadir. *Recherche des Conditions Optimales de Fonctionnement d'un Séchoir Solaire*. Mémoire de mastère, Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur, Université Kasdi Merbah Ouargla. Algérie, 2009.
- [76] M.M. Oueslati, *Développement d'outils pour assister la conception d'un séchoir solaire pour bois, Mastère de recherche, Génie Energétique*. Ecole Nationale d'Ingénieur de Monastir, Tunisie, Janvier 2009.
- [77] Page Web : TRNSYS. University of Wisconsin-Madison, Solar Energy Laboratory, USA, 2017.
- [78] W. Keilholz, P. Sette, *TRaNsientSYstem Simulation program, Volume 2, Using the Simulation Studio*. University of Wisconsin-Madison, Solar Energy Laboratory, USA, 2017.
- [79] Solar hot water storage tanks, Thermal stratification analysis by means of detailed numerical simulations, Chapter 4.
- [80] M.M. Oueslati, M.S. Guellouz, *A numerical tool for the development of solar wood dryers*. Fifth International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications, Marrakesh- Maroc, Mai 2010.
- [81] S.A. Klein, W.A. Beckman, J.W. Mitchell, J.A. Duffie, N.A. Duffie, T.L. Freeman, J.C. Mitchell, J.E. Braun, B.L. Evans, J.P. Kummer, R.E. Urban, A. Fiksel, J.W. Thornton, N.J. Blair, P.M. Williams, D.E. Bradley, T.P. McDowell, M. Kummert, *TRaNsientSYstem Simulation program, Volume 3, Standard Component Library Overview*, University of Wisconsin-Madison, Solar Energy Laboratory, USA, 2017.
- [82] Programme National de Promotion de l'Innovation Technologique « PNRI » : *Conception et Installation d'un Séchoir Solaire pour Bois*, Centre Technique de l'Industrie du Bois et de l'Ameublement « CETIBA », Ministère de l'Industrie, République Tunisienne, 2014.



- [83] Consultation sous plis fermés N°06/2016 Acquisition et installation d'un séchoir solaire pour bois.
- [84] <https://aee-tunisia.com/blog/2018/01/28/aee-2018-awards-winners/>.
- [85] Programme de Recherche Fédérée « PRF » : *Séchoir Solaire de Produits Agro-alimentaires*, L'Agence Nationale de Maitrise de l'Energie « ANME », Ministère de l'Industrie, République Tunisienne, 2017.
- [86] S. Cherbal, *Analyse d'un système de stockage thermique résidentiel par masse d'eau*, Thèse, École de Technologie Supérieure, Montréal, Janvier 2015.
- [87] F. Bodin, *Optimisation d'un système de cogénération solaire*, Synthèse, Centre de recherche et d'innovations GDF SUEZ, INSA Strasbourg, Septembre 2011.
- [88] R. Ryskamp, *Emissions and Performance of Liquefied Petroleum Gas as a Transportation Fuel: A Review*, World LPG Association, October 2017.
- [89] <https://www.youtube.com/watch?v=aS7nVTQ8PKQ&t=350s>
- [90] <https://www.fetedelascience.tn/>
- [91] S. Chouicha, A. Boubekri, D. Mennouche, M.H. Berrbeuh, *Solar drying of sliced potatoes*. An experimental investigation. *Energy Procedia*; 36: 1276-1285, 2013.
- [92] A. Pratoto, M. Daguinet, B. Zeghamati, *Sizing solar assisted natural rubber dryers*. *Solar Energy*; 61(4):287-91, 1997.
- [93] B. Remki, K. Abahri, M. Tahlaiti, R. Belarbi. *Hygrothermal transfer in wood drying under the atmospheric pressure gradient*. *International Journal of Thermal Sciences* 57, 135-141, 2012.
- [94] D. Aléon, P. Chanrion, G. Négrié, J. Perez, O. Snieg, *Séchage du bois : Guide pratique*, CTBA, Paris. 1990.
- [95] P. Perré, Notes de cours : le séchage du bois, ENGREF, Nancy, Novembre 1993.
- [96] A.H. Khedim, *L'énergie solaire et son utilisation sous sa forme thermique et photovoltaïque*, Université des sciences appliquées de Aachen, Faculté de Jülich, Allemagne 2003.
- [97] M.R. Milota, J.L. Tschernitz, *Correlation of loblolly pine drying rates at high temperature*, *Wood and fiber science*, pp 298-313, 1990.
- [98] J.L. Liu, S. Cheng, *Solutions of Luikov equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies*, *Journal Heat Mass Transfer*, Vol.34, No. 7, pp. 1747-1754, 1991.



