

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA 1
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE



PROJET DE FIN D'ETUDES
PRESENTE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER
OPTION : INGENIERIE THERMIQUE ET SOLAIRE

Soutenue le : 17/ 10 /2016

**ETUDE DE SECHAGE SOLAIRE ASSISTE
PAR POMPE A CHALEUR**

Realisé par :

Sendjasni hayet

Ammour Mohammed Amine

Promoteur : **Mr. Nehal**

Mémoire soutenue le 17/10/2016 devant le jury :

Abdi Hamide
Ali ben Yahia

Maître assistant A
docteur

USD de Blida
USD de Blida

Président
Examineur

ANNEE UNIVERSITAIRE
2015-2016

Introduction générale

Chapitre 1 :
le séchage solaire

Chapitre 2 :
**Séchage solaire assisté par pompe
à chaleur**

Chapitre 3 :
**Modélisation d'une serre solaire
assistée par PAC**

Chapitre 4 :
**Conception et réalisation d'un
séchoir à plateau**

Chapitre 5 :

La modélisation de la cinétique de séchage

CONCLUSION GENERALE

Dédicaces

Chaleureusement,

Je souhaite dédier ce modeste travail synonyme de concrétisation de tous mes efforts fournis ces dernières années :

A la lumière de ma vie, mes chers parents en reconnaissance de leur amour et de leurs sacrifices à mon égard sans eux je ne serai jamais arrivé à ce stade, je leurs souhaite une bonne santé, que Dieu me les garde.

A mon cher frère, auquel je souhaite tout le bonheur et toute la réussite.

A toute mes sœurs,

A toute ma famille et à tous mes enseignants.

A tous mes amis surtout AHLEM, RIMA, MIMI BEST, MIMA MERRY et LATIF, Amine, Hadjer, Yousef et Rabah

A tous les gens qui comptent pour moi et pour lesquels je compte.

Hayat

Dédicaces

A ma Mère,

Tu m'as donné la vie, la tendance et le courage pour réussir.

Tout ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et la Reconnaissance que je te porte.

En témoignage, je t'offre ce modeste travail pour te remercier pour tes sacrifices et pour l'affection

Dont tu m'as toujours entourée.

A mon père,

L'épaule solide, l'œil attentif compréhensif et la personne la plus digne de mon estime et de mon respect.

Aucune dédicace ne saurait exprimer mes sentiments, que Dieu te préserve et te procure santé et longue vie.

A mes chers frères et sœurs,

A ma famille,

A la promotion MITS et OSE 2016

A mes amis ...

Amine

Résumé

Notre mémoire se résume à l'étude de séchage solaire assisté par pompe à chaleur, ce système est adapté beaucoup plus pour le domaine industriel que pour le séchage de produits alimentaires.

Cette thèse s'inscrit dans une optique d'amélioration et d'optimisation des méthodes de dimensionnement et de conception de séchage solaire assisté par pompe à chaleur, en mettant l'accent sur le développement et l'utilisation d'outils de simulation numérique.

Après une présentation générale des notions essentielles sur le séchage solaire et celle de pompe à chaleur dans le chapitre 1 et 2, une modélisation d'une serre solaire pour le séchage des boues assisté par une pompe à chaleur a été présentée dans le chapitre 3. La fin de chapitre expose les résultats de l'étude paramétrique de la serre.

Le chapitre 4 aborde la conception et la réalisation d'un séchoir à plateau qui sera installé au niveau du laboratoire de transfert thermique de notre département pour la réalisation de travaux pratiques.

Le chapitre 5 présente la modélisation de la cinétique de séchage de quelques produits alimentaires. Plusieurs modèles ont été proposés avec le calcul d'incertitude de chaque modèle.

Remerciements

Nous remercions ALLAH le Tout-puissant de nous avoir donné la volonté et la patience de mener à terme ce modeste travail.

Ce travail a été réalisé sous la direction de notre promoteur le Mr. NEHAL, enseignant au département mécanique université de Blida 1.

En lui exprimant particulièrement toutes nos reconnaissances pour nous avoir fait bénéficier de ces compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.

Enfin, nous adressons nos vives reconnaissances à tous nos collègues de l'institut mécanique.

Nos remerciements aussi à tous ceux qui, tout au long de ces années d'études, nous ont encadrés, observé, aidé, conseillé et même supporté.

Sommaire

REMERCIEMENTS

DEDICACE

SOMMAIRE

RESUME

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

NOMENCLATURE

INTRODUCTION GENERALE

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1 : Le séchage solaire

1.1. Définition du séchage	1
1.2. Séchage et énergie	1
1.3. Intérêt du séchage	2
1.4. Différents méthodes du séchage	2
1.5. Modes de séchage	4
1.6. Caractéristiques de l'air de séchage	7
1.7. Cinétique de séchage	7
1.8. Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage	10
1.9. Les Séchoirs solaires	10
1.10. Séchoir solaire sous serre	14
1.11. Choix du type de séchoir	19
1.12. Le séchage solaire des boues d'épuration	19

Sommaire

1.13. Conclusion.....	20
-----------------------	----

Chapitre 2 : séchage solaire assisté par pompe à chaleur

2.1 Introduction	21
2.2 Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur	21
2.3 Les deux grandes familles de pompe à chaleur (PAC).....	22
2.4 Les composants de base d'une PAC.....	23
2.5 Les différents types de pompes à chaleur	30
2.6 Séchage solaire assisté par une pompe à chaleur	33
2.7 Conclusion.....	35

Chapitre 3 : modélisation d'une serre solaire assistée par PAC

3.1 Démarche globale de modélisation.....	37
3.2 Analyse physique du modèle.....	38
3.3 Ecriture des bilans thermiques et massiques.....	40
3.4 Bilans énergétiques.....	40
3.5 Bilans massiques (cinétique de séchage)	41
3.6 Expression des flux énergétiques	42
3.7 Paramètres de la boue intervenant dans la modélisation	47
3.8 Conclusion.....	47

Chapitre 4 : conception et réalisation d'un séchoir à plateau

4.1 Introduction	61
4.2 L'objectif de banc	61
4.3 Présentation de quelques bancs didactiques.....	62

Sommaire

4.4 Conception de notre banc d'un séchoir à plateau.....	64
4.5 Dimensionnement de notre banc	64
4.6 Les étapes de la conception.....	65
4.7 Réalisation du banc d'un séchoir à plateau.....	69
4.8 Matériels et outillages nécessaires à la réalisation	71
4.9 Les étapes de la réalisation de banc.....	73
4.10 CONCLUSION	76

Chapitre 5: La modélisation de la cinétique de séchage

5.1 Introduction	77
5.2 Définition de la teneur en eau X	77
5.3 Modélisation des courbes de cinétique de séchage	77
5.4 Organigramme d'un calcul des paramètres.....	79
5.5 Détermination de cinétique de séchage de quelques produits.....	81
5.6 Détermination de la cinétique de séchage dans des conditions variables.....	85
5.7 Mise en marche du banc expérimental	89
5.8 Utilisation du banc expérimentale pour le séchage de produit agro alimentaires.....	91
5.7 Conclusion.....	93

CONCLUSION GENERALE

REFERENCE

Sommaire

CONCLUSION GENERALE

Ce projet nous a permis de connaître les différents types de bancs didactiques des sècheurs à plateaux, le phénomène de séchage assisté par pompe à chaleur et aussi de comprendre le principe de fonctionnement de ces bancs et ces différents composants.

La conception et la réalisation d'un tel outil d'apprentissage sera forte intéressante pour l'enseignement de la thermodynamique et du transfert de chaleur.

L'état de l'art des bancs didactiques et la recherche bibliographique que nous avons menée nous ont donnés des idées pour réaliser le schéma de conception des bancs et le matériel nécessaire à la réalisation.

La réalisation de ce projet a enrichie nos connaissances dans les différents domaines du séchage, électrique, et technique de soudage ... etc. et aussi nous a familiarisée avec le matériel qui nous avons utilisé.

Ce projet a aussi constitué un travail en groupe enrichissant. En effet, nous nous sommes répartis le plus équitablement possible les différentes tâches. Nous avons également appris à travailler en équipe et en étroite collaboration.

En prenant en considération les moyens disponibles au niveau de notre département, la durée du projet et le côté financier on peut dire que les objectifs fixés ont été atteints.

Ce projet est donc très intéressant et enrichissant. Il doit clairement être poursuivi pour les années à venir. C'est un projet à recommander aux étudiants.

Nous recommandons aux étudiants de continuer ce travail et d'apporter les améliorations suivantes :

- Améliorer l'échange convectif dans le tunnel (ajouter des résistances chauffantes à air).
- Améliorer l'esthétique des bancs.
- Améliorer l'isolation du tunnel.
- Faire plus de réglage pour obtenir un fonctionnement optimum.

Liste des tableaux

Tableau1.1 : consommation d'énergie on fonction de différents types des sècheurs.	P 1
Tableau 1.2: quelque produit agricole avant et après le séchage.	P 16
Tableau 2.1 : Représentation énergétique de chaque élément du sous-sol.	P 32
Tableau 3.1 : Récapitulatif de la notation des flux.	P 39
Tableau 3.2 : Récapitulatif des paramètres d'entrée du modèle.	P 49
Tableau 5.1 : les modèles mathématiques des courbes de séchage.	P 77
Tableau 5.2: Les résultats de la teneur en eau de produit sur la teneur en initiale de produit en fonction du temps.	P 80
Tableau 5.3 : les équations et les modèle de cinétique de séchage de la pomme.	P 81
Tableau 5.4: Les résultats de la teneur en eau de produit sur la teneur en initiale de produit en fonction du temps.	P 82
Tableau 5.5 : Tableau représente les équations et les modèle de cinétique de séchage de banane.	P 82
Tableau 5.6 : Les résultats de la teneur en eau de produit sur la teneur en initiale de produit en fonction du temps.	P 83
Tableau 5.7 : Tableau représente les équations et les modèles de cinétique de séchage de carotte.	P84
Tableau 5.8 : conditions de séchage au cours des essais.	P 85
Tableau 5.9: Modélisation de séchage de la menthe verte à 55°C.	P 86
Tableau 5.10 : Valeurs des coefficients du model Midilli-Kucuk en fonction de la température.	P 86
Tableau 5.11 : Les résultats de la teneur en eau de produit sur la teneur en initiale de produit en fonction du temps.	P 92
Tableau 5.12 : Tableau représente les équations et les modèle de cinétique de séchage de la pomme.	P 92

Liste des figures

Figure 1.1 : schéma représente le Séchage mécanique.	P 2
Figure 1.2 : schéma représente le Séchage chimique.	P 3
Figure 1.3 : schéma représente le séchage par ébullition.	P 4
Figure 1.4 : schéma représente le Séchage par entraînement.	P 4
Figure 1.5 : schéma représente le Séchage par convection forcée.	P 5
Figure 1.6 : schéma représente le Séchage par conduction.	P 6
Figure 1.7 : schéma représente le Séchage par rayonnement.	P 6
Figure 1.8 : Courbes d'évolution type au cours du temps de la teneur en eau duProduit (a), de la vitesse de séchage (b) et de la température du produit (c).	p 8
Figure 1.9 : Représentation typique des séchoirs solaires.	P 11
Figure 1.10 : photos représentatif de séchoir direct (a) et séchoir indirect(b).	p 11
Figure 1.11 : Exemple de séchoir solaire direct.	P 12
Figure 1.12 : photos représentent des séchoirs solaire indirect.	P 12
Figure 1.13: Vue latérale du système (séchoir - capteur).	P 13
Figure 1.14 : image représente une serre solaire.	P 14
Figure 1.15 : Schéma d'un sécheur thermique direct des boues.	P 15
Figure 1.16 : Schéma d'un principe de fonctionnement d'un sécheur indirect des boues.	P 15
Figure 1.17 : serre ouverte.	P 17
Figure 1.18 : exemple de serre fermée (extraction en pignon).	P 17
Figure 1.19 : exemple de serre fermée (extraction par cheminée).	P 18
Figure 1.20 : Phénomènes physiques pour un séchage solaire sous serre.	P 19
Figure 2.1: Schéma de principe d'une PAC.	P 21
Figure 2.2 : Système de PAC à absorption.	P 22
Figure 2.3: Schéma de principe d'une pompe à chaleur à compression.	P 23
Figure 2.4: Compresseur frigorifique.	P 23
Figure 2.5 : Principe de fonctionnement d'un condenseur.	P 24
Figure 2.6: Condenseur à eau multitubulaire.	P 24
Figure 2.7: Condenseur à air.	P 24

Figure 2.8 : Principe de fonctionnement d'un détendeur.	P 25
Figure 2.9: Détendeur thermostatique.	P 25
Figure 2.10: Détendeur capillaire.	P 25
Figure 2.11: Evaporateur a air et son principe de fonctionnement.	P 26
Figure 2.12 : Fluide frigorigène.	P 26
Figure 2.13: le pressostat.	P 27
Figure 2.14 : le filtre déshydrateur.	P 27
Figure2.15 : le clapet anti-retour.	P 28
Figure 2 .16 : la vanne de service.	P 28
Figure 2.17 : la bouteille anti-coup de liquide.	P 29
Figure 2.18 : la bouteille de liquide.	P 29
Figure 2.19 : le voyant.	P 30
Figure 2.20 : la vanne d'inversion de cycle.	P 30
Figure 2.21 : Un système à détente direct.	P 31
Figure 2.22 : Un système mixte.	P 32
Figure 2.23: phénomènes physiques pour un séchage solaire.	P 33
Figure 2.24 : schéma d'une serre solaire a convection forcée.	P 34
Figure 2.25 : nouveau sécheur avec convection forcée et recirculation d'air.	P 34
Figure 3.1 : Eléments et mécanismes a apprendre d'un compte dans un modèle de sécheur solaire.	P 37
Figure 3.2 : Schéma des flux solaires absorbés.	P 41
Figure 3.3 : La variation de La teneur en eau finale en fonction de rayonnement global.	P 52
Figure 3.4: La variation de La Température de couverture finale en fonction de Rayonnement global	P 52
Figure 3.5 : La variation de Température de l'air intérieur en fonction de Rayonnement global.	P 53
Figure 3.6 : La variation Température de la boue en fonction de Rayonnement global	p 54
Figure 3.7 : La variation de la teneur en eau finale fonction de taux de renouvellement d'air.	
	p 54

Figure 3.8 : La variation de Température de couverture finale en fonction de taux de renouvellement d'air p 55

Figure 3.9 : La variation de Température de l'air intérieure finale en fonction de taux de renouvellement d'air. P 56

Figure 3.10 : La variation de Température de la boue finale en fonction de taux de renouvellement d'air. P 56

Figure 3.11 : La variation de température de couverture finale en fonction de rapport entre l'énergie solaire et l'énergie de la pompe à chaleur. P 57

Figure 3.12 : La variation de température de l'air intérieur finale en fonction de rapport entre l'énergie solaire et l'énergie de la pompe à chaleur. P 58

Figure 3.13 : La variation de la température de la boue finale en fonction de rapport entre l'énergie solaire et l'énergie de la pompe à chaleur. P 58

Figure 3.14 : La variation de la teneur en eau finale en fonction de rapport entre l'énergie solaire et l'énergie de la pompe à chaleur. P 59

Figure 4.1 : banc didactique d'un séchoir à plateau. P 61

Figure 4.2 : schéma d'un banc didactique. P 61

Figure 4.3 : Sécheur à convection pour des expériences de séchage sur des solides granulaires. P 62

Figure 4.4 : Soufflerie de laboratoire. P 63

Figure 4.5 : dimensionnement de banc. P 63

Figure 4.6 : organigramme de la conception. P 64

Figure 4.7 : le banc didactique finale. P 65

Figure 4.8 : schéma représentatif de la conception de la conduite principale. P 65

Figure 4.9 : schéma représentatif de la conception de système de balance. P 66

Figure 4.10 : schéma représentatif de la conception du support du sécheur. P 66

Figure 4.11 : conception de système de chauffage. P 66

Figure 4.12 : schéma électrique. P 67

Figure 4.13 : partie de commande. P 67

Figure 4.14 : schéma de l'organigramme de réalisation.	P 68
Figure 4.15 : Machines et outillages utilisés dans le cadre de notre projet.	P 69
Figure 4.16 : Une balance.	P 70
Figure 4.17 : les résistances chauffantes.	P 70
Figure 4.18 : les composants de circuit électrique.	P 70
Figure 4.19 : Photos de quelques composants et matière utilisés dans le cadre de notre projet.	P 71
Figure 4.20 : les composants du sècheur.	P 71
Figure 4.21 : les étapes de la réalisation du système de la balance.	P 72
Figure 4.22 : les étapes de réalisation du support.	P 72
Figure 4.23 : les étapes de réalisation de la partie électrique (partie de commande).	P 73
Figure 4.24 : photos de système de chauffage.	P 73
Figure 4.25 : le banc finale.	P 73
Figure 4.26 : banc didactique finale.	P 74
Figure 5.1 : organigramme de calcule de différents coefficients (χ^2 , RMSE, R^2) de chaque modèle	P 78
Figure 5.2 : Détermination des coefficients des paramètres du modèle Midilli-Kucuk en fonction de la température.	P 79
Figure 5.3 : photos représentatif le produit utilisé (pomme).	P 80
Figure 5.4:Graphe de la teneur en eau adimensionnelle de produit en fonction du temps.	P 80
Figure 5.5 : photos représentatif le produit utilisé (banane).	P 81
Figure 5.6 : Graphe de la teneur en eau adimensionnelle de produit en fonction du temps.	P 82
Figure 5.7: photos représentatif le produit utilisé carotte.	P 83
Figure 5.8 : Graphe de la teneur en eau adimensionnelle de produit en fonction du temps.	P 83
Figure 5.9 : photos représentatif le produit.	P 84
Figure 5.10 : Graphe de la teneur en eau adimensionnelle de produit en fonction du temps.	P 85
Figure 5.11 : la variation de coefficient(a) en fonction de la température.	P 86
Figure 5.12 : la variation de coefficient(k) en fonction de la température.	P 87
Figure 5.14 : la variation de coefficient(b) en fonction de la température.	P 88
Figure 5.15 : photos représentatif le produit utilisé.	P91

Liste de références

[1] Techniques de l'ingénieur – génie des procédés Séchage Théorie et calculs.

(Par André Charreau et Roland Cavaillé, j 2480-2 ; 2480-22.)

[2] Source : Le monde alimentaire, janvier-février 2001, (page 21). dans le cadre du Printemps des Sciences 2002:

<http://www.ulg.ac.be/sciences>

Université de Liège – Haute Ecole Charlemagne – Hemes

Les métiers de l'énergie – Ingénieurs de l'énergie

[3] séchage solaire :

<http://www.fao.org/docrep/X5020F/x5020F02.htm>

[4] Pages internet :

- www.busedepulverisation.fr
- www.recruporation-chaleur.fr
- www.azprocede.fr
- pops.ulg.ac.be
- helianthe.pagesperso-orange.fr

[5] Contact: T. Saleh & M.A.R. Sarkar, Department Of Mechanical Engineering, Bangladesh University of Engineering & Technology (BUET). Dhaka 1000, Bangladesh

[6] M. Daguenet :

Les séchoirs solaires: théorie et pratique, 1985.

[7] R. BENKHELFELLAH, S. EL MOKRETAR, R. MIRI et M. BELHAMEL :

(Séchoirs solaires. Etudes comparative de la cinétique de séchage des produits agroalimentaires dans des modèles de types direct et indirect).

[8] O. Kricher & K. Kroll, 1963, Technique de séchage, 2^e édition de (Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, Springer Verlag (1956)) Traduite par CETIAT, Orsay

[9] Robin Alexandre : Sécheur solaire 2003 / 2004.

[10] R. MIRI, O. MOKRANI, F. SIAD et M. BELHAMEL :

Etude Expérimentale d'un Séchoir Solaire », Rev. Energ. Ren. : Zones Arides (2002)

[11] SMSTS'2008: Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect

[12] Mémoire de fin étude pour obtenir le grade de doctorat de Rayan SLIM :

Etude et conception d'un procédé de séchage combiné de boues de stations d'épuration par énergie solaire et pompe à chaleur. Engineering Sciences (Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2007). French.

[13] AZOUZZI Marouane et AIT YOUNS Omar Mémoire de fin étude :

(Valorisation des boues de la station d'épuration de la ville de Marrakech) pages [39-41]

[14] TELLI SIDI MOHAMED –mémoire de fin étude :

Etude sur la valorisation par séchage solaire Des boues d'épuration des Eaux urbaines – cas de la station d'Office Nationale d'Assainissement (ONA)- Tlemcen

[15] Donald G. Mercer, Ph.D., P.Eng. FIAFoST. University of Guelph - Department of Food Science- Ontario, Canada:

ISBN 978-0-88955-621-8 © 2014

[16] R. DAGHIGH, K. SOPIAN, M.H. RUSLAN, M. A. ALGHOUL, C. H. LIM, S. MAT, B. ALI, M. YAHYA, A. ZAHARIM, M.Y.SULAIMAN ,Survey of Hybrid Solar Heat Pump Drying Systems.

(Solar Energy Research Institute), University Kebangsaan Malaysia (UKM), 43600.

[17] KHATIR AHMED.

Conception et Réalisation d'un Banc Didactique d'une pompe à chaleur géothermique couplée à un système de chauffage basse température. Master en Energies Renouvelables., Université SAAD DAHLEB de BLIDA, Soutenu le 8 Octobre 2014.

[18] <http://www.les-energies-renouvelables.eu/>

[19] SENDJASNI HAYET, BENARROUR SARAH.

Etude des techniques de dégivrage dans l'installation frigorifique. Génie Thermique et Energétique. Université SAAD DAHLEB de BLIDA, Promotion : 2014 /2015.

[20] sechage-assiste.pac-hal.pdf: Rayan Slim.

Etude et conception d'un procédé de séchage combiné de boues de stations d'épuration par énergie solaire et pompe à chaleur. Engineering Sciences. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2007. French. <NNT:2007ENMP1483>.<pastel-00003485>

[21] thèse présentée pour obtenir le grade de doctorat par haoua amado :

(Modélisation du séchage solaire sous serre des boues de stations d'épuration urbaines)

[22] page internet : <http://www.gunt.de>

[23] page internet : www.edibon.com

[24] page internet : www.armfield.co.uk/uop8mkii

[25] CICME'2008: Séchage du raisin en plein air, dans un séchoir et sous serre

[26] Boumediene TOUATI, Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte

[27] Introduction to the Dehydration and Drying of Fruits and Vegetables, Donald G. Mercer, Ph.D., P.Eng, FIAFoST, Department of Food Science University of Guelph Ontario, Canada

[28] Aida BAYOUDH, Jalila SGHAIER et Hatem MHIRI, Modélisation de séchage solaire sous serre des boues des stations d'épuration

[29] Elias KINAB, Optimisation des performances nonnominale des pompes à chaleur réversible pour le secteur tertiaire.

INTRODUCTION GENERALE

Le séchage est un procédé d'extraction d'eau d'un solide, d'un semi-solide ou d'un liquide par évaporation. Cette opération nécessite une source de chaleur.

Le séchage au soleil est la technique la plus ancienne et la plus répandue de conservation des aliments à travers le monde, principalement dans les pays en voie de développement qui sont souvent les plus ensoleillés mais aussi les plus nécessiteux.

Le but de ce travail est de développer un modèle mathématique permettant de décrire les transferts de chaleur et de matière au niveau de produit et de simuler le fonctionnement du séchoir lorsqu'il est couplé à une pompe à chaleur.

La simulation numérique est très intéressante car elle permet de tester, en évitant le coût de la construction, l'influence des divers paramètres des transferts thermiques sur la variation de la teneur en eau de produit et de choisir le modèle de séchoir réalisant les meilleures performances.

Cette technique a fait l'objet de nombreuses communications scientifiques et demeure encore de nos jours un domaine de recherche privilégié notamment dans les pays où l'utilisation des méthodes traditionnelles s'impose toujours.

Notre mémoire est structuré en 5 chapitres :

Après l'établissement de la terminologie du séchage et des différents mécanismes intervenant au cours du séchage, jugés importants, afin de pouvoir poursuivre le déroulement de ce mémoire; quelques application de séchage dans le domaine industriel, ainsi que la présentation de quelques produits avant et après séchage.

Le chapitre 2 est consacré à l'étude du principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur car dans notre cas elle sera couplée au système de séchage.

Le chapitre 3 s'articule autour d'une modélisation rigoureuse intégrant d'une part l'ensemble des processus physique qui régissent les échanges thermique entre la couverture de la serre, l'air intérieur et la boue, et d'autre part les caractéristiques de la boue. Les différentes courbes sont représentées et discutées.

Dans le chapitre 4 on a présenté différent banc didactiques et leur fonctionnement avant la conception et la réalisation d'un sécheur à plateau. Nous terminerons par le chapitre 5 où une étude sera consacrée à la modélisation de la cinétique de séchage de quelques produits alimentaires.

Nous avons achevé notre mémoire par une conclusion générale et les perspectives qui peuvent être dégagées logiquement de ce travail.

1.1 Définition du séchage:

C'est l'opération unitaire ayant pour but d'éliminer partiellement ou totalement l'eau déshydratation à un sens plus restrictif : il ne concerne que l'élimination de l'eau dans un solide ou dans un liquide.

Deux principaux mécanismes ont été avancés pour expliquer le mouvement de l'eau à l'intérieur des corps à sécher :

- la diffusion.
- la migration capillaire.

La diffusivité dépend de nombreux facteurs comme la nature du solide et celle de l'humidité, le taux d'humidité et la température. [1]

1.2 Séchage et énergie :

Afin de sécher un produit, liquide ou solide, il faut fournir de la chaleur, de l'énergie. Globalement on considère que les opérations de séchage consomment environ 15 % de l'énergie industrielle dans les pays développés. Cette part est importante et il faut essayer de trouver les moyens d'optimiser les procédés, dans une démarche économique mais aussi écologique.

Toutes les parties d'un même produit n'ont pas le même comportement vis à vis de l'eau. Cela varie aussi d'un produit à l'autre, suivant sa composition biochimique : certaines structures ou molécules retiennent l'eau plus que d'autres. Lorsque le produit est très humide, l'eau qu'il contient est qualifiée de "libre". Lors du séchage, l'eau libre se comporte comme de l'eau pure. Il suffit pour la vaporiser d'environ 2250 kJ/kg. Lorsque le produit est plus sec, l'eau est d'avantage retenue par celui-ci et on la qualifie de "liée". L'évaporation de cette eau est plus difficile et demande plus d'énergie.

Au cours du séchage c'est d'abord l'eau libre qui va être évaporée, puis l'eau de plus en plus liée : aussi la quantité d'énergie nécessaire pour vaporiser la même quantité d'eau augmente au cours du séchage.

Le dernier gramme d'eau évaporé coûte beaucoup plus d'énergie que le premier. Ceci est illustré dans le tableau suivant qui reprend la consommation globale de différents types de sècheurs, rapportée à la masse d'eau évaporée. [2]

Type de sécheur	Consommation en énergie (kJ/kg d'eau évaporée)
Atomiseur	5000
Sécheur à tambour (rotatif)	5000
Sécheur tunnel	4000

Tableau 1.1 : consommation d'énergie en fonction de différents types des sècheurs. [2]

1.3 Intérêt du séchage :

Le séchage a pour intérêt [3]:

- D'alléger le produit.
- De permettre (ou de faciliter) surtout sa conservation par diminution de l'activité de l'eau. Mais en revanche :
- Il modifie le produit dans sa forme, sa texture, son goût, ses qualités, ce qu'est souvent considéré comme un inconvénient.
- Il est coûteux, notamment en énergie. Il est utile alors de connaître tout ce qui peut influencer le séchage et en particulier la vitesse de séchage afin de diminuer le coût de cette opération.

1.4 Différents méthodes du séchage

1.4.1 Séchage mécanique :

C'est l'élimination du liquide par des forces purement mécaniques (pressage, Centrifugation...). Certains processus de pré concentration et de pré séchage peuvent se réaliser sans transfert thermique mais par simple transfert de quantité de mouvement. [2]

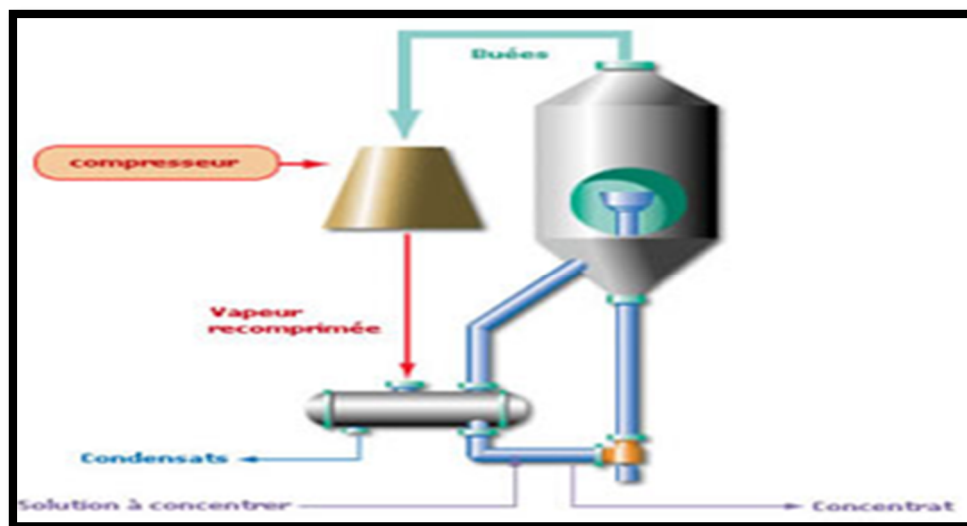


Figure 1.1 : schéma représente le Séchage mécanique

1.4.2 Séchage chimique :

C'est un procédé basé sur l'utilisation de produits déshydratants (osmotique) (chlorure de calcium,...) pour extraire l'eau. [2]

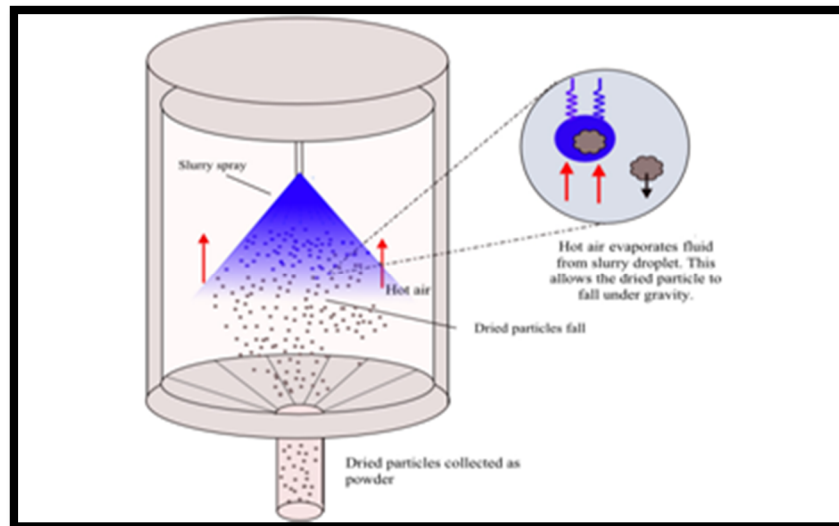


Figure 1.2 : schéma représente le Séchage chimique. [4]

1.4.3 Séchage thermique :

Ce type d'opération est essentiellement un transfert de masse nécessitant au préalable une «activation» de l'eau par une certaine quantité d'énergie apportée par un transfert de chaleur. Les deux transferts se dédoublent en une phase externe et une phase interne :

- Transfert de chaleur interne, de la source de chaleur vers la surface du produit.
- Transfert de chaleur interne, de la surface vers le cœur du produit.
- Transfert de masse interne, du cœur vers la surface du produit.
- Transfert de masse externe de la surface du produit vers le milieu extérieur.

Le séchage thermique se divise lui-même en deux types :

a) Séchage par ébullition :

L'allure à laquelle s'évapore l'eau est déterminée par l'allure d'apport de la chaleur latente d'évaporation. Cet apport est effectué :

- Par conduction, à partir d'une surface chauffée au contact du produit.
- Par génération interne de chaleur due à l'exposition à un rayonnement infrarouge ou de micro-ondes ou par un chauffage diélectrique
- par convection, à partir de vapeur d'eau surchauffée ou d'un liquide chauffant. [2]

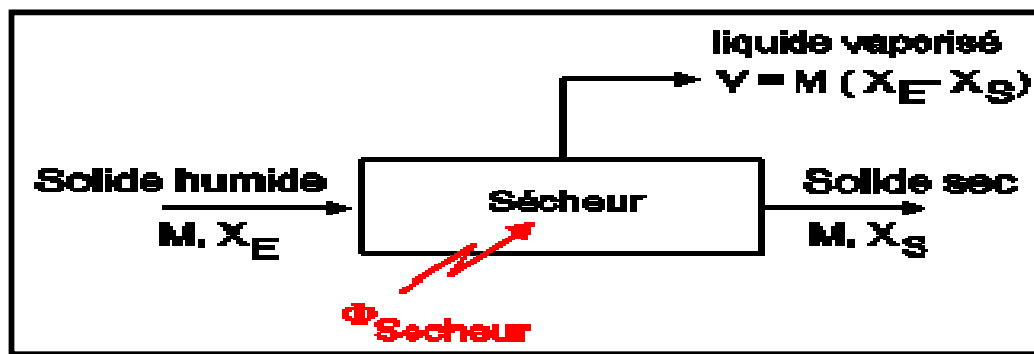


Figure 1.3 : schéma représente le séchage par ébullition. [4]

b) Séchage par entraînement :

Lorsqu'un corps humide est placé dans un courant d'air (ou dans un autre gaz) Suffisamment chaud et sec, il s'établit spontanément entre ce corps et l'air un écart de température et de pression partielle d'eau tels que :

- Un transfert de chaleur s'effectue de l'air vers le produit sous l'effet de l'écart de température.
- Un transfert d'eau s'effectue en sens inverse du fait de l'écart de concentration en eau dans l'air. Le séchage par entraînement est plus important par rapport au séchage par ébullition. [2]

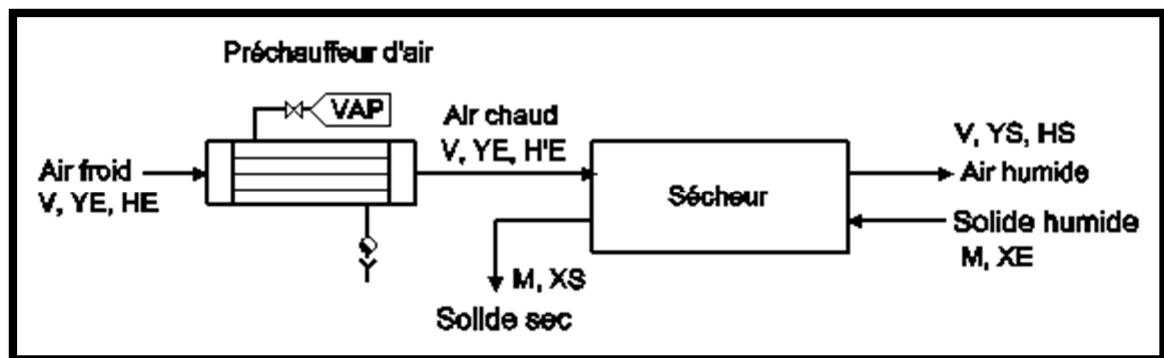


Figure 1.4 : schéma représente le Séchage par entraînement. [4]

1.5 Modes de séchage :

La vaporisation du solvant contenu dans un produit à sécher peut être effectuée par abaissement de la pression dans l'enceinte contenant le produit. Cependant, dans la plupart des cas, la vaporisation est effectuée en utilisant une source d'énergie extérieure au produit. Le séchage fait appel aux trois modes de transfert de chaleur :

- convection
- conduction
- rayonnement

Ceux-ci sont utilisés seuls ou combinés entre eux.

1.5.1 Séchage par convection :

C'est le mode de séchage le plus utilisé dans l'industrie chimique, l'échange thermique est réalisé grâce à contact direct entre le solide humide et le gaz caloporteur. Il s'agit probablement du mode de transfert d'énergie le plus courant.

Il consiste à mettre en contact un gaz (air) s'écoulant en régime généralement turbulent autour à sécher du corps qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de films ou de plaques. [1]

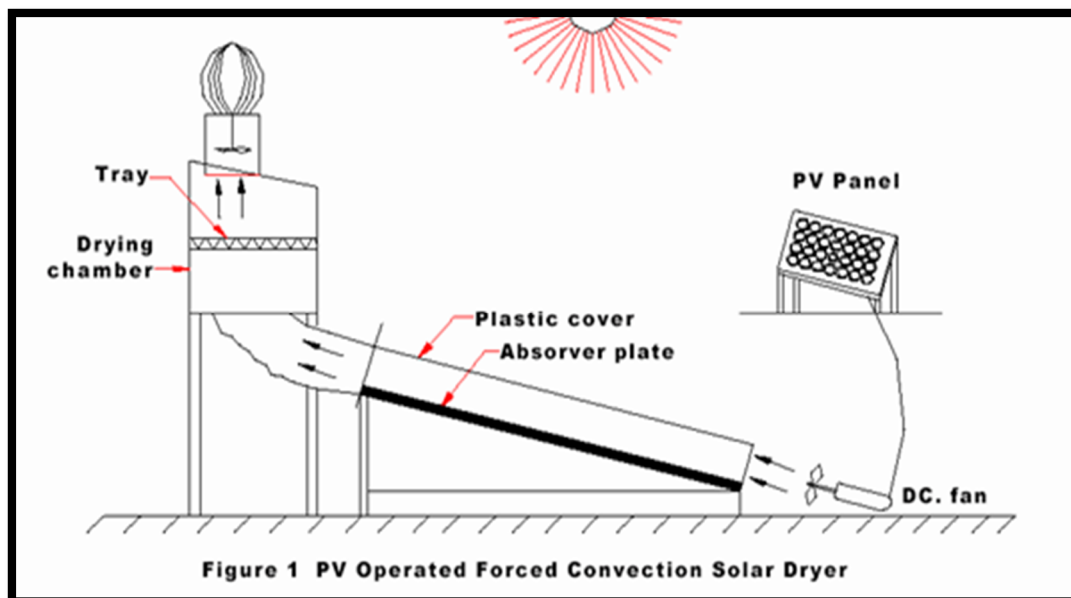


Figure 1.5 : schéma représente le Séchage par convection forcée. [5]

1.5.2 Séchage par conduction :

L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée non pas par un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais par contact direct entre le produit et une paroi chauffée.

Les vapeurs libérées par le séchage sont aspirées (séchage par ébullition) ou entraînées par un gaz de balayage dont le débit est toujours faible en comparaison de celui nécessaire à un séchage convectif.

Plus le gradient de température entre la paroi et le produit sera faible et plus la surface d'échange devra être importante. [1]

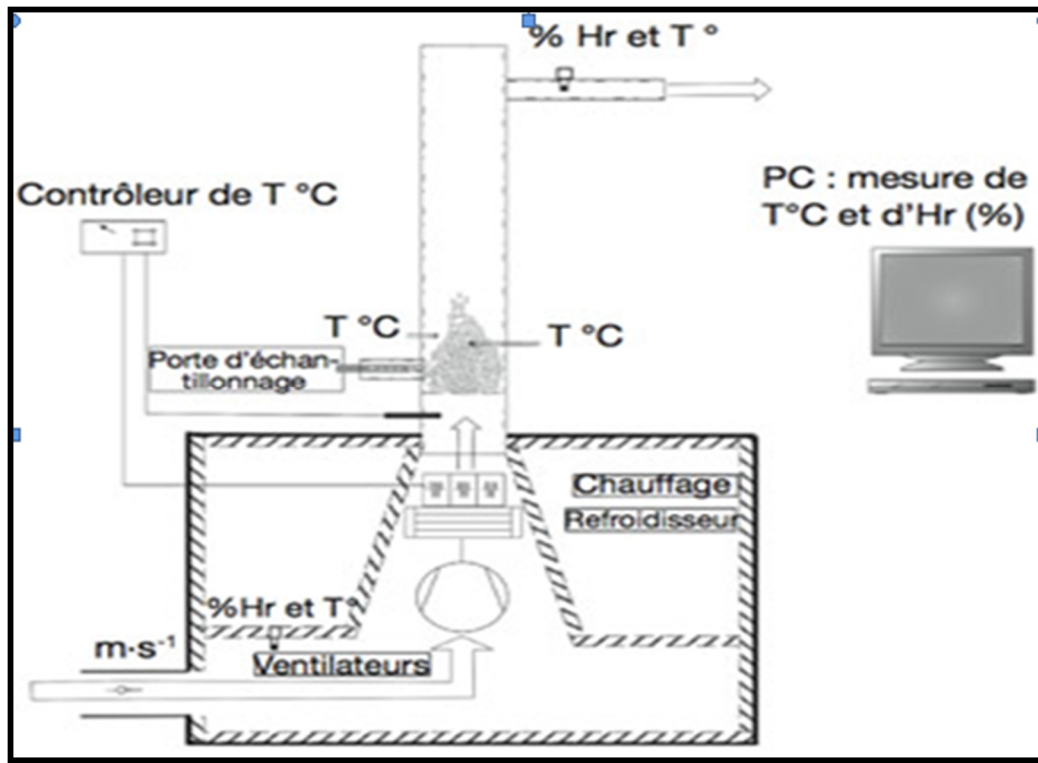


Figure 1.6 : schéma représente le Séchage par conduction. [4]

1.5.3 Séchage par rayonnement :

Dans ce mode de séchage, l'énergie nécessaire à l'évaporation est transmise par rayonnement. Ce procédé de séchage sécher n'est pas thermosensible. Les sources chaudes émettrices peuvent être des émetteurs au est très efficace pour l'élimination de l'eau, surtout lorsque le produit à gaz combustible, des émetteurs électrique, ou de soleil. [1]

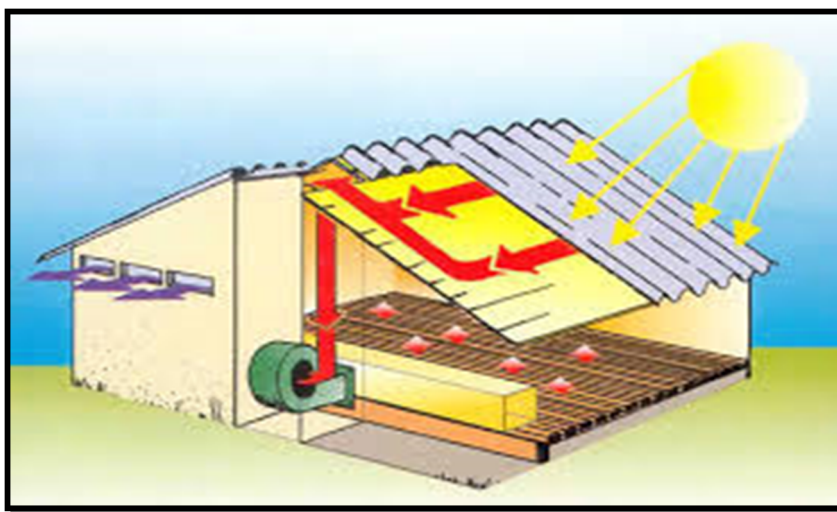


Figure 1.7 : schéma représente le Séchage par rayonnement. [4]

1.6 Caractéristiques de l'air de séchage :

a) Humidité :

Ce terme désigne le liquide contenu dans le corps solide, liquide ou pâteux, et devant être éliminé au cours du séchage.

b) Humidité absolue :

On appelle humidité absolue ou teneur en humidité, la masse d'humidité mélangée à un kilogramme de gaz sec.

c) Humidité relative :

L'humidité relative ou degré hygrométrique est le rapport de la pression partielle de la vapeur dans le mélange, à sa pression de saturation dans le même mélange, pris à la même température.

d) Température sèche :

On nomme température sèche d'un gaz la température indiquée par une sonde de température placée dans le courant gazeux. Il s'agit de la température d'un gaz au sens Courant.

e) Température humide du gaz :

On nomme température humide (ou température de bulbe humide) la température donnée par une sonde enrobée d'une mèche placée dans le courant gazeux et humidifiée en permanence par de l'eau pure. Il faut retenir que la température humide est la température par un solide humide durant la phase à vitesse constante d'un séchage par entraînement.

f) Caractéristiques des solides humides :

Le solide a un film d'eau adhérent à sa surface externe par des forces superficielles. Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air saturé en eau, c'est-à-dire de l'air contenant de la vapeur d'eau à une pression partielle égale à la tension de vapeur qui serait seule présente dans une enceinte, à la même température. [6]

1.7 Cinétique de séchage

1.7.1 Temps de séchage :

Le temps de séchage dépend de l'ensoleillement, de l'humidité de l'air et de l'épaisseur des aliments, plus les aliments sont épais plus le temps de séchage sera long. De manière générale, les plantes sécheront plus rapidement (quelques heures) que les fruits plus juteux (plusieurs jours). [7]

1.7.2 Période de séchage :

La vaporisation de l'eau s'effectue en surface du produit. Le transfert de l'eau de l'intérieur vers la surface du produit conditionne fortement la vitesse de séchage et explique la forme des courbes d'évolution en fonction du temps.