- [99] P. Perré, A. Degiovanni, *Simulation par volume finis des transferts couplés en milieu poreux anisotropes : Séchage du bois à basse température et haute température*, Journal Heat Mass Transfer, pp. 2461-2478, 1990.
- [100] Z.F. Sun, C.G. Carrington, P. Bannister, *Dynamic modelling of the wood stack in a wood drying kiln*, Trans IChemE, Vol78, Part A, January 2000.
- [101] P. Perré, *Multiphysics and multiscale aspect of drying*, 1er Séminaire Magrebin sur les Sciences et Technologie de Séchage, Tozeur-Tunisie, Décembre 2006.
- [102] S. Pang, *Investigation of effects of wood variability and rheological properties on Limber*, Chemical Engineering Journal 86, pp. 103-110, 2002.
- [103] H.S.F. Awadalla, *Development of a simulation tool to enable optimization methods of solar Timber Drying*, thesis, Faculty of engineering, Cairo University, Egypt, December 2002.
- [104] J.P. Holman, Heat Transfer, McGraw- Hill, 8th Edition, United States, 1997.
- [105] M. Ahmad, *Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments. Couplage matériaux à changement de phase, super-isolation, apports solaires*, Thèse, Université Joseph Fourier, Grenoble 1, Novembre 2004.
- [106] R. Rémond, *Approche déterministe du séchage des avivés de résineux de fortes épaisseurs pour proposer des conduites industrielles adaptées*, Thèse, École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Nancy, 2004.
- [107] R. Cònsul, I. Rodríguez, C.D. Pérez-Segarra, M. Soria. *Virtual prototyping of storage tanks by means of three-dimensional CFD and heat transfer simulations*. Solar Energy, 77(2):179–191, 2004.
- [108] K. Cronin, B. Norton, J. Taylor, M. Riepen, A. Dalhuijsen, *Development of a simulation Tool to enable optimisation of the energy consumption of the industrial timber-Drying process*, Applied Energy 53, 325-340, 1996.
- [109] M. Krarti, J. Huang, D. Seo, *Development of TMY Weather Files for Tunisian Sites*, Final Report submitted to ANER, Tunis, Tunisie, 2005.
- [110] A. Haj Youssef, A. Ben Hmid, *Etude d'Opportunité du Solaire Photovoltaïque dans les Secteurs Agricole & Agroalimentaire*. Rapport Final. Ministère Fédéral Allemand de la Coopération Economique et du Développement (BMZ). Mars 2016.
- [111] S. Boughali, *Etude et optimisation du séchage solaire des produits agro-alimentaires dans les zones arides et désertiques*, Thèse, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Hadj Lakhdar Batna, Algérie, 2010.
- [112] P. Joseph Etim, A. Ben Eke, K. Joshua Simonyan, *Design and development of an active indirect solar dryer for cooking banana*, Scientific African 8, 2020.



- [113] S. Suherman, E.E. Susanto, A.W. Zardani, N.H. Roviqoh Dewi, *Performance study of hybrid solar dryer for cassava starch*, AIP Conference Proceedings 2197, 2020.
- [114] W.P. Missana, E. Park, T. Kivevele, *Thermal Performance Analysis of Solar Dryer Integrated with Heat Energy Storage System and a Low-Cost Parabolic Solar Dish Concentrator for Food Preservation*, Journal of Energy, 2020.
- [115] M. Wzorek, *Solar drying of granulated waste blends for dry biofuel production*, Environmental Science and Pollution Research, 2021.
- [116] M. Simo-Tagne, A. Zoulalian, R. Rémond, Y. Rogaume, *Mathematical modelling and numerical simulation of a simple solar dryer for tropical wood using a collector*, Applied Thermal Engineering, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.014>. 2017.
- [117] O.A. Plumb, G.A. Spolek, B.A. Olmstead, *Heat and Mass transfer in wood during*, Journal Heat Mass Transfer, Vol.28, No. 9, pp 1669-1678, 1985.
- [118] M.N. Musembia, K.S. Kiptoob, N. Yuichic, *Design and analysis of solar dryer for mid-latitude region*. Energy Procedia. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.145>. 2016.
- [119] P. Demissie, M. Hayelom, A. Kassaye, A. Hailesilassie, M. Gebrehiwot, M. Vanierschota, *Design, development and CFD modeling of indirect solar food dryer*. Energy Procedia 158:1128–11. 2019.
- [120] U. Hamdani, T.A. Rizal, Z. Muhammad, *Fabrication and testing of hybrid solar-biomass dryer for drying fish*. Case Stud Therm Eng 12:489–496. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.06.008>. 2018.

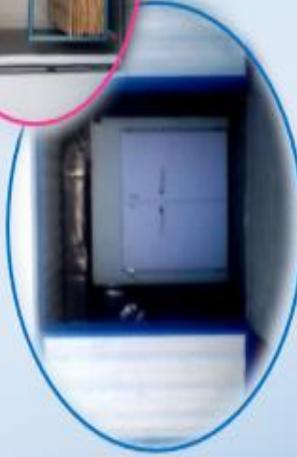


*Annexe A*  
*Brochure PNRI*

## Prototypage du Séchoir Solaire



### Champs Solaire



### Chambre de Traitement Thermique



### Unité de Traitement d'Air

## Les Partenaires du Projet :

- ☀ Le Centre Technique de l'Industrie du Bois et de l'Ameublement (CETIBA)
- ☀ Le Laboratoire de Recherche Matériaux, Optimisation et Energie pour la Durabilité (LR-MOED de l'ENIT)
- ☀ Le Laboratoire d'études des Systèmes Thermiques et Energétiques (LESTE de l'ENIM)
- ☀ L'entreprise Advanced Energy Systems (AES)
- ☀ L'entreprise Tunisie Palettes



Pour plus d'information, contactez  
sadok.guellouz@enib.rnu.tn



## Programme National de Recherche et Innovation

# Séchoir Solaire pour le Traitement Thermique du Bois



Activité Web 0  
Accéder aux  
activités



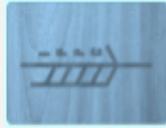
## INTRODUCTION

Le projet vise à concevoir et à mettre sur le marché une cellule pour le séchage et le traitement thermique du bois fonctionnant à l'énergie solaire. Le but étant d'assister les entreprises industrielles tunisiennes à maîtriser les procédés de séchage et de traitement thermique phytosanitaire du bois et de les aider à respecter la norme internationale NIMP 15, tout en restant compétitifs, économes en énergie et en minimisant l'impact négatif sur l'environnement par l'utilisation d'une énergie « propre ». Ce projet s'inscrit aussi dans les priorités nationales de la maîtrise de l'énergie.

## La NIMP 15

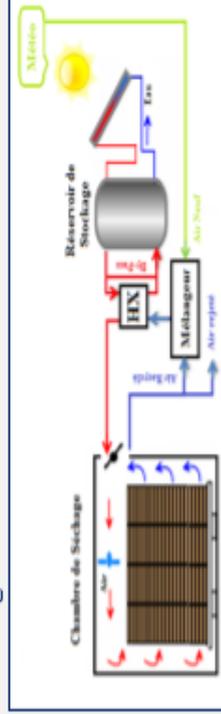
La Norme Internationale de Mesures Phytosanitaires n° 15 a pour objectif d'uniformiser les mesures à appliquer afin d'éviter l'infestation des forêts d'un pays importateur par des nuisibles présents dans le bois des emballages.

La NIMP 15 impose le maintien du cœur du bois à une température de l'ordre de 56 °C pendant au moins une demi-heure. Il s'agit d'une température facilement réalisable grâce à l'énergie solaire.



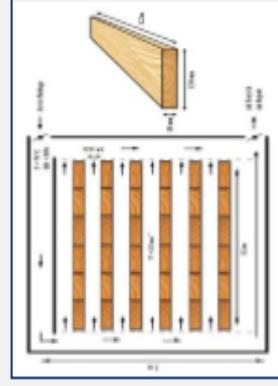
## LE CONCEPT

Le système comporte deux circuits. Un circuit primaire à eau qui comprend les capteurs solaires et le réservoir de stockage. L'utilisation d'un circuit à eau permet une meilleure efficacité et une plus petite taille de l'installation. Un circuit secondaire qui fait circuler l'air de séchage dans la chambre contenant le bois à traiter. Les deux circuits sont couplés à travers un échangeur de chaleur eau-air. La température et l'humidité de l'air à l'entrée de la chambre de séchage sont réglées en ajustant respectivement le débit d'eau dans l'échangeur et le taux de renouvellement d'air.