De fait, pour comprendre les phénomènes de migration de l'eau dans les produits humides, on doit considérer simultanément les transferts de masse et de chaleur dans toutes les phases (solides, vapeur et liquide), qui tiennent tour à tour un rôle prépondérant.

Sur la figure 1.8, on peut distinguer plusieurs phases dans le phénomène de séchage. La courbe (a) présente l'évolution de la teneur en eau (rapport de la masse d'eau contenue dans le produit et de la masse sec) d'un produit soumis à un séchage convectif. On y distingue trois phases, également visibles sur la courbe (b) donnant la vitesse de séchage en fonction du temps t et la courbe (c) illustrant l'évolution de la température du produit en fonction du temps. [8]

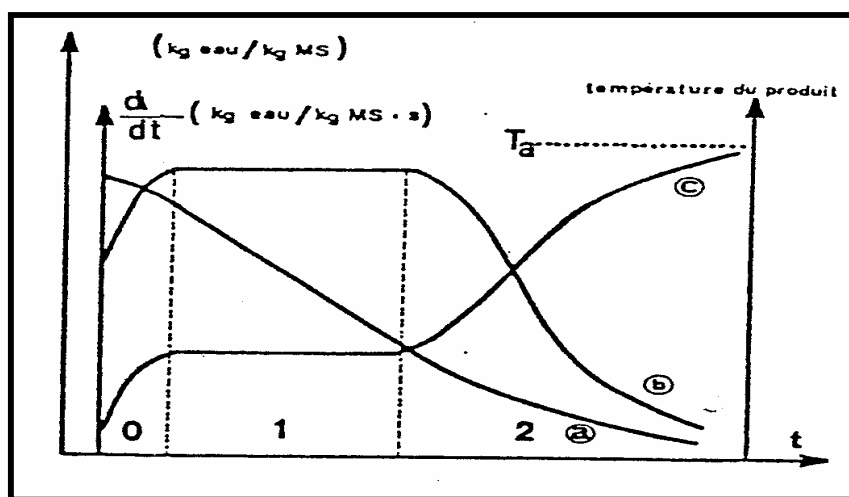


Figure 1.8 : Courbes d'évolution type au cours du temps de la teneur en eau du produit (a), de la vitesse de séchage (b) et de la température du produit (c). [8]

Ces trois phases sont :

- Phase 0 : **Période de mise en température.**
- Phase 1 : **Période à allure constante.**
- Phase 2 : **Période de ralentissement.**

a) Phase 0 : période de mise en température :

L'échange de chaleur et de matière ont lieu entre le produit et l'air asséchant. Pour être emportées sous forme de vapeur les quantités d'eau contenues dans le produit exigent un apport correspondant de l'énergie de vaporisation.

L'excès de chaleur fournie par l'air amène le produit à s'échauffer d'avantage ce qui aboutit à un équilibre du bilan de chaleur. Si par contre, la température de surface du produit est trop élevée, le déficit énergétique entraînerait un refroidissement du produit.

La période de mise en température est courte et n'apparaît véritablement que si les produits sont de grande taille, ou si la différence de température entre l'air et le produit est important. Ce qui explique le peu d'intérêt manifesté par les chercheurs dans l'étude de cette phase. [8]

b) Phase 1 : période à allure ou vitesse de séchage constante :

Cette phase d'évaporation est observable tant que la vitesse de transport de l'eau liquide dans les pores du produit vers sa surface est un phénomène rapide devant la vitesse globale d'évaporation. La durée de cette phase diminue lorsque le taux d'humidité de l'air de séchage diminue, la vitesse de l'air de séchage augmente, entraînant une augmentation des coefficients de transfert de matière et de chaleur, la surface d'échange air produit augmente (par exemple en divisant le produit à traiter, la température de séchage augmente). [8]

c) Phase 2 : Période de ralentissement:

Cette période est caractérisée par une diminution de la vitesse de séchage. Le ralentissement de la vitesse de séchage est dû aux contraintes de la migration de l'eau de l'intérieur du produit vers sa surface. Plusieurs phénomènes et propriétés sont à prendre en compte disparition de l'eau libre en surface de produit, ce phénomène correspond au début du ralentissement de l'allure de séchage. En admettant que la migration de l'eau libre et de l'eau liée contenues dans le produit s'effectue consécutivement sous forme liquide et vapeur, il faut envisager l'existence d'un front de vaporisation qui s'enfonce progressivement à l'intérieur du produit. L'épaisseur du produit si cette épaisseur est de plus en plus croissante, cela signifie que la vapeur d'eau doit traverser un parcours plus long expliquant ainsi et en grande partie le ralentissement de l'allure de séchage. [8]

Cette phase dépend essentiellement des propriétés du produit et de diffusion de l'eau dans le produit, l'influence des conditions d'écoulement de l'air asséchant est secondaire.

La théorie la plus simple dans cette phase est celle de la diffusion qui suppose que le mouvement de l'eau vers la surface du produit est gouverné par la seconde loi de Fick qui établit une relation linéaire entre le flux de matière Φ_m (kg/m²s) et le gradient de concentration volumique de l'eau C (Kg eau/ m³), au sein d'un volume de produit :

$$\Phi_m = - D \cdot \text{grad } C$$

Φ_m : le flux de matière ($\text{kg/m}^2\text{s}$)

grad C : le gradient de concentration volumique de l'eau C (Kg eau/ m^3),

D_e : est la diffusivité de l'eau dans le produit à sécher ($\text{en m}^2/\text{s}$). [8]

1.8 Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage :

a) Influence de la température de l'air :

La température de l'air asséchant influe considérablement sur la vitesse de séchage.

Cette influence est due à l'apport de chaleur au produit qui croît avec la température de l'air. Elle est aussi due à la température du produit qu'est d'autant plus importante que la température de l'air élevée. Par conséquent, les vitesses de diffusion de l'eau dans le produit augmentent avec la température. [8]

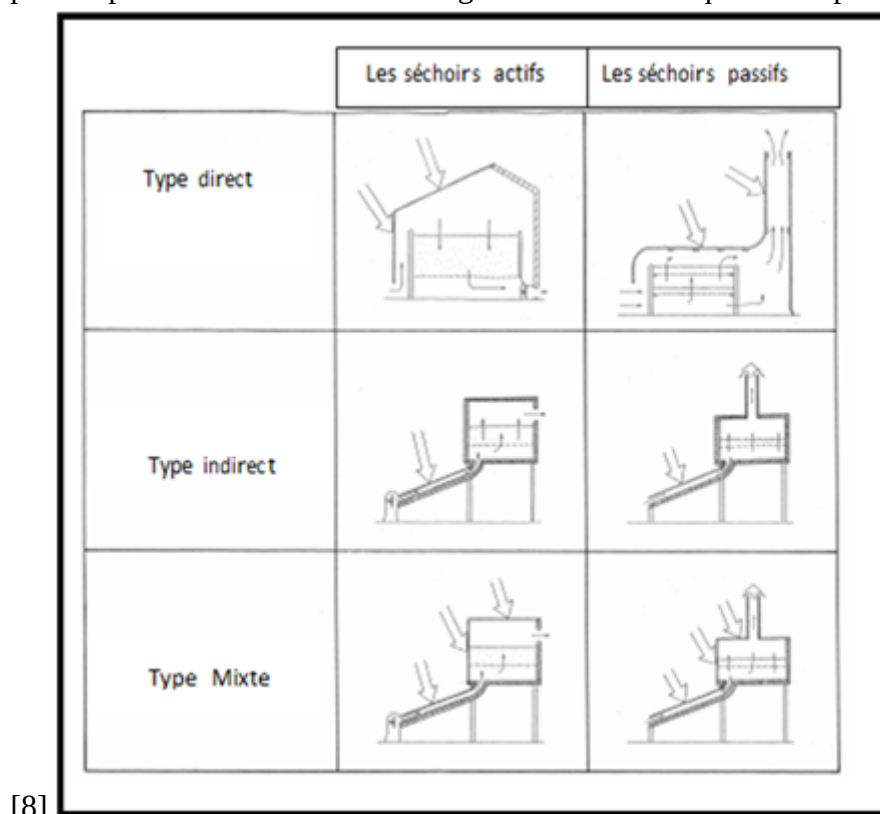
b) Influence de la vitesse de l'air :

La vitesse de l'air agit positivement sur la cinétique de séchage surtout au début de l'opération. Cependant, pour des produits dont la cinétique de séchage est contrôlée par la migration interne de l'eau, l'influence de la vitesse de séchage de l'air devient très faible. [8]

C) Influence de l'humidité de l'air :

La teneur en eau de l'air, joue un rôle important sur le comportement des cinétiques de séchage de certains produits. De même que pour la vitesse de l'air, cette influence est

plus importante au début de séchage et diminue lorsque la température de l'air augmente.



1.9 Les Séchoirs solaires :

C'est un dispositif qui permet le séchage de produits à conserver. Il existe plusieurs types de séchoirs solaires:

➤ **Les séchoirs solaires directs :**

Dans ces séchoirs le rayonnement atteint directement le produit.

➤ **Les séchoirs solaires indirects :**

Dans ce cas le produit est à l'abri du rayonnement solaire. Elle est moins rapide que les séchoirs directs

➤ **Les séchoirs solaires hybrides :**

Pour les séchoirs hybrides en plus de l'énergie solaire, il y a une énergie d'appoint (électrique, biomasse...) pour assurer un niveau élevé de chauffage solaire, ou pour assurer la ventilation.

➤ **Les séchoirs solaires mixtes :**

La chaleur nécessaire au séchage est fournie par l'action combinée du rayonnement solaire qui frappe directement le produit et de l'air préchauffé dans les capteurs solaire.

Les principaux types de séchoirs à énergie solaire sont illustrés dans la figure 1.9.

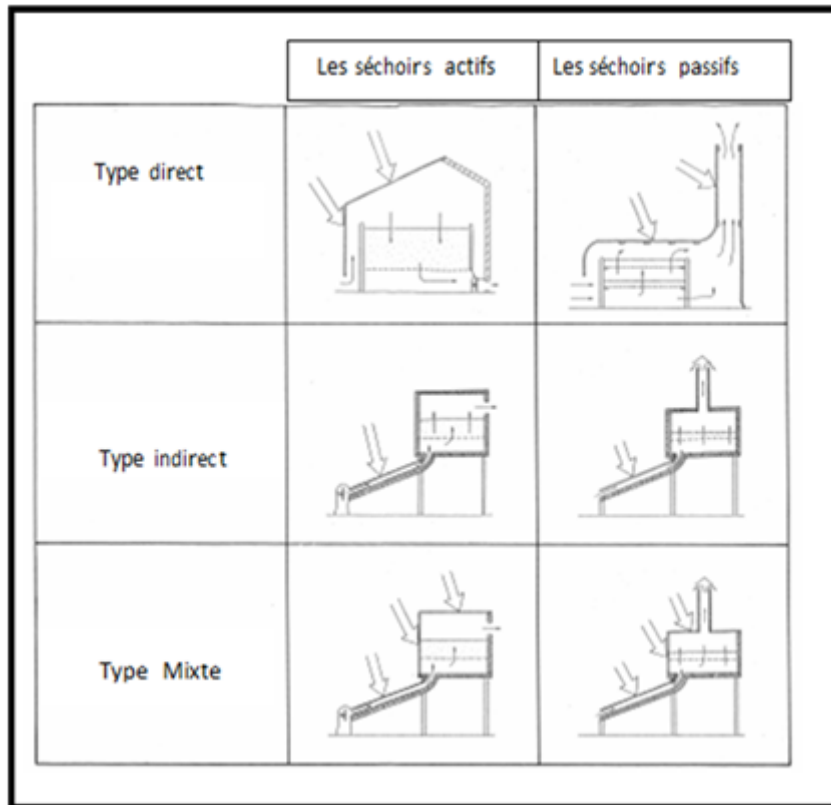


Figure 1.9 : Représentation typique des séchoirs solaires. [9]

D'après Nonhebel, la sélection d'un séchoir représente un compromis entre le coût du séchoir, la qualité du produit, mesure de sécurité et commodité d'installation. Dans l'évaluation d'un séchoir solaire, les paramètres généralement mesurés et reportés peuvent être catégorisés comme suit:

1.9.1 Séchoirs solaires directs et indirects :

Il existe deux grands types de séchoirs solaires : Les séchoirs solaires directs et les séchoirs solaires indirects. « Tous les avis examinés s'accordent sur des températures de séchage comprises entre 35° et 82°C et de 43.5 à 60°C sont les plus communes. »



Figure 1.10 : photos représentatif de séchoir direct (a) et séchoir indirect(b). [7]

A) Le séchoir solaire direct :

Le séchage solaire direct utilise les rayons directs du soleil pour sécher les aliments. Il est simple à réaliser. Il nécessite par exemple une boîte en bois ou en carton, trouée en bas et en haut pour laisser l'air froid entrer par le bas et l'air chaud sortir par le haut. Cette boîte contient les claies où seront sécher les aliments, elle est recouverte d'une vitre pour augmenter l'effet de serre.

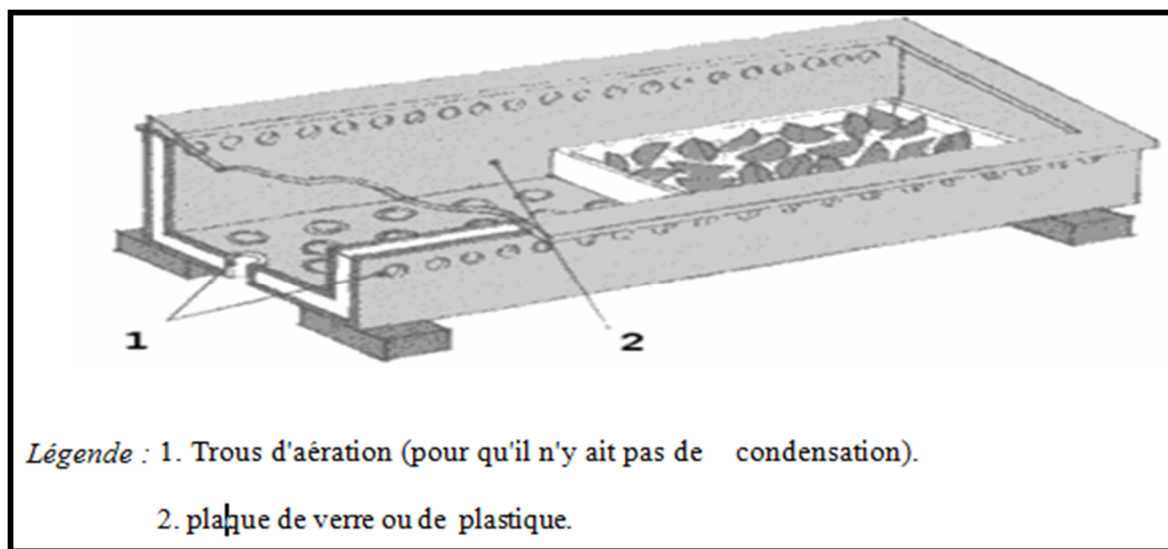


Figure 1.11 : Exemple de séchoir solaire direct. [7]

Par contre, le rayonnement ultra-violet détériore les vitamines, les protéines et la couleur des aliments. Les denrées n'ont plus la même saveur ni la même qualité nutritive. [7]

B) Le séchoir solaire indirect :

Figure1.12 : photos représentes des séchoirs solaire indirect. [10]

La vitre doit être inclinée environ à la même latitude que le lieu où va être utilisé le séchoir solaire.

Il faut trouver la bonne température dans l'habitacle de séchage : une température trop élevée cuirait les aliments et une température trop basse les laisserait pourrir. La trappe d'air permet de réguler la sortie d'air et ainsi de jouer sur la température intérieure. Un thermomètre placé à l'intérieur de l'habitacle permet de contrôler la température.

Un filet à petite maille ou une moustiquaire doivent être placés à l'entrée et à la sortie de l'air pour éviter les intrusions d'insectes non désirés.

Le séchage solaire indirect permet de sécher les fruits, les plantes grâce au soleil sans que les rayons du soleil atteignent directement ce qui est séché ainsi la couleur, le goût et les propriétés du fruit ou de la plante sont conservées (vitamines, matières nutritives). [11]

C) Séchoir direct et indirect (système combiné) :

Ce séchoir combine les deux types de séchage: séchage direct et séchage indirect. [11]

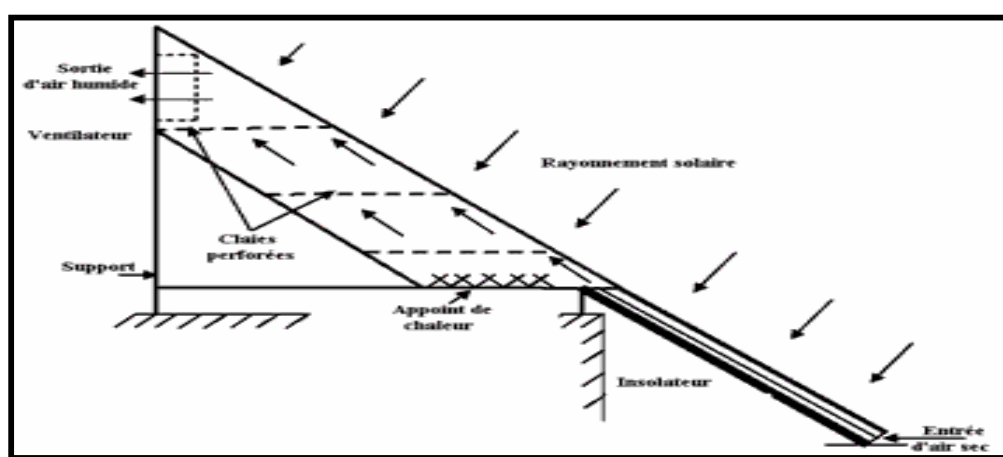


Figure 1.13: Vue latérale du système (séchoir - capteur). [11]

1.10 Séchoir solaire sous serre :

1.10.1 Séchage solaire des boues :

Le séchage solaire sous serre des boues est une technique toute récente où la problématique industrielle bute sur deux points clés : le dimensionnement des procédés et une meilleure connaissance des propriétés thermophysiques de la boue.

Concernant le premier point, le séchage solaire sous serre implique un bon transfert thermique à l'intérieur de la serre favorisant l'évaporation. À l'heure actuelle, le dimensionnement et les méthodes de conception des unités sont assez empiriques. Un outil prédictif capable de guider le concepteur serait un atout majeur.

Le second point important concerne la caractérisation de la boue en vue de séchage.

De ce point de vue, la notion d'eau libre-eau liée qui permet d'évaluer la disponibilité de l'eau contenue dans le matériau à sécher, est fondamentale en séchage. L'une des méthodes permettant de mesurer cette grandeur est la mesure d'isotherme de sorption.[12]



Figure1.14 : image représente une serre solaire. [12]

1.10.2 Le principe de séchage des boues par effet de serre :

Le séchage solaire consiste à mettre en contact, sous une serre, un air régulièrement renouvelé et une boue répartie sur une dalle en béton et remuée mécaniquement. Entre l'entrée et la sortie de la serre, l'air se charge de vapeur d'eau, aux dépens de la boue qui s'assèche. Un système de ventilation assure le renouvellement de l'air dans le but d'évacuer la vapeur d'eau s'échappant de la boue. La quantité d'eau évaporée dépend toutefois des caractéristiques de l'air et de celles de la boue. Les étapes de séchage des boues dans la serre sont les suivantes [13]:

- 1ère phase : Réchauffement de la boue.
- 2ème phase : Régime superficielle.
- 3ème phase : Ralentissement.