## METHODOLOGIE

La conception et le dimensionnement de l'installation ont été assistés par les simulations numériques. Ces simulations ont été conduites sur deux étapes; une modélisation détaillée des transferts de chaleur et de masse

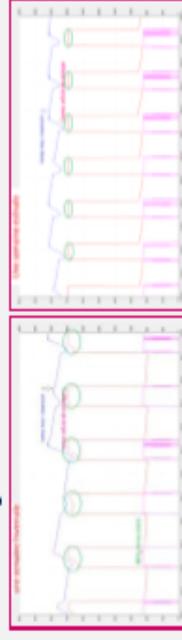


dans l'air et le bois pour obtenir les conditions de sortie du séchoir qui seront utilisés pour la seconde étape; une simulation thermodynamique de l'ensemble du système de séchage effectuée dans l'interface de simulation du logiciel TRNSYS avec les données météo pour une année typique à Tunis.

## RÉSULTATS

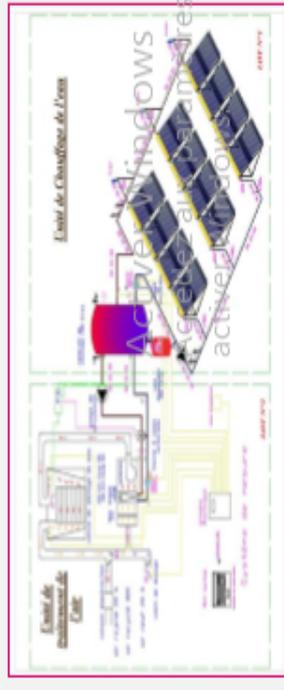
Le dimensionnement de l'installation a été fait pour une cellule de traitement thermique de volume 1 m<sup>3</sup> contenant un volume de 0,52 m<sup>3</sup> de bois. Pour garantir une température de l'air de séchage de l'ordre de 70 °C, la température de l'eau dans le réservoir de stockage doit être supérieure à 80 °C.

Les simulations TRNSYS ont été effectuées pour toute une année typique afin de s'assurer du bon fonctionnement aux quatre saisons et du bon dimensionnement de la surface de captation et du volume de stockage. Des exemples des profils des températures sont présentés pour une semaine estivale et pour une semaine hivernale.



Les simulations et l'optimisation ont donné :

Débit de l'air de séchage	2566 kg/h
Durée du traitement (bois vert)	7 heures
Surface de captation (tube sous-vide)	22 m <sup>2</sup>
Volume du réservoir de stockage	1,5 m <sup>3</sup>
Taux de renouvellement d'air (max)	20 %





*Annexe B*  
*Brochure PRF*

## Prototype du Séchoir Solaire



### Champs Solaire



### Cellule de séchage



### Unité de Traitement d'Air

## Les Partenaires du Projet :

- ☀️ L'Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Énergie (ANME)
- ☀️ AGRIFOOD Sarl
- ☀️ Le Laboratoire d'études des Systèmes Thermiques et Énergétiques (ENIM)
- ☀️ Le Laboratoire de Mécanique des Fluides Appliqués Génie des Procédés et Environnement (ENIS)
- ☀️ Le Laboratoire d'Énergétique et des Transferts Thermiques et Massiques (FST)



Pour plus d'information, contactez [sadok.guellouz@enib.rnu.tn](mailto:sadok.guellouz@enib.rnu.tn)



## Programme de Recherche Fédérée

## Séchoir Solaire de Produits Agro-Alimentaires



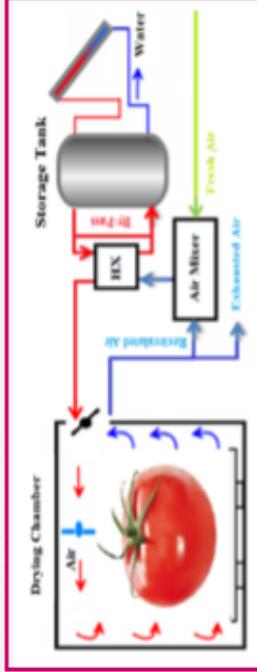
Activef Windows

Accédez aux paramètres de l'air



# LE CONCEPT

Le système comporte deux circuits. Un circuit primaire à eau qui comprend les capteurs solaires et le réservoir de stockage. L'utilisation d'un circuit à eau permet une meilleure efficacité et une plus petite taille de l'installation. Un circuit secondaire qui fait circuler l'air de séchage dans la cellule. Les deux circuits sont couplés à travers un échangeur de chaleur eau-air. La température et l'humidité de l'air à l'entrée de la chambre de séchage sont réglées en ajustant respectivement le débit d'eau dans l'échangeur et le taux de renouvellement d'air.

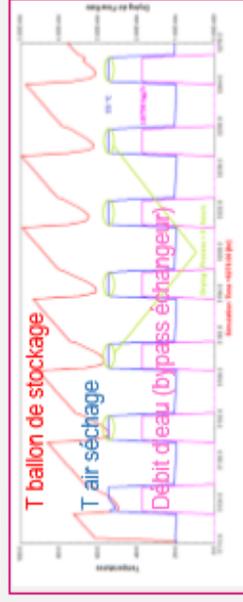


# METHODOLOGIE

La conception, le dimensionnement et l'optimisation de l'installation ont été assistés par les simulations numériques. Dans une première étape, des cinétiques de séchage expérimentales des tomates ont été obtenues et utilisées pour déterminer le temps de séchage et les propriétés de l'air de séchage. Ces résultats ont par la suite été employés pour simuler, à l'aide du logiciel TRNSYS, le comportement thermodynamique du système de séchage solaire complet, c'est-à-dire circuits primaire (capteurs et ballon de stockage) et secondaire (cellule de séchage et mélangeur d'air) et leur couplage à travers l'échangeur de chaleur eau-air. Les simulations emploient les données météo pour une année typique à Tunis.

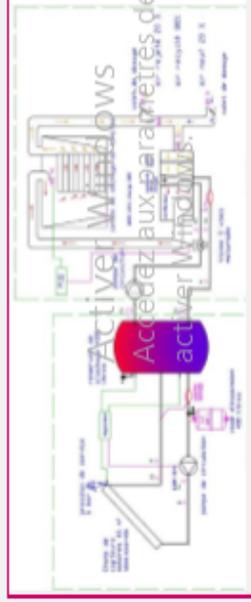
# RÉSULTATS

Le dimensionnement de l'installation a été fait pour la cellule de séchage d'Agrifood qui a une capacité de 315 kg de tomates fraîches. Pour garantir une température de l'air de séchage de l'ordre de 65 °C, la température de l'eau dans le réservoir de stockage doit être supérieure à 80°C. Les simulations TRNSYS ont été effectuées pour toute une année typique afin de s'assurer du bon fonctionnement aux quatre saisons et du bon dimensionnement de la surface de captation et du volume de stockage. Un exemple des profils des températures est présenté pour une semaine estivale.



Les simulations et l'optimisation technico-économique ont donné :

Débit de l'air de séchage	18 750 kg/h
Durée du séchage	7 heures
Surface de captation (tube sous-vide)	20 m <sup>2</sup>
Volume du réservoir de stockage	1,5 m <sup>3</sup>
Appoint GPL	possible



# INTRODUCTION

Le projet vise à concevoir et à mettre sur le marché une cellule pour le séchage des produits agro-alimentaires fonctionnant à l'énergie solaire. Les tomates sont utilisées comme exemple. Le but étant d'assister les entreprises industrielles tunisiennes à maîtriser les procédés de séchage et de les aider à garantir la qualité de leurs produits tout en restant compétitifs, économes en énergie et en minimisant l'impact négatif sur l'environnement par l'utilisation d'une énergie « propre ». Ce projet s'inscrit aussi dans les priorités nationales de la maîtrise de l'énergie.

# BREF HISTORIQUE

Ce PRF a été lancé à la demande de l'ANME et suite à une étude sur le séchage solaire élaborée par l'Agence. Initialement il a été prévu d'installer le prototype de séchage dans un des laboratoires intervenants dans le projet. Le Comité de Pilotage (COPIL) du PRF a proposé et le ministère a approuvé l'installation du prototype du séchoir de tomates chez le partenaire AGRIFOOD dans le but de réaliser les essais et les tests dans les vraies conditions industrielles et de pouvoir l'utiliser pour des essais complémentaires à l'échelle pilote par les partenaires après la clôture du projet dans le cadre de leurs travaux de recherche. Le COPIL a jugé que cette action permettra, en plus, de sensibiliser l'intégralité du secteur agro-alimentaire à la faisabilité et la durabilité de cette technologie.