1.10.3 Les sécheurs directs et indirects des boues :

a) Sécheurs directs :

La boue à sécher est entraînée dans un courant de gaz chaud. La boue se déplace dans un tambour rotatif principalement à l'état fluidisé, ou du moins finement divisé. Aussi est-il nécessaire d'introduire la boue dans le tambour sous une forme déjà divisée, ce qui nécessite de recycler une partie de la boue séchée. Corrélativement,

cette boue ne peut sortir que dans un état de siccité poussé (séchage poussé), un degré moindre de séchage étant obtenu par remélange avec de la boue déshydratée. [14]

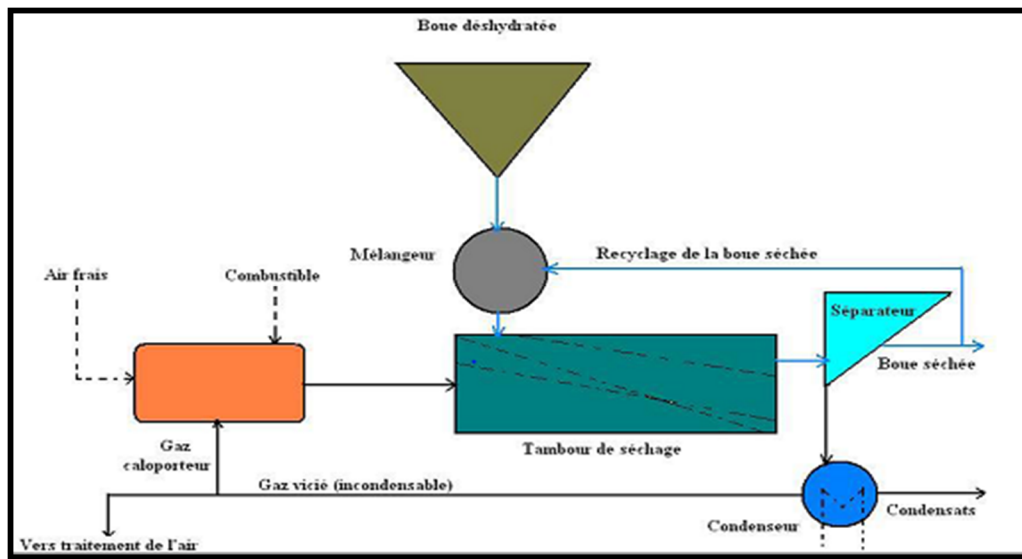


Figure1.15 : Schéma d'un sécheur thermique direct des boues. [14]

b) Sécheurs indirects :

Ces sécheurs comportent classiquement un stator constitué d'un fût cylindrique, fixe et horizontal, muni de racleurs et un rotor comportant des palettes agitatrices. Le fluide caloporteur circule généralement dans l'arbre du rotor et éventuellement dans une double enveloppe du stator. [14]

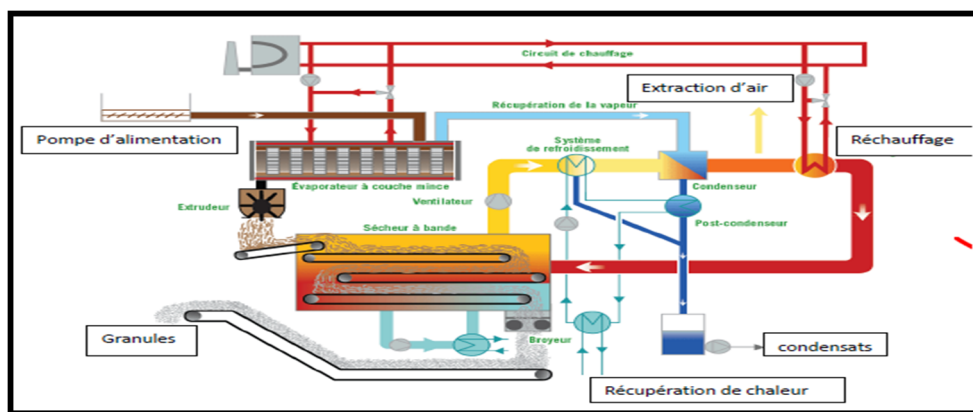


Figure 1.16 : Schéma d'un principe de fonctionnement d'un sécheur indirect des boues.[14]

1.10.4 Séchage des produits agricoles :

On peut citer quelques produits :

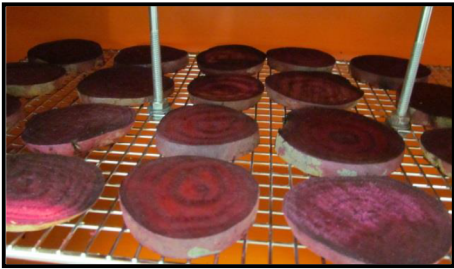
produit	Avant le séchage	Après le séchage
Pomme		
betterave		
carotte		
aubergine		

Tableau 1.2: quelques produits agricoles avant et après le séchage. [15]

1.10.5 Différents types de la serre solaire :

Il existe deux types de serre dont le choix dépend de condition d'installation et de la garantie demandée :

➤ **La serre ouverte :**

La serre ouverte à des ouvertures en partie basses et en partie hautes afin de favoriser la convection naturelle (cas typique de la serre horticole) et est diminuée de port. [12]

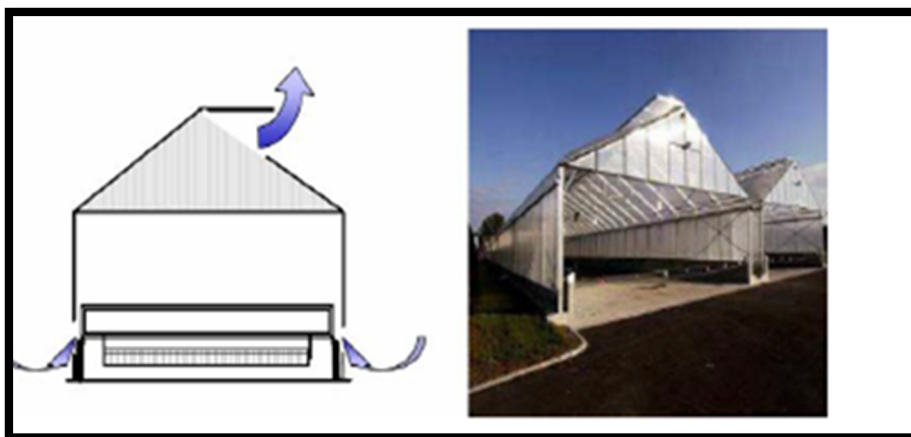


Figure 1.17 : exemple de serre ouverte. [12]

➤ **La serre fermée :**

La serre fermée ne contient aucune ouverture libre. La ventilation de la serre est exclusivement forcée celle-ci est effectuée par des ventilateurs situés en pignon ou par une cheminée dans le cas d'un environnement sensible.

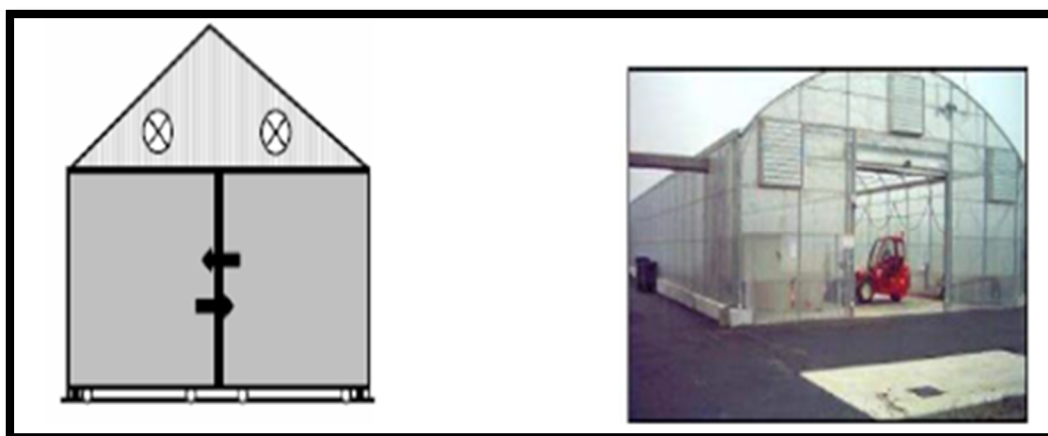


Figure 1.18 : exemple d'une serre fermée (extraction en pignon). [12]

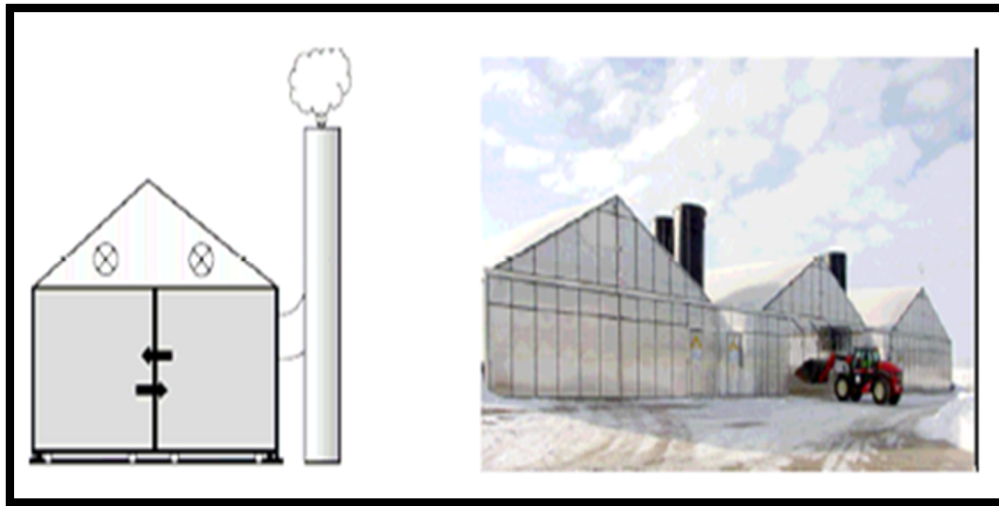


Figure 1.19 : exemple d'une serre fermée (extraction par cheminée). [12]

1.10.6 Phénomène physique de la serre solaire :

Le séchage solaire, sous une serre, d'un air régulièrement renouvelé. Un système de ventilation assure un écoulement de l'air dans la serre afin de favoriser le transfert de l'eau interstitielle dans l'atmosphère et d'évacuer l'air humide.

Les éléments de base à représenter pour construire un modèle de sécheur solaire direct sont les suivants:

L'environnement extérieur, la couverture, l'air intérieur, le produit à sécher et le support sur lequel repose le produit.

Les différents modes de transferts thermiques mis en jeu dans la serre sont [12] :

- Les apports solaires au travers du matériau de la couverture.
- Les échanges radiatifs de grande longueur d'onde entre les différents éléments.
- Les échanges de convection à la surface de la couverture et à celle du produit.
- L'évaporation au niveau du produit.
- Le renouvellement d'air dû à la perméabilité de la serre ou à une ventilation mécanique.

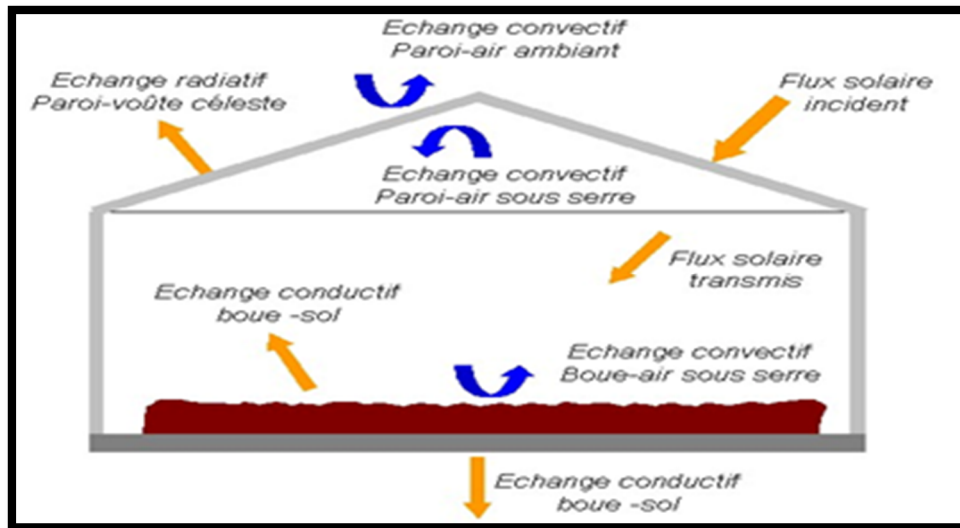


Figure 1.20: Phénomènes physiques pour un séchage solaire sous serre. [12]

1.11 Choix du type de séchoir :

Le choix est dicté par les paramètres suivants [6]:

a) Caractéristiques physiques du séchoir :

- Type, taille, forme.
- Capacité de séchage.
- Modalité de chargement et de déchargement.

b) Performances thermiques :

- Temps de séchage/taux de séchage.
- Température de l'air sécheur et l'humidité relative.
- Débit d'air.
- Efficacité du séchage.

c) Qualité du produit séché :

- Qualité sensorielle (couleur, saveur, goût, texture, arôme).
- Propriétés nutritives.
- Capacité de réhydratation.

d) Coût du séchoir et période d'amortissement :

Dans un premier temps, on s'est basé sur la qualité du produit, pour cela nous avons opté pour les séchoirs solaires indirects.

1.13 Conclusion :

Le séchage est une opération importante dans les domaines agricoles et industriels et les séchoirs solaires se divisent en deux catégories: les séchoirs directs où les produits sont exposés directement au soleil et les séchoirs indirects où le produit n'est pas exposé directement au soleil.

Le mode plus utilisé c'est le séchoir à convection forcée à cause de bonne adéquation entre la disponibilité de l'énergie solaire et les capacités de séchage conséquentes par une ventilation générée par énergie.

2.1 Introduction :

La technologie de pompe à chaleur trouve de larges applications dans l'industrie, les bâtiments commerciaux et les propriétés résidentielles. Bien qu'elles consomment de l'énergie électrique, les PAC valorisent des énergies renouvelables.

Une pompe à chaleur est une machine thermodynamique permettant de transférer la chaleur du milieu le plus froid vers le milieu le plus chaud, alors que spontanément la chaleur se diffuse du plus chaud vers le plus froid jusqu'à l'égalité des températures. Il faut donc fournir de l'énergie pure pour réaliser ce transfert de chaleur non spontané.

L'utilisation de la pompe à chaleur permet d'assurer un appoint d'énergie à moindres coûts.

2.2 Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur :

La pompe à chaleur est une machine thermodynamique dont on peut considérer qu'elle fait partie des technologies utilisant des énergies renouvelables. Elle est connue depuis 1824, si on prend pour origine l'énoncé des principes de la thermodynamique par Carnot, qui a établi l'équivalence du travail, de la chaleur et de l'énergie.

C'est une machine dont le principe de base consiste à transférer des calories de la source froide vers la source chaude. Ce transfert se fait à l'aide d'un fluide frigorigène et se réalise à condition qu'il y ait un apport extérieur d'énergie sous forme de travail. [16]

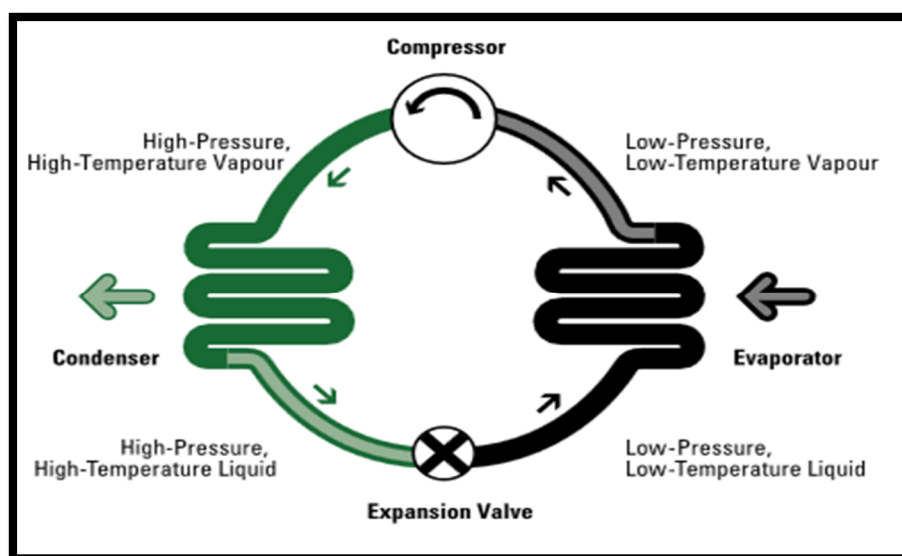


Figure 2.1: Schéma de principe d'une PAC. [16]

2.3 Les deux grandes familles de pompe à chaleur (PAC) :

On distingue deux grandes familles de pompe à chaleur (PAC):

2.3.1 Les PAC à sorption :

Les systèmes à sorption sont des processus physico-chimiques, soit un liquide ou un gaz est absorbé par un autre liquide ou un gaz (absorption), ou il est retenu à la surface d'un corps solide (adsorption «figure 2.2 »). Cela se produit dans certaines conditions physiques (pression, température). [17]

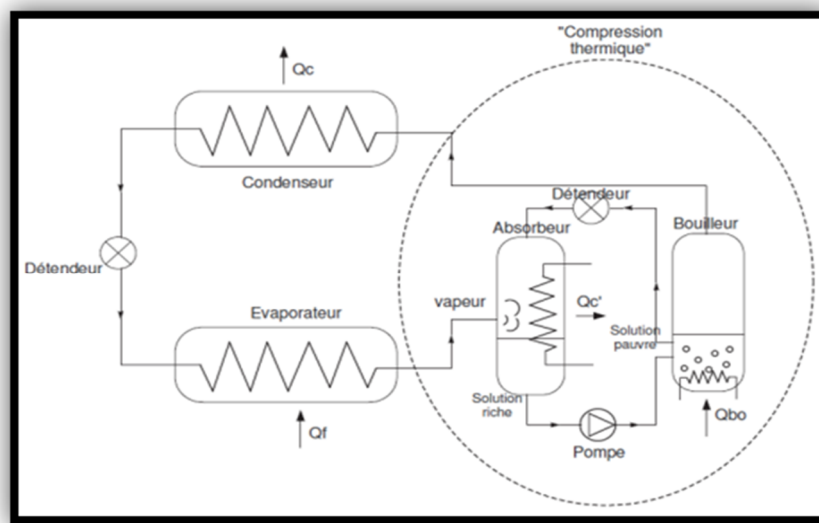


Figure 2.2 : Système de PAC à absorption. [17]

2.3.2 La PAC à compression :

Elle est composée des quatre éléments principaux ou composants de base suivants :

- Compresseur,
- Détendeur,
- Évaporateur,
- Condenseur.

La chaleur prélevée au niveau de l'environnement (air, sol, eau...) est captée par le fluide frigorigène (à faible point d'ébullition) au niveau de l'évaporateur. Le fluide change d'état de liquide, et se transforme en vapeur. Le compresseur comprime cette vapeur, augmentant ainsi sa température. C'est au niveau du condenseur que la vapeur en se condensant transmet sa chaleur au milieu à chauffer. La température du fluide s'abaisse

fortement le rendant prêt pour une nouvelle absorption de chaleur et le cycle peut recommencer. [17]

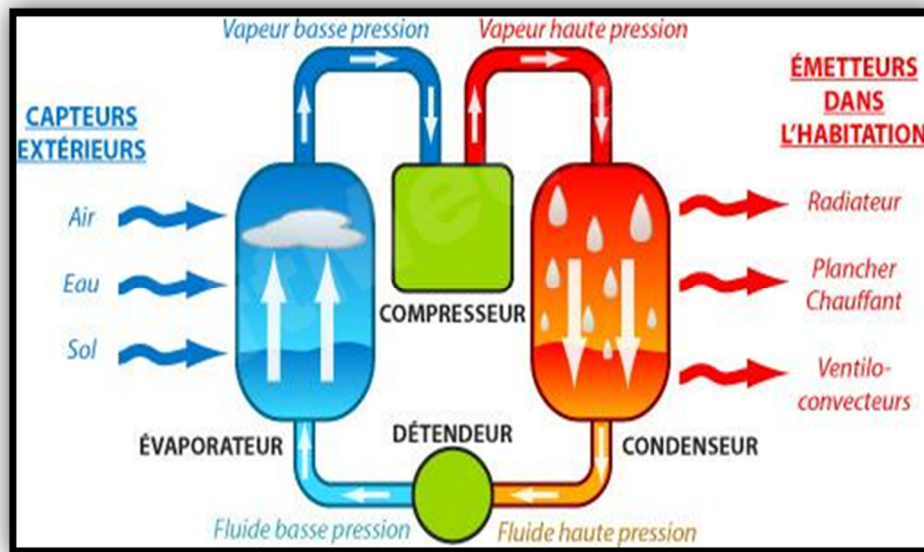


Figure 2.3: Schéma de principe d'une pompe à chaleur à compression. [18]

De ces deux grandes familles de pompes à chaleur, la PAC à compression est la plus répandue. C'est elle qui fera l'objet de notre étude, et nous allons détailler ses composants et ces différents types dans la suite de ce chapitre.

2.4 Les composants de base d'une PAC :

2.4.1 Le compresseur :

Son rôle dans le cycle est la compression, c'est-à-dire qu'il va aspirer le fluide frigorigène qui est sous forme de gaz à basse température. En comprimant le gaz, sa température va s'élever en même temps que sa pression. Nous aurons donc à la sortie du compresseur un gaz chaud à une pression élevée. [17]

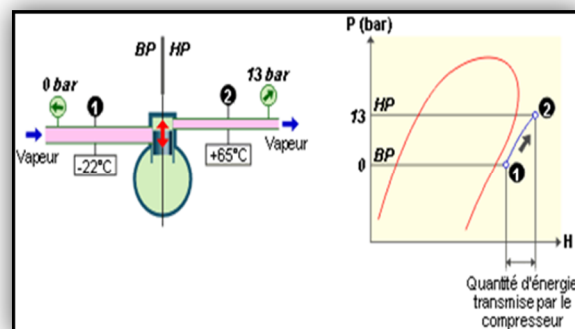


Figure 2.4: Compresseur frigorifique. [17]

2.4.2 Le condenseur :

C'est un échangeur de chaleur (fluide frigorigène/eau ou fluide frigorigène/air), son travail dans le cycle est la condensation, c'est-à-dire que le fluide frigorigène qui arrive à l'état gazeux à l'entrée du condenseur et ressort à l'état liquide. Ce changement d'état se fait en 3 parties : on désurchauffe les vapeurs, puis on les condense et enfin le fluide liquide se refroidit de quelques degrés (sous-refroidissement) avant de quitter le condenseur. Le gaz chaud va céder une partie de son énergie (chaleur) à un autre fluide caloporteur qui va lui augmenter sa température afin que les émetteurs puissent amener la bonne température aux pièces à chauffer (ou à l'air dans le cas d'un système à détente directe).

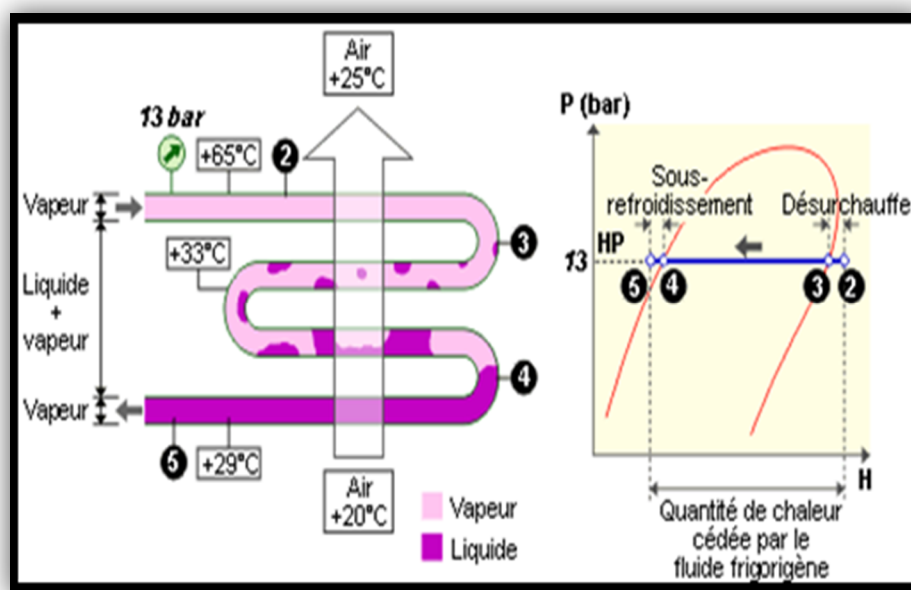


Figure 2.5 : Principe de fonctionnement d'un condenseur [17]

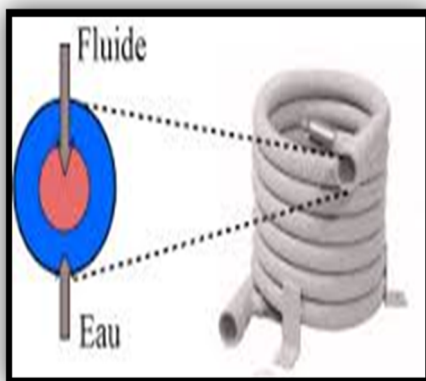


Figure 2.6: Condenseur à eau multitubulaire [17]



Figure 2.7: Condenseur à air [17]

2.4.3 Le détendeur :

Le rôle du détendeur dans le cycle est d'abaisser la pression du fluide frigorigène qui est à l'état liquide mais toujours à une pression élevée jusqu'à une pression beaucoup plus basse. Le détendeur fait chuter la pression du fluide frigorigène en abaissant sa température. Cette température doit être inférieure à la température de la source de récupération afin qu'il puisse avoir un changement d'état. [17]

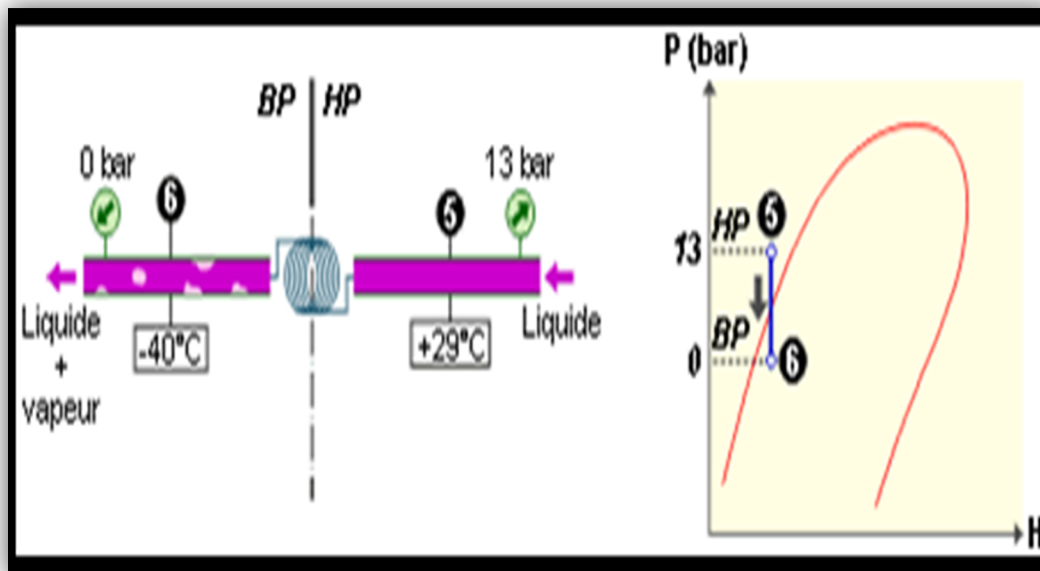


Figure 2.8 : Principe de fonctionnement d'un détendeur [17]



Figure 2.9: Détendeur thermostatique [17]



Figure 2.10: Détendeur capillaire [17]

2.4.4 L'évaporateur :

C'est un échangeur de chaleur (air/fluide frigorigène ou eau/fluide frigorigène), qui fait passer le fluide frigorigène sortie du détendeur à l'état liquide et à une température basse en une vapeur à température plus forte. L'évaporateur va récupérer ces calories de l'environnement extérieur. Le fluide frigorigène arrive froid et à l'état liquide, récupère de l'énergie (calories) du fluide caloporteur (cas d'une PAC à eau) ou de l'air extérieur. A partir de là, le fluide frigorigène va entrer en ébullition et il va se transformer en gaz. C'est dans

l'évaporateur que nous avons le deuxième changement d'état dans ce cycle thermodynamique, appelé l'évaporation. Ce gaz est ensuite aspiré par le compresseur pour un nouveau cycle.

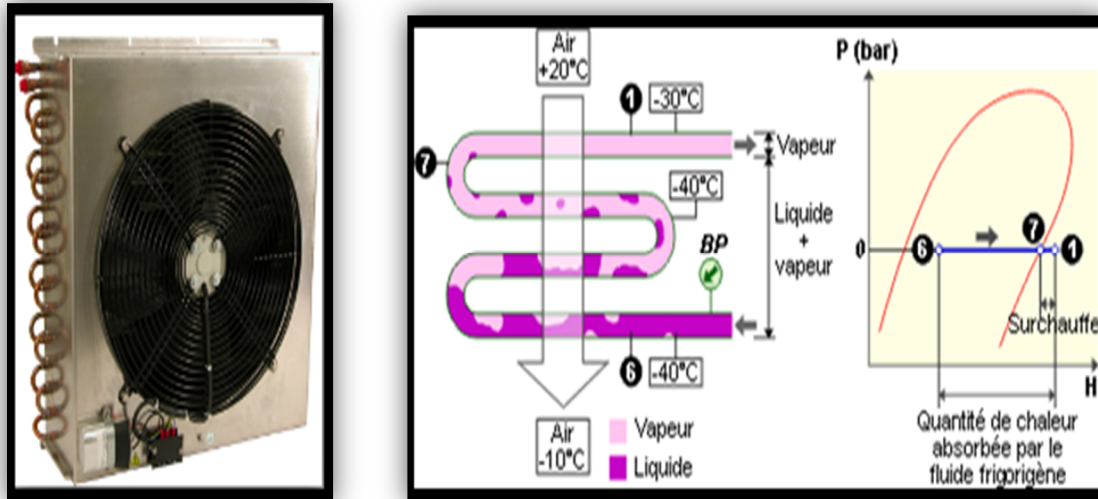


Figure 2.11: Evaporateur a air et son principe de fonctionnement. [17]

2.4.5 Le Fluide frigorigène :

Le fluide frigorigène d'une pompe à chaleur est un élément essentiel à son bon fonctionnement. Il en existe de différents types, chacun disposant de caractéristiques techniques, économiques et écologiques différentes. Le choix du fluide frigorigène est déterminant quant aux performances de fonctionnement de la PAC.

Pour rappel, le rôle du fluide frigorigène est de transférer les calories de la source froide à la source chaude.

La principale propriété des fluides frigorigènes est de s'évaporer à une faible température sous pression atmosphérique. Les fluides frigorigènes sont utilisés dans les systèmes de production de froid (climatisation, congélateur, réfrigérateur). [19]

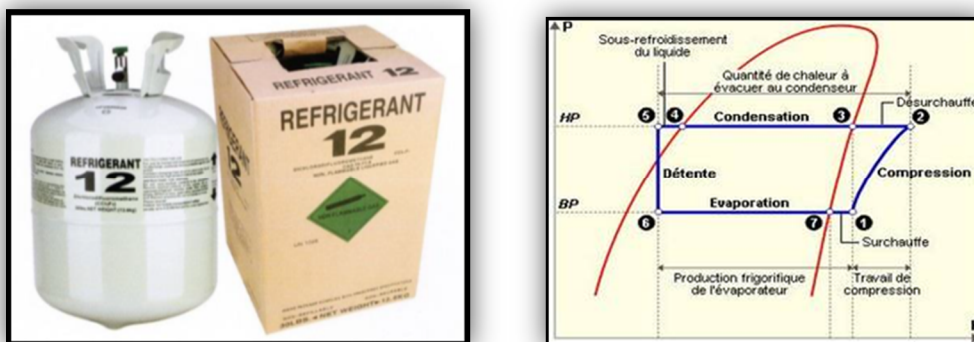


Figure 2.12 : Fluide frigorigène. [19]

2.4.6. Les équipements annexes :

a/ Les pressostats :

Les pressostats sont utilisés dans les installations de réfrigération et de conditionnement de l'air pour assurer une protection contre une pression de refoulement très grande (pressostat HP) ou une pression d'aspiration très faible (pressostat BP). [19]



Figure 2.13: le pressostat. [19]

b/ Le filtre déshydrateur :

Il consiste à protéger l'installation de l'humidité qui constitue un effet nuisible comme par exemple:

- La formation de givre dans les orifices du détendeur et dans les capillaires.
- La corrosion qui réduit la durée de vie de l'installation. [19]

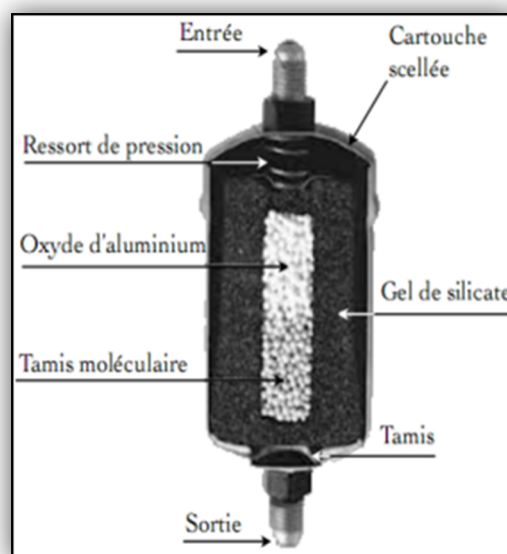


Figure 2.14 : le filtre déshydrateur. [19]

c/ Le clapet anti-retour :

Un clapet anti-retour est un dispositif qui laisse passer le fluide frigorigène dans un sens, mais bloque le passage dans l'autre sens.

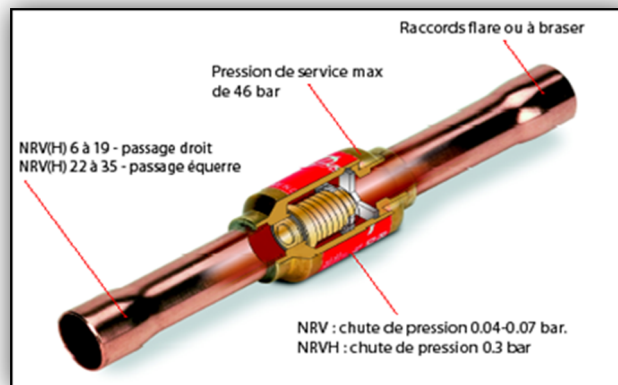


Figure2.15 : le clapet anti-retour. [19]

d/ La vanne de service :

La vanne de service permet de réaliser l'ensemble des interventions nécessaires sur une installation frigorifique telles que :

- Réaliser la maintenance de l'installation
- Réaliser les opérations de dépannage
- Réaliser les opérations de contrôle de fonctionnement
- Introduire et récupérer le fluide frigorigène

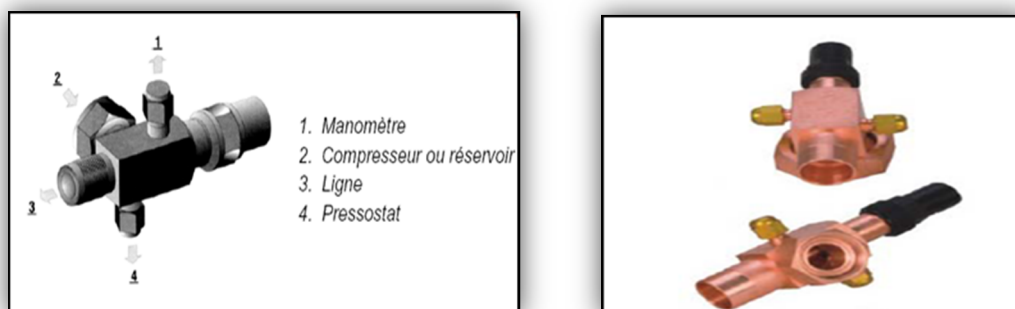


Figure 2.16 : la vanne de service. [19]

e/ La bouteille anti-coup de liquide :

Cette bouteille a un rôle primordiale qui consiste à protéger le compresseur d'une éventuelle migration de fluide encore liquide par la conduite d'aspiration «BP».

Ceci peut causer des dégâts irréversibles comme la casse des clapets d'aspiration et de refoulement. La bouteille A.C.L est installée sur le circuit d'aspiration du compresseur. [19]

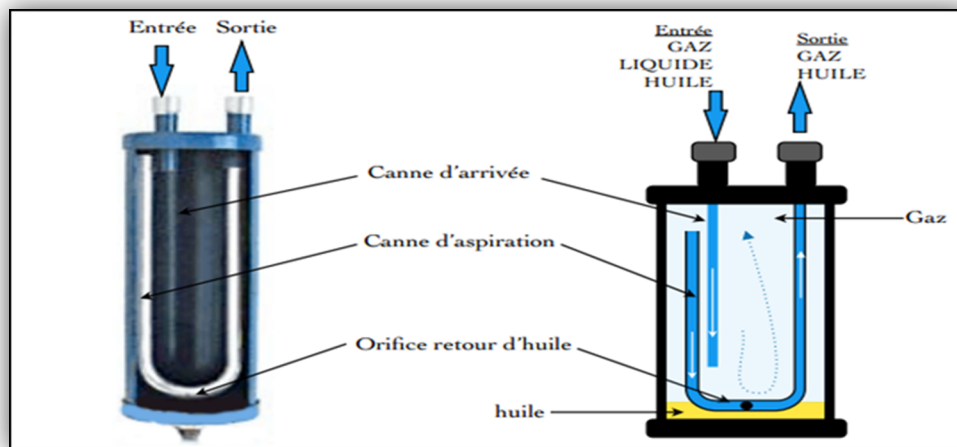


Figure 2.17 : la bouteille anti-coup de liquide. [19]

f/ La bouteille de liquide :

Elle reçoit le liquide venant du condenseur, il est muni d'une vanne avec un tube plongeur qui assure l'alimentation en fluide même en cas de niveau bas de liquide.

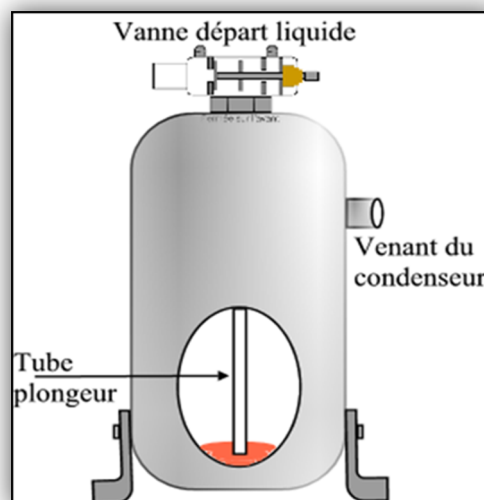


Figure 2.18 : la bouteille de liquide. [19]

g/ Le voyant liquide :

Le voyant liquide est indispensable dans un circuit frigorifique, installé entre le détendeur et le filtre, il permet de contrôler directement la teneur en humidité du fluide frigorigène. Un changement de couleur s'opère lorsque de l'humidité se trouve dans le circuit. La couleur «Verte» indique un circuit sec et «Jaune» lors que le circuit est humide. Les changements de couleurs sont réversibles. [19]

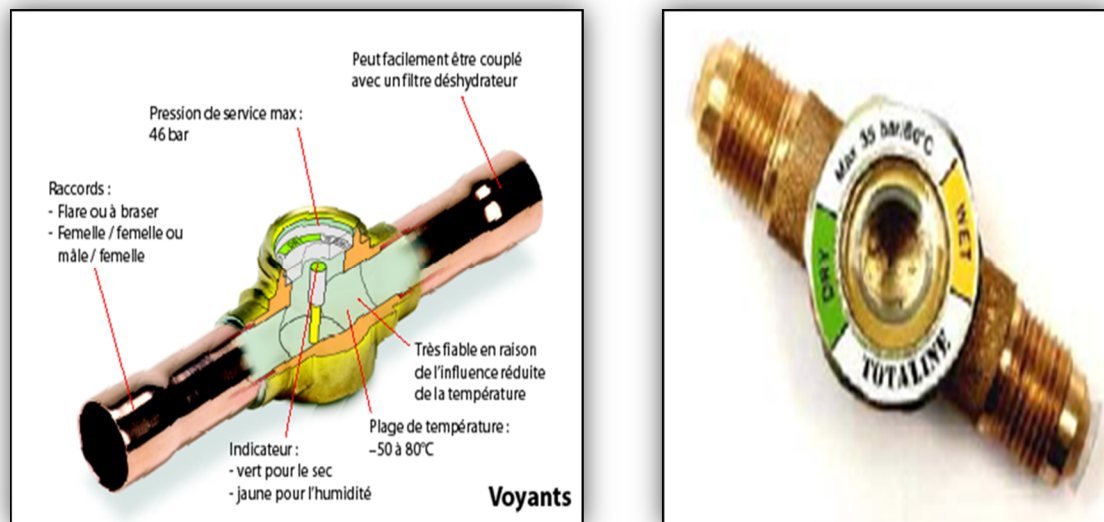


Figure 2.19 : le voyant. [19]

h/ La vanne d'inversion de cycle :

Appelée aussi vanne quatre voies, elle contient un tiroir mobile solidaire de deux pistons pilotés. Sous l'effet d'une pression agissant sur le piston, le tiroir mobile se déplace horizontalement et inverse le sens de passage du fluide dans les échangeurs (évaporateur et condenseur). [19]



Figure 2.20 : la vanne d'inversion de cycle. [19]

2.5 Les différents types de pompes à chaleur :

On peut recenser deux catégories de pompes à chaleurs : les PAC AERO et les PAC GEO et ces deux catégories sont divisées en sous familles. Pour les PAC AERO, nous avons les PAC AIR/AIR et les PAC AIR/EAU et pour les PAC GEO, nous avons les PAC en aquifère et les PAC à sondes sèches.

2.5.1 Les PAC aérothermiques :

A la différence de la géothermie, l'aérotherme récupère l'énergie gratuite présente dans l'air pour chauffer le bâtiment. La PAC récupère ses calories avec la partie installée à l'extérieur de l'habitat ou à l'intérieur (les calories peuvent être puisées sur extérieur ou à l'intérieur d'un local non chauffé). L'inconvénient avec ce type de PAC est que lorsque les températures sont trop basses, l'évaporateur givre et perd de son efficacité.

Généralement, elles sont donc équipées d'un système de régulation qui lui permet d'inverser son cycle de fonctionnement pendant un court moment, pour dégivrer l'évaporateur. Dans certaines régions dont le climat en hiver est très rigoureux, il est conseillé lors de l'installation de ce type de PAC, d'avoir ou de garder un autre système d'appoint ou de relève (chaudière traditionnel) afin de chauffer correctement l'habitat lorsque la PAC ne suffit plus ou pour la production d'Eau chaude sanitaire. [17]

Il existe deux types de PAC aérothermique, il y a les PACAIR/AIR et les PACAIR/EAU.

2.5.1.1 PAC air/air :

L'installation de ce type de PAC est la plus facile à mettre en œuvre, elle est idéale pour profiter de ses avantages dans toutes les maisons et surtout dans les appartements (pas besoin d'espace pour installer l'unité extérieur), elle ne nécessite pas de réseau hydraulique.

Avec ce type de PAC, l'appoint est toujours nécessaire ; on ne peut pas produire de l'ECS mais il est possible de rafraîchir ; il est possible de la coupler avec la ventilation mécanique contrôlée pour les PAC AIR EXTRAIT/AIR NEUF. Elles ont un système à détente direct avec un seul circuit (figure 2.21). Ce circuit ne contient que du fluide frigorigène (à grande quantité) qui circule dans un circuit fermé. [17]

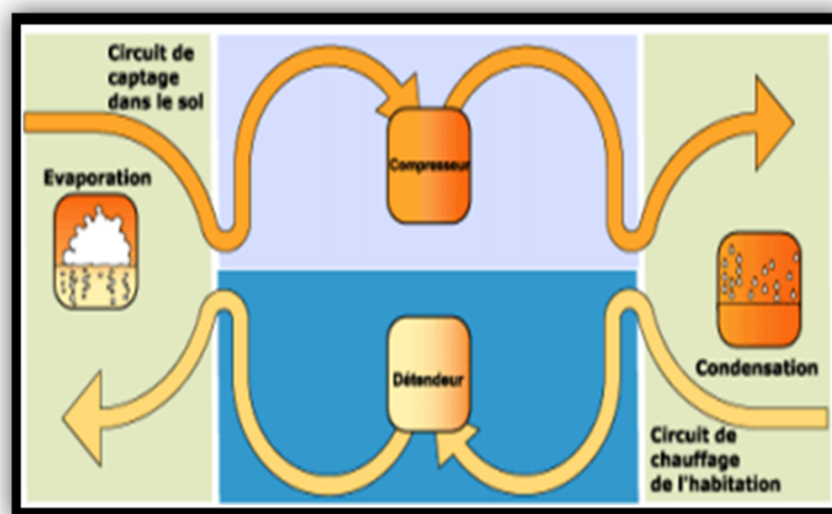


Figure 2.21 : Un système à détente direct. [17]

2.5.1.2. PAC air/eau :

Elle a le même principe de fonctionnement que la PAC AIR/AIR sauf que les calories sont transmises à des tuyaux d'eau, qui vont permettre de chauffer le logement. Elles ont un système mixte avec deux circuits : le circuit du fluide frigorigène de la PAC et celui de l'eau chaude des émetteurs (figure 2.21).