## Résumé

L'étude présentée dans ce mémoire s'inscrit dans deux projets nationaux, soient le Programme National de Recherche et Innovation (PNRI) et un Projet de Recherche Fédéré (PRF).

Le PNRI vise la modélisation, la conception et l'optimisation d'une cellule solaire pour le traitement phytosanitaire du bois d'emballage selon la norme internationale NIMP n°15. Le but du PRF est de concevoir et d'optimiser un séchoir solaire pour les tomates.

Les objectifs généraux communs des deux programmes sont d'offrir et d'assurer la qualité des produits, tout en restant compétitifs, économes en énergie et en minimisant l'impact négatif sur l'environnement par l'utilisation d'une énergie «propre».

Dans les deux cas, la configuration retenue pour les circuits d'air et d'eau est comme suit. La majeure partie de l'air sortant de la chambre de séchage/traitement est recyclée. La partie rejetée correspond à la quantité nécessaire d'air ambiant pour ajuster l'humidité de l'air sortant de la chambre en le mélangeant en des proportions bien déterminées avec l'air ambiant. La température de l'air est par la suite ajustée à la valeur souhaitée dans un échangeur de chaleur air-eau à l'aide d'un by-pass côté eau. Le circuit d'eau comprend des capteurs solaires, un réservoir de stockage, un échangeur de chaleur et deux pompes de circulation.

Le dimensionnement et l'optimisation des systèmes sont basés sur les simulations obtenues par un modèle TRNSYS© du système solaire retenu. Ce modèle dynamique prend en considération les données météo pour une année typique. Les conditions à la sortie de la chambre de traitement sont calculées respectivement par un code de calcul FORTRAN employant la méthode des différences finies pour prédire l'évolution temporelle des propriétés du bois et de l'air lors du traitement thermique phytosanitaire du bois. Par contre, les conditions à la sortie de la chambre de séchage sont obtenues à partir des cinétiques de séchage expérimentales pour les tomates établies par les partenaires du PRF.

Cette étude a démontré la faisabilité technique du concept, a permis le dimensionnement et l'optimisation des composants du système et l'installation d'un prototype de cellule solaire de traitement phytosanitaire du bois à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT) et d'un autre prototype de la cellule de séchage solaire des tomates à l'usine d'Agrifood à Haouaria. Les simulations ont prouvé la possibilité d'obtenir et de contrôler les conditions d'air désirées pour le traitement phytosanitaire du bois avec un système solaire sans appoint. L'optimisation de la cellule solaire a montré que, pour une pile de bois de 1 m<sup>3</sup>, soit 0,52 m<sup>3</sup> de bois (réduit à 0,31 m<sup>3</sup> en hiver), un champ de capteurs solaires de type tube sous vide de 22 m<sup>2</sup> de surface de captation et un réservoir d'eau de stockage de 1500 litres seront nécessaires.

Les premiers tests expérimentaux sur le prototype ont confirmé le bon fonctionnement de l'installation pour le traitement phytosanitaire. Une étude expérimentale complète des performances détaillées de l'installation sous différentes conditions fera l'objet d'une continuation prochaine du programme.

Les simulations ont aussi prouvé la faisabilité du concept et ont permis l'optimisation du séchoir solaire pour tomates. Ainsi, pour sécher 315 kg de tomates fraîches, deux scénarios de dimensionnement ont été obtenus. Pour le premier scénario, le séchoir doit comprendre 45 m<sup>2</sup> de capteurs solaires de type tubes sous vide et 3600 litres d'eau de stockage d'énergie thermique et l'énergie auxiliaire ne sera nécessaire que pour deux mois seulement : Décembre et Janvier. Dans le cas du deuxième scénario, une surface de captation de 30 m<sup>2</sup> et un réservoir de stockage de 2000 litres sont recommandées, une source d'énergie auxiliaire est nécessaire du mois de Novembre au mois de Mai. C'est ce deuxième scénario qui a été adopté pour la construction du prototype.