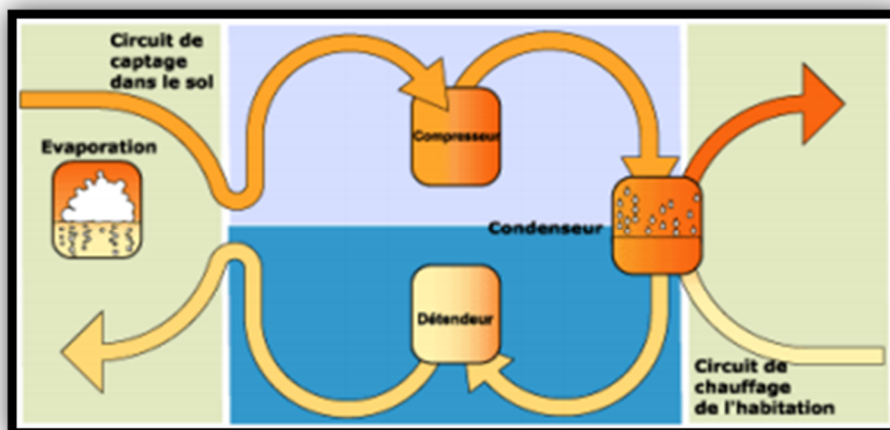


Figure 2.22 : Un système mixte. [17]

2.5.2 Les PAC géothermiques :

2.5.2.1 Les PAC géothermiques basses températures:

Il existe trois types de géothermies mais on va s'arrêter à celle qui a un lien avec la PAC, c'est la géothermie très basse énergie. Elle est définie par l'exploitation d'une ressource qui a une température inférieure à 30°C c'est pour cela qu'on utilise une PAC afin d'augmenter la température pour pouvoir chauffer l'habitation. La géothermie très basse température exploite deux types de ressources : l'énergie présente dans le sous-sol et celle présente dans les nappes d'eau. [17]

Nature du sous-sol	Conductibilité thermique (W/mK)	Puissance d'extraction W/m	Longueur sonde m/kW de puissance COP : 3,5
Gravier, sable, sec	0,4	< 20	> 36
Gravier, sable, aquifère	2	60	11
Argile, limon, humide	1,7	35	19,5
Calcaire massif	2,8	52,5	13
Grès	2,3	60	11
Granite	3,4	62,5	12
Basalte	1,7	45	16,5
Gneiss	2,9	65	13

Tableau 2.1 : Représentation énergétique de chaque élément du sous-sol. [17]

2.6 Séchage solaire assisté par une pompe à chaleur :

Au cours d'un cycle de séchage solaire conventionnel, l'évacuation de la vapeur d'eau de la serre est assurée au moyen d'une circulation d'air permanente. Au lieu d'être rejeté à l'atmosphère, cet air humide peut être utilisé comme source froide et ses calories récupérées à l'évaporateur de la pompe à chaleur.

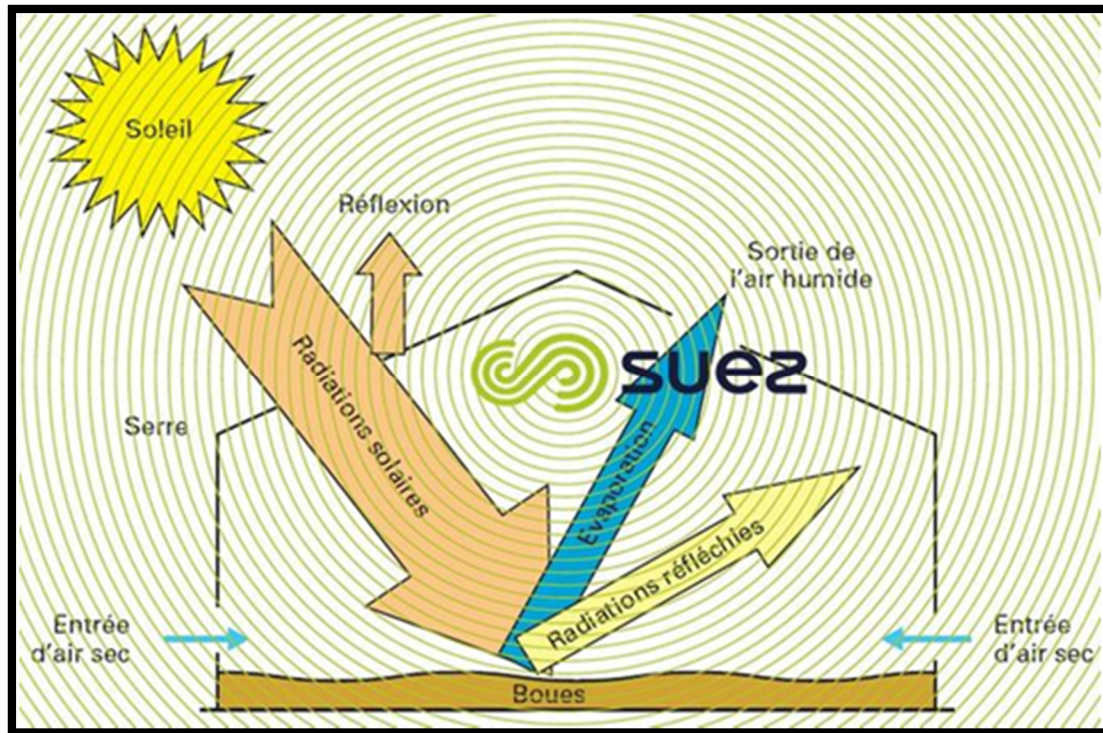


Figure 2.23: phénomènes physiques pour un séchage solaire. [12]

Si les sources de chaleur sont disponibles, il est nécessaire de savoir où diffuser la chaleur puisée. Lorsqu'un matériau humide est soumis à un cycle de séchage, deux processus se produisent simultanément : le transfert de vapeur d'eau piégée à l'intérieur de la structure vers la surface du matériau, et le transport ultérieur de cette vapeur d'eau dans l'environnement immédiat.

La dégradation des performances de séchage provient d'une limitation d'un de ces processus d'évaporation.

L'énergie d'appoint apportée par la PAC peut être judicieusement utilisée pour assurer des conditions favorables à l'évaporation de l'eau, permettant même d'intensifier ces phénomènes d'évaporation. [12]

On citer trois types de chauffage :

➤ Type 1 : chauffage par le sol

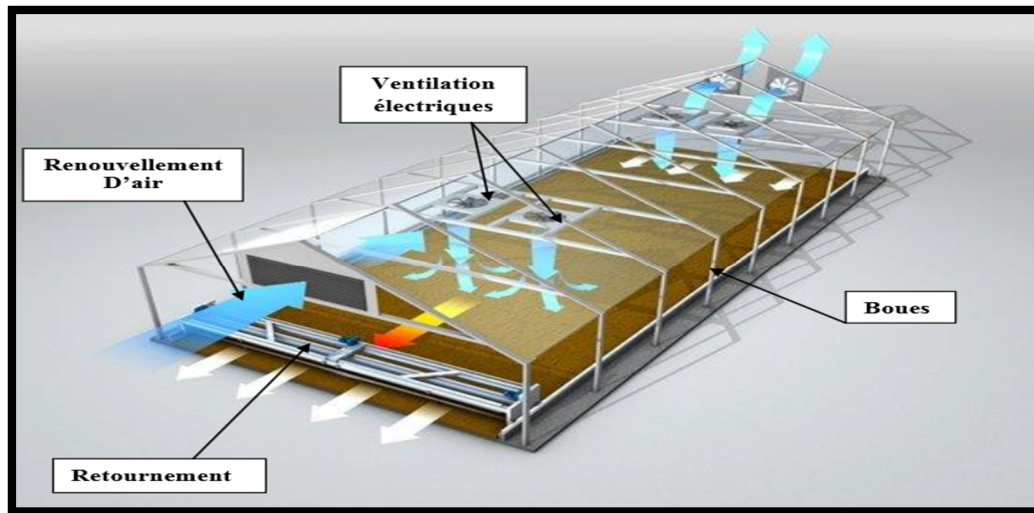


Figure 2.24 : schéma d'une serre solaire a convection forcée.

➤ Type 2 : chauffage par l'air circulé

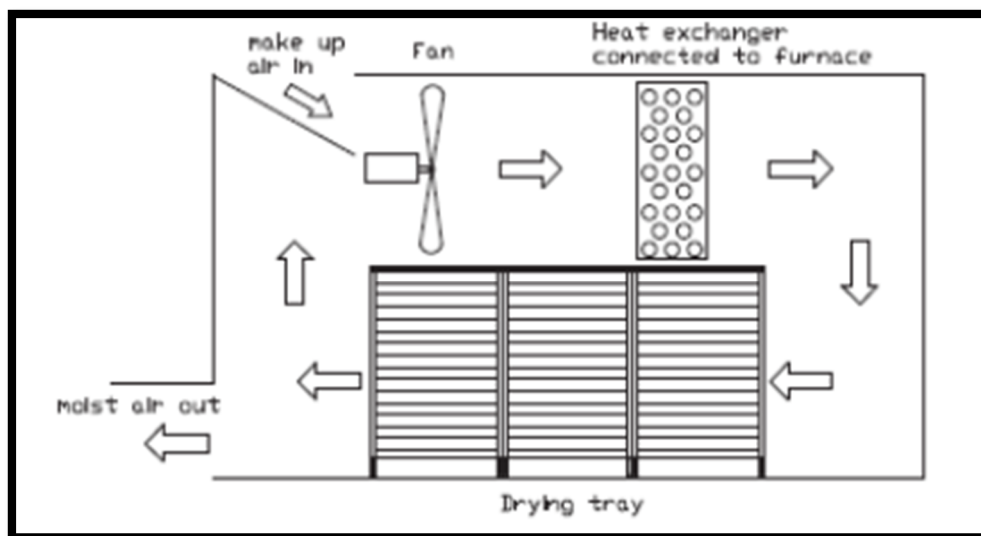


Figure 2.25 : nouveau sécheur avec convection forcée et recirculation d'air.

Quel que soit le mode d'évaporation à l'intérieur des boues, les mouvements de vapeur d'eau à l'intérieur de la matrice solide sont régis par des gradients de température et de pression qui s'établissent dans l'épaisseur de la structure solide. L'évaporation est d'autant plus intense que ces gradients sont élevés. Inspirée des technologies répandues dans le chauffage résidentiel, une option technique est envisagée : le chauffage conductif des boues au moyen d'un plancher chauffant qui puise sa chaleur au condenseur d'une pompe à chaleur.

Le fonctionnement de la pompe à chaleur est piloté par une température de surface à maintenir afin d'atteindre des capacités évaporatoires requises. Le chauffage conductif est avantageux dans la mesure où les niveaux de températures de condensation requises permettent d'atteindre des COP intéressants. Mais le chauffage par la sole peut être avantageusement complété par un chauffage convectif de surface.

L'enlèvement de la vapeur d'eau à la surface des boues dépend des conditions régnant à l'interface de séchage air-boues : la température de surface des boues ainsi que les conditions de l'air, telles que température, hygrométrie et vitesse. Pendant les périodes froides, les températures ambiantes faibles et l'absence de flux solaire provoquent le refroidissement des boues entraînant ainsi une diminution de l'intensité des transferts massiques en surface.

A partir de ces premières observations, une deuxième option technique est envisagée :

Chauffer l'air avant de l'introduire sous la serre, ce qui permet de s'affranchir de la contrainte de refroidissement de la surface des boues pour des conditions climatiques froides et humides.

Le chauffage simultané de la sole et de l'air de balayage est l'option technique privilégiée et sera donc étudiée en détail. De plus, l'énergie supplémentaire peut être fournie indépendamment par pompe à chaleur qu'assure le chauffage de la sole.

2.7 Conclusion :

La pompe à chaleur permet de transférer la chaleur du milieu le plus froid vers le milieu le plus chaud, alors que spontanément la chaleur se diffuse du plus chaud vers le plus froid jusqu'à l'égalité des températures. Il faut donc fournir de l'énergie pure pour réaliser ce transfert de chaleur non spontané. L'utilisation d'une pompe à chaleur est intéressante dans la mesure où elle engendre de faibles consommations d'énergie électrique. L'énergie thermique fournie doit être supérieure à l'énergie électrique consommée d'un facteur égal au coefficient de performance de la PAC (COP).

3.1 Démarche globale de modélisation :

Le séchage solaire des boues repose sur la mise en contact, sous une serre, d'un air régulièrement renouvelé et d'une boue étalée sur une dalle béton et brassée mécaniquement.

Un système de ventilation assure un écoulement de l'air dans la serre afin de favoriser le transfert de l'eau interstitielle dans l'atmosphère et d'évacuer l'air humide.

D'une manière générale, quel que soit le produit à sécher, les éléments de base à représenter pour construire un modèle de sécheur solaire direct sont les suivants :

- l'environnement extérieur.
- la couverture.
- l'air intérieur.
- le produit à sécher (la boue dans notre cas).
- le support sur lequel repose le produit (plancher chauffant dans certains cas).

L'ensemble des modèles répertoriés repose sur l'écriture de bilans massiques et énergétiques sur ces différents éléments. La modélisation du séchage solaire des boues est basée sur la prise en compte simultanée d'échanges de chaleur et d'échanges de vapeur d'eau, physiquement très couplés.

La serre constitue un système énergétique complexe dans lequel la plupart des modes de transferts thermiques sont mis en jeu.

Les différents modes de transferts thermiques mis en jeu sont:

- Les apports solaires au Travers du matériau de la couverture.
- Les échanges radiatifs de grande longueur d'onde entre les différents éléments.
- Les échanges de convection à la surface de la couverture et à Celle de la boue.
- L'échange par conduction entre le plancher chauffant et la boue (dans le cas de l'utilisation de la pompe à chaleur).
- L'évaporation au niveau de la boue.
- Le renouvellement d'air dû à la perméabilité de la serre ou à une ventilation mécanique.

La figure ci-dessous (Figure 3.1) représente schématiquement l'ensemble des éléments à prendre en compte et les différents processus mis en jeu.

Le modèle que nous proposons est un modèle de connaissance mono dimensionnel qui peut être utilisé soit en régime dynamique ou en régime permanent. Ce modèle s'articule autour de la formulation des bilans d'énergie instantanés des différents composants de la serre. Dans notre cas on s'intéresse essentiellement en régime permanent.

Chacun des éléments du modèle est caractérisé par une variable d'état: la température. La boue est en plus caractérisée par sa teneur en eau. On retiendra l'hypothèse d'une distribution uniforme des différentes variables. Cette hypothèse à l'avantage de permettre la formulation d'équations dont la solution représentera l'état moyen des variables. On suppose également que :

- la serre est considérée comme un système physique dont les conditions aux limites sont les données météorologiques (température et humidité de l'air extérieur, vitesse du vent, rayonnement solaire global).
- la couverture de la serre est considérée comme une surface de faible épaisseur où l'échange par conduction entre la face extérieure et intérieure peut être négligé.
Sont négligés les apports énergétiques éventuels:
- la convection des faces latérales avec le milieu extérieur ainsi que l'intérieur de la serre et ceux des radiations solaires captées par les faces latérales de la serre.
- l'échange par conduction entre la boue et son support dans le cas où la pompe à chaleur est à l'arrêt.

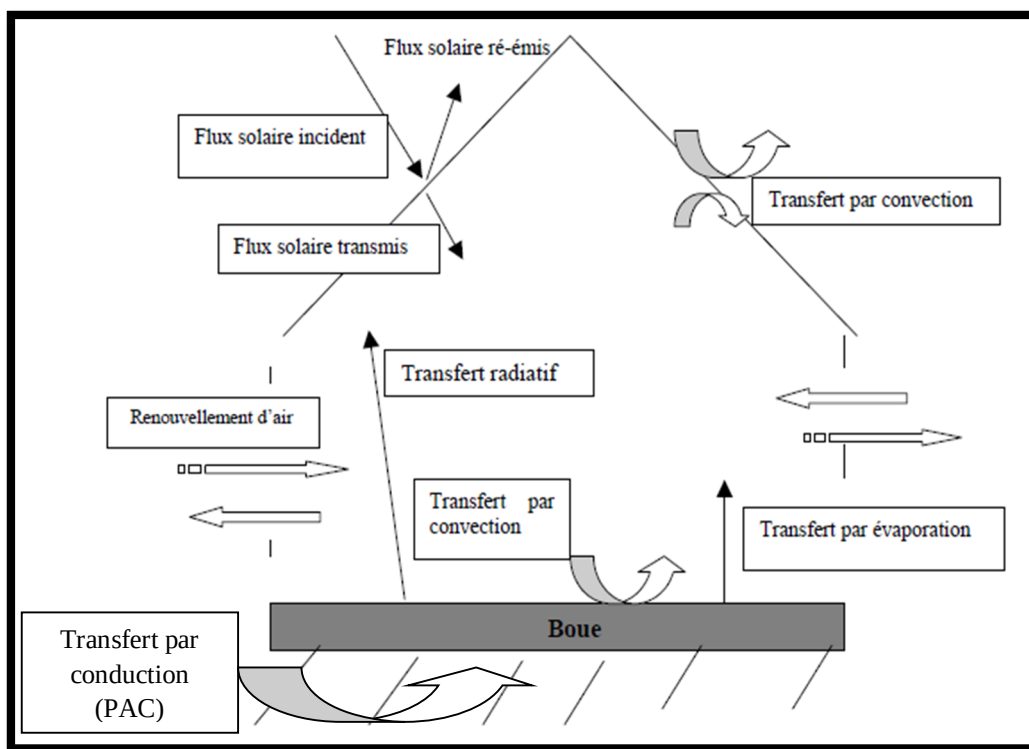


Figure 3.1 : Eléments et mécanismes à prendre en compte dans un modèle de sécheur solaire.

3.2 Analyse physique du modèle :

3.2.1 Représentation des composants de la serre :

A. Géométrie globale de la serre :

Quatre paramètres géométriques définissent la structure globale de la serre : sa longueur (L), sa largeur (l), son volume intérieur (V), et son orientation.

Les propriétés tant géométriques que physiques de la serre seront supposées uniformes dans la direction de son grand axe: la serre sera donc assimilée à sa section droite transversale et les effets de bord liés aux extrémités seront négligés.

B. Représentation de la couverture :

Dans le cas le plus général, la couverture est subdivisée en trois éléments:

- une paroi extérieure (qui sera dite 'couverture extérieure' C_e).
- une paroi intérieure (dite 'couverture intérieure' C_i).
- une fluide inter-paroi (F).

C. Représentation de l'air intérieur :

L'air intérieur est caractérisé par une variable d'état: sa température. L'hypothèse d'uniformité volumique de la variable d'état a été admise par souci de simplification; il faut cependant garder à l'esprit le fait que, dans la réalité, un gradient de température pourra apparaître au niveau vertical entre le haut et le bas de la serre, ou même au niveau horizontal entre une extrémité et l'autre de la serre. La température de l'air ainsi définie doit être considérée comme une valeur moyenne conduisant aux mêmes effets globaux.

D. Représentation de la boue :

Dans les serres industrielles les boues sont stockées à quelques dizaines de centimètres de hauteurs.

L'état de la boue est caractérisé par sa température et la teneur en eau supposées uniformes sur l'ensemble de la couche.

E. Représentation du plancher :

Le support de la boue dans les serres industrielles est une dalle en béton. Certains procédés intègrent à la dalle des plaques chauffantes. La plaque chauffante est constituée de tubes circulaires régulièrement espacés. À l'intérieur des tubes circulent de l'eau à une température élevée qui peut être chauffée par une pompe à chaleur.

F. Environnement extérieur :

L'environnement extérieur, intervient par un ensemble de paramètres climatiques qui conditionnent l'intensité de divers flux énergétiques. Il est caractérisé par les paramètres Suivants :

- la température, et l'humidité relative de l'air extérieur, mesurées à une distance supposée constante de la paroi, sont des facteurs qui interviennent d'une part dans l'échange convectif avec la face externe de la couverture, d'autre part dans l'échange par renouvellement d'air.
- la vitesse moyenne du vent, mesurée à une certaine hauteur au-dessus du sol, agit sur la valeur du coefficient d'échange convectif à la face externe de la couverture, et sur l'intensité du renouvellement d'air.
- le rayonnement solaire global parvenant au sol, sur une unité de surface horizontale.

3.3 Ecriture des bilans thermiques et massiques :

Pour construire le modèle mathématique, la méthode des bilans thermiques pour chaque composant est utilisée. En évaluant les gains et les pertes, ces bilans traduisent le principe de conservation de l'énergie appliqué à chaque élément du modèle en régime permanent.

Tableau 3.1 : Récapitulatif de la notation des flux

Nature de flux	Type d'élément
R : Flux de rayonnement solaire	ae : air extérieur
I : Flux de rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde	c : couverture ai : air intérieur
C : Flux de convection	b : boue
I : Inertie thermique	v : voute céleste

3.4 Bilans énergétiques :

A/ Bilan sur la couverture :

$$\varphi_{Rc} - \varphi_{Icv} + \varphi_{Icb} - \varphi_{Ccae} + \varphi_{Caic} = \varphi_{ic} \quad \text{Equation 3-1}$$

Avec :

φ_{Rc} = flux net de rayonnement solaire reçu par la couverture.

φ_{Icv} = flux de rayonnement infra-rouge émis vers la voûte céleste.

φ_{Icb} = flux de rayonnement infra-rouge émis de la boue.

φ_{Ccae} = flux convectif de la couverture vers l'air extérieur.

φ_{Caic} = flux convectif de l'air intérieur vers la couverture.

φ_{ic} = flux d'accumulation d'inertie thermique de la couverture (égale à 0 en régime permanent).

B/Bilan sur l'air intérieur :

$$\varphi_{Cbai} - \varphi_{Caiae} - \varphi_{Caic} = \varphi_{iai} \quad \text{Equation 3-2}$$

Avec :

φ_{Cbai} = flux convectif de la boue vers l'air intérieur.

φ_{Caiae} = flux convectif de l'air intérieur vers l'air extérieur.

ϕ_{Caic} = flux convectif de l'air intérieur vers la couverture.

ϕ_{iai} = flux d'accumulation d'inertie thermique de l'air intérieur (égale à 0 en régime permanent).

C/Bilan thermique de la boue :

$$\phi_{Rb} - \phi_{Ibc} - \phi_{Cbai} - m L_v + \phi_{pac} = \phi_{ib}$$

Equation 3-3

Avec :

ϕ_{Rb} : Flux net de rayonnement solaire reçu par la boue.

ϕ_{Ibc} : Flux de rayonnement infra-rouge émis vers la couverture.

ϕ_{Cbai} : Flux convectif de la boue vers l'air intérieur.

ϕ_{pac} : Flux convectif de la pompe à chaleur.

ϕ_{ib} : Flux d'accumulation d'inertie thermique de la boue (Égale à 0 en régime permanent).

m : Flux massique d'eau évaporée de la boue.

L_v : Chaleur latent de vaporisation de l'eau.

3.5 Bilans massiques (cinétique de séchage) :

➤ Bilan massique en eau sur la boue :

$$X_f = X_i \cdot \exp^{-kt}$$

$$X_f - X_i \cdot e^{-kt} = 0$$

$$k = (a_1 - a_2 \cdot T_{ai} - a_3 \cdot T_{ai}^2 - a_4 \cdot T_{ai}^3)$$

$$X_f - X_i \cdot \exp((-a_1 + a_2 \cdot T_{ai} + a_3 \cdot T_{ai}^2 + a_4 \cdot T_{ai}^3) \cdot t) = 0$$

Equation 3-4

Avec :

a_1, a_2, a_3, a_4 : des constantes.

t : durée de séchage.

X_f : siccité finale.

X_i : siccité initiale.

T_{ai} : température de l'air intérieur.

3.6 Expression des flux énergétiques :

3.6.1 Flux radiatifs solaires :

En admettant comme suffisante l'hypothèse que, la couverture se comporte globalement comme une paroi horizontale de même surface que la surface du sol de la serre, la détermination des différents bilans nets du flux solaire absorbé par chaque élément est effectuée en utilisant des coefficients globaux de transmission et de réflexion non liés à l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur les différentes parois.

Les propriétés spectrales des éléments (couverture, boue) vis à vis du rayonnement solaire sont donc des propriétés moyennes qui constituent des paramètres d'entrée du modèle :

- Coefficient de transmission (τ_c) et d'adsorption (a_c) de la couverture.
- Coefficient d'absorption (a_b) et de réflexion (ρ_b) de la boue (transmissivité nulle car la boue est supposée opaque au rayonnement solaire).

Les flux nets absorbés par la couverture et par la boue sont formulés en se limitant aux nombres de réflexion des rayons solaires schématisés ci-dessous.

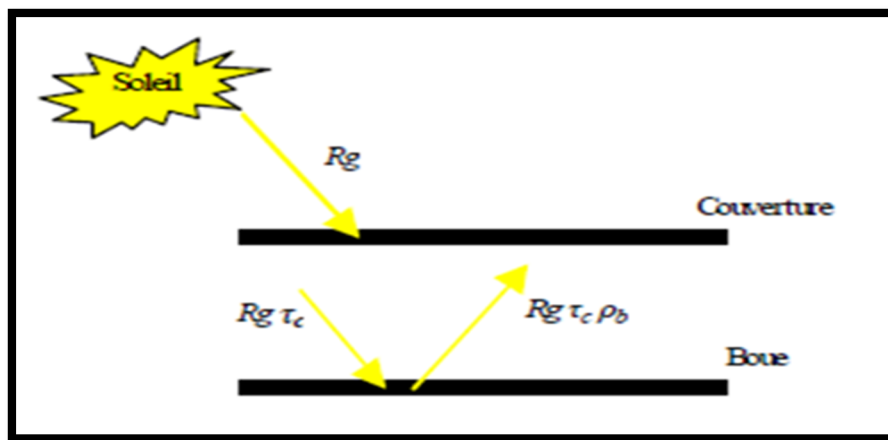


Figure 3.2 : Schéma des flux solaires absorbés.

- Flux net absorbé par la couverture :

$$\varphi_{Rc} = R_g a_c (1 + \tau_c \rho_b) \quad (W / m^2) \quad \text{Equation 3-5}$$

Avec :

R_g = intensité du rayonnement solaire ($W.m^{-2}$)

a_c = coefficient d'absorption de la couverture (-)

τ_c = coefficient de transmission de la couverture (-)

ρ_b = coefficient de réflexion de la couverture (-)

➤ Flux net absorbé par la boue :

$$\varphi_{Rb} = R_g \tau_c a_b (W/m^2) \quad \text{Equation 3-6}$$

Avec :

a_b = coefficient d'absorption de la boue (-)

3.6.2 Flux radiatifs Infrarouges :

Ils correspondent aux rayonnements émis par les différents éléments de la serre. De façon évidente est également incluse comme source de rayonnement la voûte céleste.

Le bilan net de l'énergie absorbée ou perdue par chacun des corps est le résultat de ces émissions simultanées, compte tenu de réflexions multiples sur chacun des différents éléments. Les paramètres nécessités par l'analyse infrarouge, outre les paramètres géométriques correspondent à :

- la transmissivité et l'émissivité de la couverture.
- l'émissivité de la boue.
- la voûte céleste est caractérisée par une température apparente de rayonnement (dite température de voûte céleste ou température de ciel), calculée en fonction de la température extérieure.

A. Flux radiatif infrarouge milieu extérieur/ couverture :

La puissance de rayonnement infrarouge atteignant par unité de surface la couverture extérieure est due à la voûte céleste.

Le flux total reçu par la couverture du milieu extérieur s'écrit :

$$\varphi_{Icv} = \sigma \varepsilon_c (T_v^4 - T_c^4) \quad (W/m^2) \quad \text{Equation 3-7}$$

Avec :

σ = Constante de Stefan – Boltzmann ($W/m^2/K^4$)

ε_c = émissivité de la couverture (-)

T_v = température de la voûte céleste (K)

T_c = température de la couverture (K)

La température équivalente de la voûte céleste est donnée par la relation de Swinbank [1963] :

$$T_v = 0,0552 T_{ae}^{1.5} \quad (K) \quad \text{Equation 3-8}$$

Avec : T_{ae} = température de l'air extérieur (K)

B. Flux radiatif infrarouge au sein du modèle :

Nous restreignons l'échange par rayonnement infrarouge au milieu Couverture boue. Le flux net perdu par la surface de la boue S_b est égal au flux net gagné par celle de la couverture S_c . Ce flux est encore égal au flux net échangé entre S_b et S_c .

Nous avons donc l'égalité :

$$\Phi_{Icb} = -\Phi_{Ibc}$$

Le flux d'énergie échangé entre la surface de la boue et celle de la couverture est donné par la relation :

$$\Phi_{Ibc} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_b} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} (T_c^4 - T_b^4) \quad \text{Equation 3-9}$$

Avec :

ε_b = Emissivité de la boue (-)

T_b = température de la couverture (K)

3.6.3 Flux convectifs :

Ils concernent principalement les transferts d'énergie entre la paroi d'un solide (S) et le fluide (f) qui se situe à son contact.

La puissance échangée s'écrit :

$$\Phi_{Csf} = h S (T_s - T_f) \quad (W) \quad \text{Equation 3-10}$$

Avec :

h = coefficient de convection (W/m²/°C).

S = surface d'échange (m²).

T_s, T_f = températures respectives du solide et du fluide (°C).

Toute la difficulté réside dans l'évaluation du coefficient h , sa valeur dépend :

- des températures du solide et fluide (ce qui introduit un non linéarité).
- de la nature et vitesse du fluide.
- de la surface du solide.

A. Echange convectif milieu extérieur / couverture :

Cet échange traduit l'effet du vent sur la face extérieure de la couverture. Le coefficient de convection est donné par l'équation de Mc Adams [1] :

$$h_e = a + b.U_v \quad (\text{W.m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}) \quad \text{Equation 3-11}$$

Avec :

U_v = vitesse du vent (m/s).

$$a = 5,67 \text{ W.m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}.$$

$$b = 3,86 \text{ W.m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}.$$

B. Echange convectif au sein du modèle :

Pour les échanges convectifs entre l'air intérieur et respectivement la face interne de la couverture et la surface de la boue, l'estimation des coefficients d'échange convectif est exprimée à partir du nombre de Nusselt :

$$N_u = h \frac{L}{\lambda} \quad \text{d'où} \quad h = N_u \frac{\lambda}{L} \quad (\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \quad \text{Equation 3-12}$$

Le nombre de Nusselt est relié aux conditions opératoires par l'intermédiaire de lois de puissance portant sur des nombres adimensionnels. En convection forcée, le nombre de Nusselt est donné par l'expression :

$$N_u = a (\text{Pr})^m (\text{Re})^n \quad \text{Equation 3-13}$$

Nombre de Prandtl :

$$\text{Où :} \quad \text{Pr} = \frac{\nu \cdot C_p \cdot \rho}{\lambda}$$

Nombre de Reynolds :

$$\text{Re} = \frac{U L}{\nu}$$

Avec :

U = vitesse moyenne de l'air (m/s).

C_p = chaleur massique de l'air sec (W/m-1. °C).

L = longueur caractéristique (m).

ρ = masse volumique de l'air (kg/m³).

ν = viscosité cinématique de l'air (m²/s).

λ = conductivité thermique de l'air (W/m-1. °C).

Les relations utilisées pour calculer les différentes grandeurs (ρ , v , λ , C_p) qui interviennent dans les nombres adimensionnels se trouvant à l'annexe I.

La variabilité des hypothèses de calcul, la détermination expérimentale de valeurs par l'intermédiaire de maquettes (qui met à profit l'aspect adimensionnel des coefficients) ont conduit les auteurs à proposer des formules de calcul de h très différentes les unes des autres. Il a été retenu, l'expression du coefficient de convection entre la paroi interne du séchoir et l'air asséchant, ainsi que entre la boue et l'air asséchant –la surface de la boue est assimilée à une surface plane- la corrélation proposée par Sacadura (1978) pour un écoulement d'air sur une plaque plane:

$$Nu = 0.66 Re^{0.5} Pr^{1/2} \text{ pour } Re \leq 10^5 \text{ et } 0.6 \leq Pr \leq 15$$

$$Nu = (0.0337 Re^{0.8} + 872) Pr^{1/3} \text{ pour } 10^5 < Re \leq 10^7$$

$$Nu = 0.0336 Re^{0.8} Pr^{1/3} \text{ pour } Re > 10^7 \text{ et } 0.5 \leq Pr \leq 50$$

Equation 3-14

L'échange convectif dû au renouvellement d'air intérieur est un cas particulier : le flux est lié à la différence d'énergie interne entre l'air entrant et l'air sortant. La puissance échangée s'exprime par la relation :

$$\phi_{Caiae} = \rho Q C_p (T_{ai} - T_{ae}) \quad (W)$$

Equation 3-15

Avec :

C_p = chaleur massique de l'air sec ($W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$).

ρ = masse volumique de l'air (kg/m^3).

Q = débit volumique de l'air (m^3/s).

Le débit volumique de l'air est fonction du taux de renouvellement (R) et du volume d'air intérieur de la serre V

$$Q = R V \quad (m^3/s)$$

Equation 3-16

Le renouvellement d'air de la serre est la conséquence de trois mécanismes :

- les fuites, dues aux défauts d'étanchéité de la serre.
- la ventilation naturelle, correspondant à l'ouverture d'ouvrants.
- la ventilation forcée, liée à la présence d'un ventilateur (ou extracteur) dans la serre.

3.6.4 Inertie thermique :

L'inertie thermique correspond à la variation d'énergie interne contenue par un corps entre deux instants. Elle sera définie par la relation différentielle suivante :

$$\varphi_i = \rho V C_p \frac{dT}{dt} \quad (w) \quad \text{Equation 3-17}$$

On désigne usuellement le produit $\rho.V.C_p$ comme étant la capacité calorifique du corps exprimé en $J/^\circ C$ et qui quantifie l'énergie totale que doit emmagasiner le corps pour augmenter sa température d'un degré.

3.7 Paramètres de la boue intervenant dans la modélisation :

Les propriétés thermodynamiques de la boue intervenant dans la modélisation sont :

- les isothermes de sorption, qui caractérisent l'interaction eau-solide dans les boues
- la chaleur massique, quantifie l'énergie emmagasinée par la boue pour augmenter sa température d'un degré.

Ces paramètres sont utiles pour le dimensionnement des séchoirs. En effet l'intérêt des isothermes est double: d'une part, elles permettent de connaître la teneur en eau finale d'un produit exposé à des conditions de séchage définies (température et humidité), appelée teneur en eau d'équilibre, d'autre part, elles fournissent des informations quant aux conditions limites lors de la modélisation.

3.7.1 Formulation du système d'équations en régime dynamique :

Les flux thermiques du modèle étant exprimés en fonction des inconnues potentielles la formulation consiste à définir le bilan global avec les variables d'états de chaque élément et l'ensemble des paramètres utilisés dans le modèle.

- **Bilan d'énergie sur la couverture :**

$$C_c \frac{dT_c}{dt} = R_g a_c (1 + \tau_c \rho_b) - \sigma \varepsilon_c (T_c^4 - T_v^4) - \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_b} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} (T_b^4 - T_c^4) + h_{ci} S (T_{ai} - T_c) - h_{ce} S (T_c - T_{ae}) \quad \text{Equation 3-18}$$

- **Bilan d'énergie sur l'air :**

$$\rho V C_p \frac{dT_{ai}}{dt} = h_b S_b (T_b - T_{ai}) - h_{ci} S_c (T_{ai} - T_c) - \rho Q C_p (T_{ai} - T_{ae})$$

Equation 3-19

➤ **Bilan d'énergie sur la boue :**

$$m_b C_p \frac{dT_b}{dt} = R_g S_b a_b \tau_c - \frac{\sigma S_b}{\frac{1}{\varepsilon_b} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} (T_b^4 - T_c^4) + h_b S_b (T_{ai} - T_b) - m L_v + \beta R_g S_s$$

Equation 3-20

➤ **Bilan massique sur la boue :**

$$X_f = X_i \exp((-a_1 + a_2 T_{ai} + a_3 T_{ai}^2 + a_4 T_{ai}^3).t)$$

Equation 3-21

3.7.2 Formulation du système d'équations en régime permanent :

Les flux thermiques du modèle étant exprimés en fonction des inconnues potentielles la formulation consiste à définir le bilan global avec les variables d'états de chaque élément et l'ensemble des paramètres utilisés dans le modèle.

➤ **Bilan d'énergie sur la couverture :**

$$R_g a_c (1 + \tau_c \rho_b) + \sigma \varepsilon_c (T_v^4 - T_c^4) + \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_b} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} (T_c^4 - T_b^4) + h_{ci} S (T_{ai} - T_c) + h_{ce} S (T_{ae} - T_c) = 0$$

Equation 3-22

➤ **Bilan d'énergie sur l'air :**

$$h_b S_b (T_b - T_{ai}) - h_{ci} S_c (T_{ai} - T_c) - \rho Q C_p (T_{ai} - T_{ae}) = 0$$

Equation 3-23

➤ **Bilan d'énergie sur la boue :**

$$R_g S_b a_b \tau_c - \frac{\sigma S_b}{\frac{1}{\varepsilon_b} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} (T_b^4 - T_c^4) + h_b S_b (T_{ai} - T_b) - m L_v + \beta R_g S = 0$$

Equation 3-24

➤ **Bilan massique sur la boue :**

$$X_f - X_i \cdot \exp((-a_1 + a_2 \cdot T_{ai} + a_3 \cdot T_{ai}^2 + a_4 \cdot T_{ai}^3) \cdot t) = 0 \quad \text{Equation 3-25}$$

3.7.3 Les paramètres mis en jeu lors de la procédure de simulation du modèle:**1/ les paramètres d'entrée tels que :**

Les caractéristiques géométriques et physiques de la serre et de ses éléments ainsi que les données climatiques extérieures.

2/ les données de sortie :

Qui constituent les sorties du modèle :

- la température de la couverture (T_c).
- la température de l'air intérieur (T_{ai}).
- la température de la boue (T_b).
- la teneur en eau en base sèche de la boue (X).

La connaissance de ces paramètres de sortie nous permettra d'évaluer l'évolution de la vitesse de séchage et donc l'évolution du flux d'évaporation dans des conditions climatiques données.

L'estimation de la température de la couverture, permettra d'estimer les besoins de chauffage de la serre afin de compenser les déperditions.

L'estimation de la température de l'air intérieur permettra d'estimer les besoins de quantité d'énergie à injecter dans le système donc d'estimer les besoins de ventilation.

Tableau 3.2 : Récapitulatif des paramètres d'entrée du modèle.

PARAMETRES D'ENTREE FIXES	Dimensions de la serre : • longueur • largeur • volume Paramètres liés à la couverture : • émissivité infra rouge de la couverture • transmissivité infra rouge de la couverture • coefficient d'absorption solaire couverture • coefficient de transmission solaire couverture
--------------------------------------	---

	• capacité surfacique de la couverture Paramètres liés à la boue : • émissivité infrarouge de la boue • coefficient d'absorption solaire de la boue • coefficient de réflexion solaire de la boue • chaleur massique anhydre de la boue • vitesse de séchage réduite Autres paramètres : • surface du support de la boue • constante de Stephan Boltzmann
PARAMETRES D'ENTREE EVOLUTIFS	Données climatiques : • température de l'air extérieur • vitesse de du vent • rayonnement solaire sur une surface horizontale Données sur la boue : • masse initiale • siccité initiale
PARAMETRES SECONDAIRES	Température apparente de rayonnement du ciel. Chaleur latente de l'eau. Grandeurs caractéristique de l'air : • conductivité thermique, • viscosité, • masse volumique, • chaleur massique Coefficients de convection • couverture/air extérieur • couverture /air intérieur • air intérieur / boue Données sur la boue • teneur en base sèche

3.7.4 Résolution du système d'équations :

La formulation du bilan d'énergie de chaque élément détermine un système d'équations différentielles non linéaires dont les inconnues sont les variables d'état de chaque élément, la température T et la teneur en eau du produit à sécher. Les non linéarités proviennent des émittances (termes en T^4 des bilans radiatifs infrarouges).

Ce système d'équations sera résolu par la méthode de newton-raphson dans l'environnement Matlab.

Nous avons opté pour le développement d'un modèle de séchage unidimensionnel combinant les propriétés physiques de la boue et les différents transferts thermiques régissant le séchage. Une mise en équation assez simple des différents phénomènes complexes est effectuée. Nous obtenons ainsi trois équations de bilan d'énergie et une de transfert de matière couplées et non linéaires. Ces équations sont résolues par la méthode de Newton-Raphson.

3.7.5 Regroupement des paramètres :

➤ Regroupement des coefficients :

$$c(1)=R_g*a_c (1 + \tau_c*\rho_b)$$

$$c(2)=\sigma*E_c;$$

$$c(3)=T_v;$$

$$c(4)=\frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_b}+\frac{1}{\varepsilon_c}-1};$$

$$c(5)=h_{ci};$$

$$c(6)=h_{ce};$$

$$c(7)=T_{ae};$$

$$c(8)=(h_b*S_b);$$

$$c(9)=(h_{ci}*S_c);$$

$$c(10)=\rho*Q*C_{pa};$$

$$c(11)=(M_s*L_v)/dts;$$

$$c(12)=S_b* a_b*\tau_c*R_g;$$

$$c(13)=\frac{\sigma*S_b}{\frac{1}{\varepsilon_b}+\frac{1}{\varepsilon_c}-1};$$

$$c(14)=X_i$$

$$c(15)=a_1;$$

$$c(16)=a_2;$$

$c(17)=a_3;$
 $c(18)=a_4;$
 $c(19)=t;$
 $c(20)=\beta *R_g*S_s;$

➤ **Regroupement des équations :**

$$c(1)-c(2)*(T_c^4-c(3)^4)+c(4)*(T_b^4-T_c^4)+c(5)*(T_{ai}-T_c)-c(6)*(T_c-c(7)) = 0$$

$$c(8)*(T_b-T_{ai})+c(9)*(T_c-T_{ai})-c(10)*(T_{ai}-c(7))+c(11)*(c(14)-X_f)= 0$$

$$c(12)-c(13)*(T_b^4-T_c^4)-c(8)*(T_b-T_{ai})-c(11)*(c(14)-X_f)+c(20) = 0$$

$$X_f-c(14)*\exp(-(c(15)+c(16)*T_{ai}+c(17)*T_{ai}^2+c(18)*T_{ai}^3)*c(19)) = 0$$

➤ **Données de la simulation:**

$R_g=600;$
 $\beta=0.5;$
 $m_h=200;$
 $X_i=3;$
 $t=180;$
 $a_1=1*10^{(-3)};$
 $a_2=2.5*10^{(-5)};$
 $a_3=2*10^{(-9)};$
 $a_4=1.5*10^{(-11)};$
 $v=1.5;$
 $R=2;$
 $T_{ae}= 25;$
 $L=10;$
 $l=5;$
 $H=2;$
 $L_v=2500000;$
 $ac=0.85;$
 $\tau_c=0.9;$
 $ab=0.9;$
 $refb=(1-absob);$
 $\sigma=5.67*10^{(-8)};$
 $E_c=0.8;$
 $E_b=0.8;$

➤ **Résultats de la simulation :**

1) La teneur en eau finale en fonction du rayonnement global :

$R_g (w.m^{-2})$	300	400	500	600	700
X_f	0.556	0.5482	0.5407	0.5335	0.5268

(kg eau/kg Ms)					
----------------	--	--	--	--	--

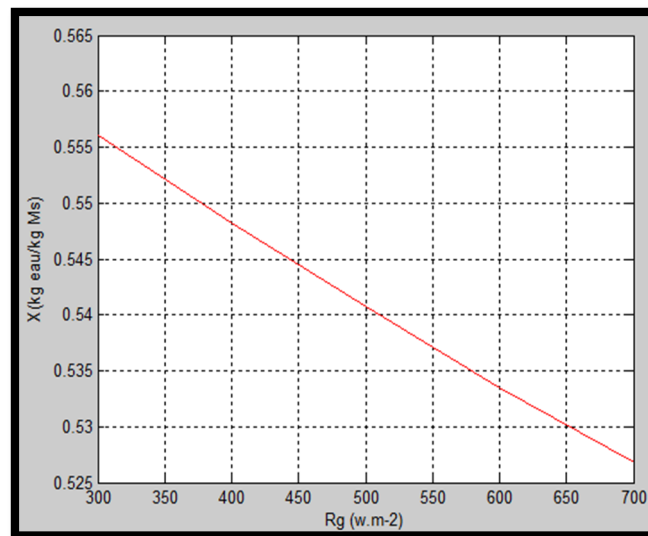


Figure 3.3 : La variation de La teneur en eau finale en fonction du rayonnement global

On remarque qu'il y a une relation proportionnelle décroissante entre la teneur en eau finale et le rayonnement global. Lorsque le rayonnement global diminue la teneur en eau finale diminue.

2) La Température de couverture finale en fonction du rayonnement global :

R_g (w.m ⁻²)	300	400	500	600	700
T_{cf} (°C)	34.0748	40.9061	47.8801	54.9496	62.0753

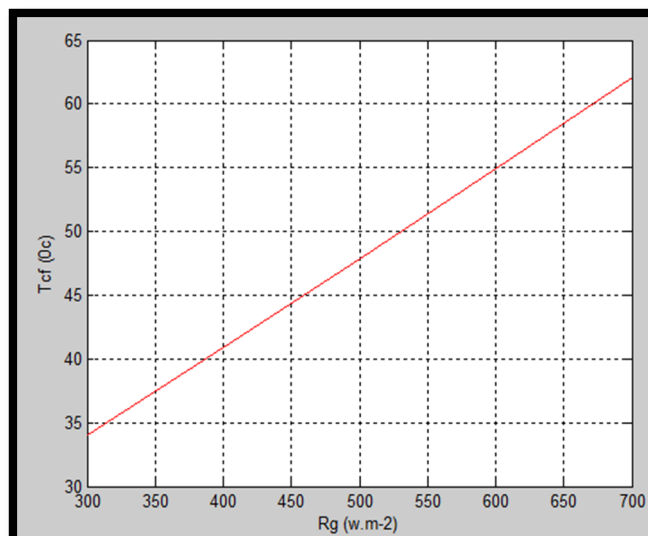


Figure 3.4 : La variation de La Température de couverture finale en fonction de Rayonnement global

On remarque qu'il y a une relation proportionnelle croissante entre la température de couverture finale et le Rayonnement global. Lorsque le rayonnement global augmente la température de couverture finale augmente.

3) Température de l'air intérieur finale en fonction de rayonnement global :

Rg (w.m^{-2})	300	400	500	600	700
Tai ($^{\circ}\text{C}$)	36.1348	38.7635	41.2709	43.6708	45.9746

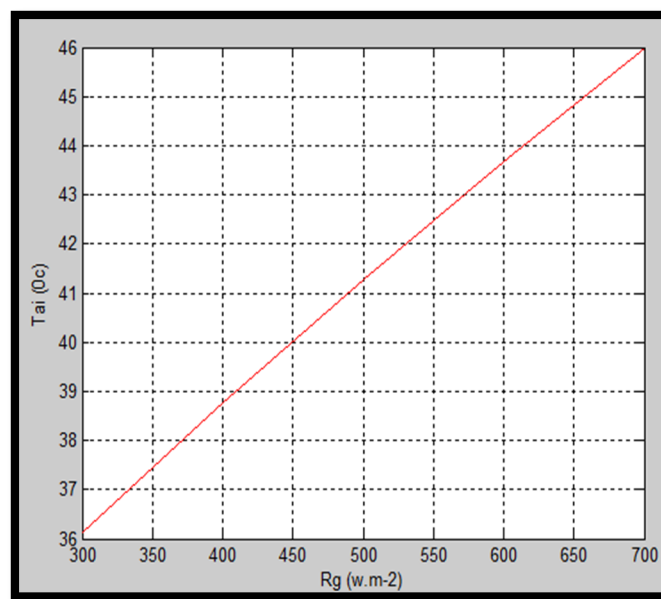


Figure 3.5 : La variation de Température de l'air intérieur finale en fonction de Rayonnement global.

On remarque que la Température de l'air intérieur est reliée proportionnellement au rayonnement global de façon croissante (Température de l'air intérieur augmente lorsque le rayonnement global augmente).

4) Température de la boue finale en fonction de Rayonnement global :

Rg (w.m^{-2})	300	400	500	600	700
Tbf ($^{\circ}\text{C}$)	13.7977	34.8668	54.173	71.9691	88.4693

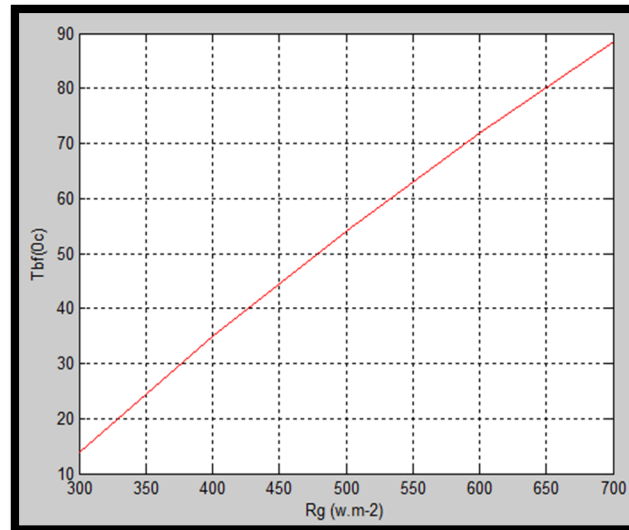


Figure 3.6 : La variation Température de la boue finale en fonction de Rayonnement global

Sur la (figure 3.6) on remarque qu'il y a une relation proportionnelle croissante entre la variation Température de la boue et celle du Rayonnement global

5) La teneur en eau finale fonction de taux de renouvellement d'air :

R (w.m ⁻²)	0.5	1	1.5	2	2.5
Xf (kgeau/kgMs)	0.437	0.4923	0.5183	0.5335	0.5435

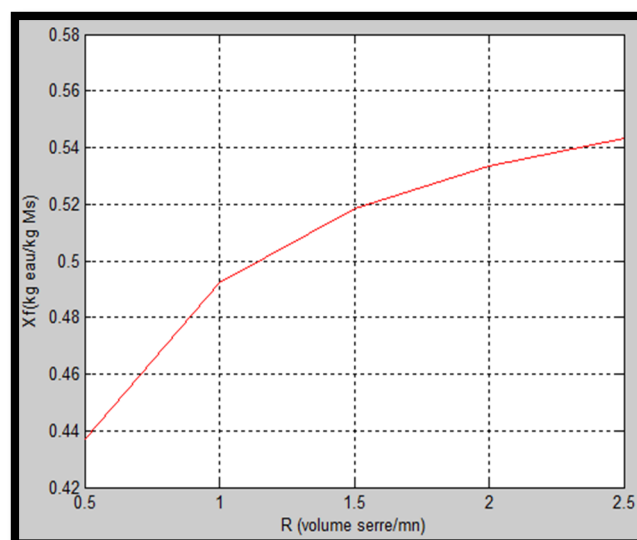


Figure 3.7 : La variation de la teneur en eau finale fonction de taux de renouvellement d'air.

La variation de la teneur augmente à cause de l'augmentation du taux de renouvellement d'air. Donc la variation de la teneur en eau est proportionnelle au taux de renouvellement d'air.

6) Température de couverture finale en fonction de taux de renouvellement d'air :

Tcf (°C)	66.8254	59.8434	56.7186	54.9496	53.812
R	0.5	1	1.5	2	2.5

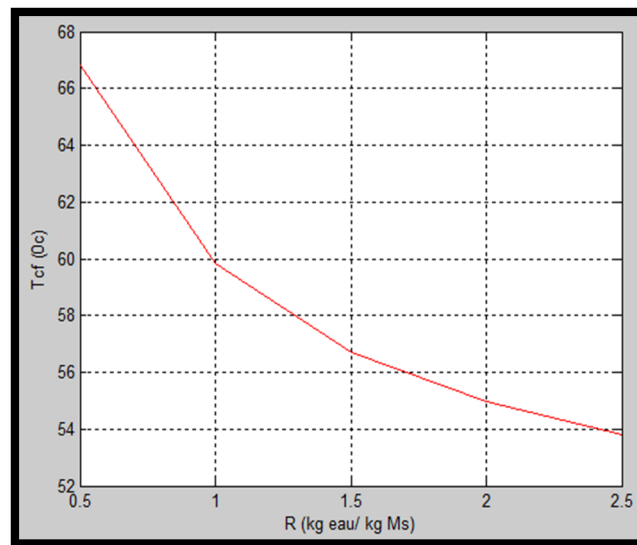


Figure 3.8 : La variation de Température de couverture finale en fonction de taux de renouvellement d'air

La Température de couverture finale varie de façon décroissante avec le taux de renouvellement d'air

7) Température de l'air intérieure en fonction du taux de renouvellement d'air :

Taif (°C)	78.6721	58.0626	48.8685	43.6708	40.3306
R	0.5	1	1.5	2	2.5

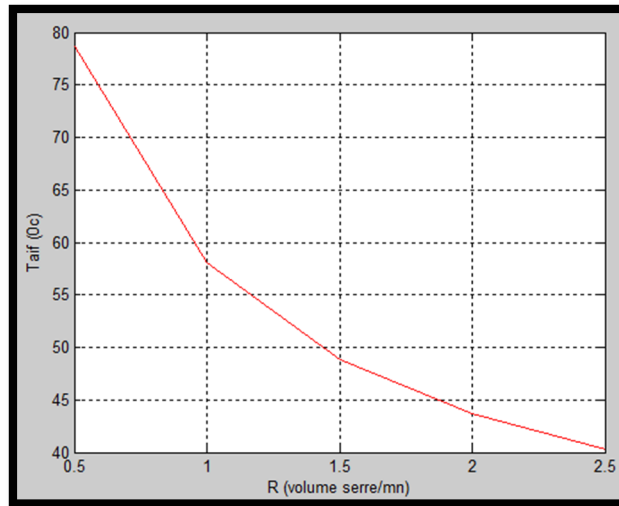


Figure 3.9 : La variation de Température de l'air intérieure finale en fonction du taux de renouvellement d'air.

On remarque à partir du graphe que lors de l'augmentation du taux de renouvellement d'air, il y a une diminution de température de l'air intérieur.

8) Température de la boue en fonction de renouvellement d'air :

T _b (°C)	89.4589	79.2411	74.6084	71.9691	70.2653
R (volume serre/mn)	0.5	1	1.5	2	2.5

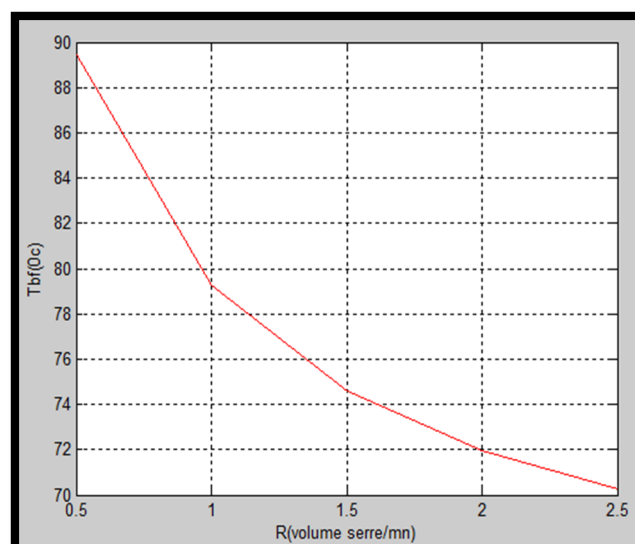


Figure 3.10 : La variation de Température de la boue finale en fonction du taux de renouvellement d'air.

On remarque sur le graphe de la figure (3.10) qu'il y a une diminution de la température de la boue finale lors de l'augmentation du taux de renouvellement d'air.

- 9) Variation de la température de couverture finale en fonction de rapport entre l'énergie solaire et l'énergie de la pompe à chaleur:

Tcf ($^{\circ}\text{C}$)	54.9496	63.1578	71.7627	80.5956	89.5405
Beta	0.5	1	1.5	2	2.5

- Beta : le rapport entre l'énergie solaire et l'énergie de la pompe à chaleur.

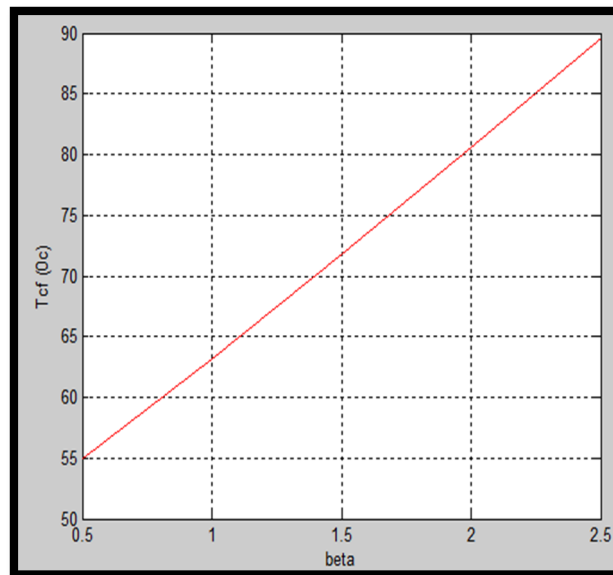


Figure 3.12 : La variation de température de couverture finale en fonction de rapport entre l'énergie solaire et l'énergie de la pompe à chaleur.

On remarque que température de couverture finale varie d'une façon proportionnelle croissante avec le rapport entre l'énergie solaire et l'énergie de la pompe à chaleur.

- 10) Variation de la température de l'air intérieur finale en fonction de rapport entre l'énergie solaire et l'énergie de la pompe à chaleur:

Taif ($^{\circ}\text{C}$)	43.6708	47.347	50.7407	53.91	56.8962
beta	0.5	1	1.5	2	2.5

- Beta : les rapports de l'énergie reçue par la pompe à chaleur

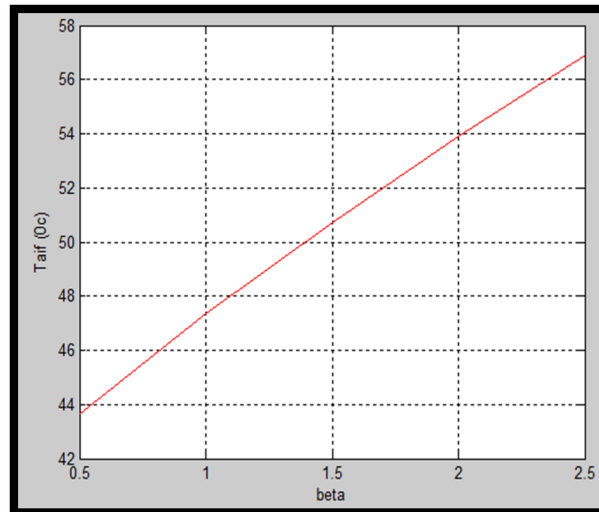


Figure 3.13 : La variation de température de l'air intérieur finale en fonction de rapport entre l'énergie solaire et l'énergie de la pompe à chaleur.

La température de l'air intérieur augmente lorsque beta augmente, donc reliée proportionnellement avec le rapport entre l'énergie solaire et l'énergie de la pompe à chaleur. et de façon croissante.

11) Température de la boue finale en fonction de rapports de l'énergie reçue par la pompe à chaleur :

Tbf (°C)	71.9691	103.7934	131.3959	155.7992	177.7112
Beta	0.5	1	1.5	2	2.5

➤ Beta : les rapports de l'énergie reçue par la pompe à chaleur.

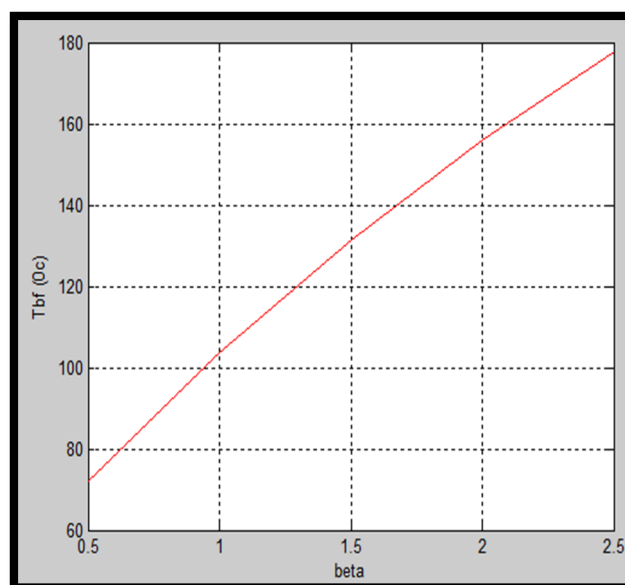


Figure 3.14 : La variation de la température de la boue finale en fonction de rapport entre l'énergie solaire et l'énergie de la pompe à chaleur.

On voit l'effet de la pompe à chaleur dans ce graphique. La température de la boue finale augmente lors de l'augmentation du rapport entre l'énergie solaire et l'énergie de la pompe à chaleur.

12) Teneur en eau finale en fonction de rapports de l'énergie reçue par la pompe à chaleur :

X_f (kg eau/kg MS)	0.5335	0.5227	0.5130	0.5039	0.4956
Beta	0.5	1	1.5	2	2.5

➤ Beta : les rapports de l'énergie reçue par la pompe à chaleur.

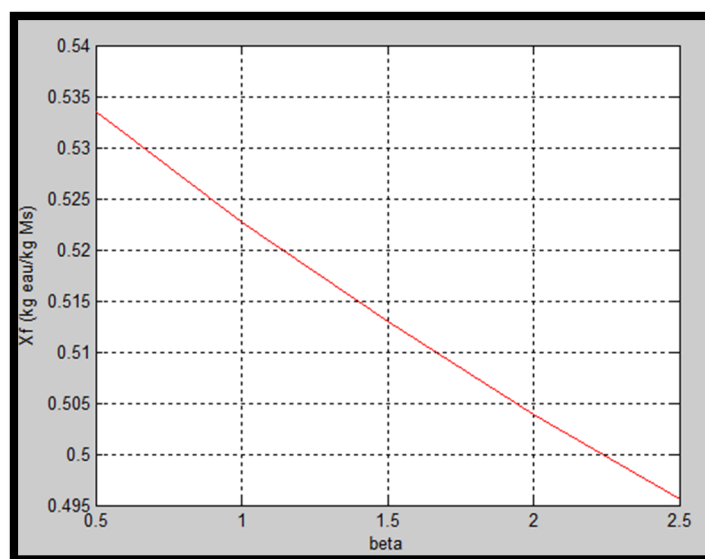


Figure 3.15 : La variation de la teneur en eau finale en fonction du rapport entre l'énergie solaire et l'énergie de la pompe à chaleur.

On remarque que la teneur en eau varie d'une façon proportionnelle décroissante en fonction du rapport entre l'énergie solaire et l'énergie de la pompe à chaleur.

3.8 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons traité la modélisation d'une serre solaire assistée par pompe à chaleur. Un programme écrit sous Matlab a été développé afin de réaliser une étude paramétrique qui permettra de comprendre le fonctionnement de cette serre. On a constaté que l'utilisation d'une pompe à chaleur est bénéfique dans le cas où le rayonnement solaire est faible.

4.1 Introduction:

Les séchoirs à convection sont souvent utilisés pour le séchage des matières solides dans la technologie alimentaire et peut être utilisé pour étudier et de démontrer le processus de séchage par convection de solides granulaires.

Le procédé de séchage consiste en l'élimination de l'humidité d'une substance, impliquant le transfert de chaleur et les phénomènes de transfert de masse dans le même temps.

Notre banc utilise l'une des méthodes les plus usuelles de séchage. Elle consiste à circuler un courant d'air vers le matériau à sécher.

Ce banc permettra l'étude de la mécanique des fluides, les surfaces de la chimie, des structures solides et des substances et des bilans énergétiques liés aux procédés de séchage. Sa taille est particulièrement appropriée pour les laboratoires. [1]

L'appareil se compose d'un tunnel et des plateaux où le matériau à sécher est placé. Il y a un ventilateur axial à l'entrée de ce tunnel. Il fournit l'air nécessaire pour sécher le produit. L'appareil est équipé d'une résistance chauffante qui permet de chauffer l'air et contrôler sa température.

L'unité dispose de thermomètres stratégiquement situés qui permettent de déterminer le taux d'humidité et la température optimales exigées, etc., pour le processus de séchage.

Ces thermomètres sont constitués de deux capteurs de température, l'un d'entre eux est enveloppé par une couverture absorbante (bulbe humide) et l'autre est directement placé sur le tunnel (thermomètre sec). Le degré d'humidité, enthalpie, peuvent être déterminés sur le diagramme de l'air.

Le poids de la matière à sécher peut être connu en temps réel par l'intermédiaire d'une cellule de charge. Le débit d'air peut aussi être mesuré sur ce banc.

Ce petit séchoir à plateaux de paille peut être utilisé dans les laboratoires de transfert thermique au niveau de département mécanique. Opérations unitaires et aussi à l'éducation et à la recherche de technologie alimentaire. [2]

4.2 L'objectif de banc :

L'objectif de banc est d'étudier [1] :

- L'influence de la température de l'air et de l'humidité sur le séchage intensifié.
- Traçage des courbes de séchage avec une constante externe conditions.
- Détermination de la vitesse de séchage avec de l'air différent des paramètres et des propriétés solides.
- L'évaluation des processus de séchage à l'aide de l'énergie et bilans de masse.

4.3 Présentation de quelques bancs didactiques :

A) 1^{er} banc :



Figure 4.1 : banc didactique d'un séchoir à plateau. [3]

Le banc représenté à la (figure 4.1) comprend un conduit d'air carré fabriqué à partir d'acier inoxydable. L'air est aspiré dans le conduit à travers une grille de protection et de débit par amortisseur.

Un ventilateur à flux axial, dont la vitesse peut être contrôlée pour produire une gamme de vitesses d'air dans le conduit. L'air passe sur un élément chauffé électriquement avec contrôle électronique en boucle fermée, qui fournit des températures de l'air stable à la valeur sélectionnée par l'utilisateur.

Un support de plateau est situé dans la section centrale du conduit qui peut contenir jusqu'à trois plateaux de matériau à sécher. L'UOP8-MkII est fourni avec trois plateaux en aluminium revêtus légers adaptés pour des applications alimentaires. Les plateaux sont insérés ou retirés du conduit par une porte verrouillée latérale d'un panneau acrylique à des fins de visualisation. [3]

b) 2^{em} banc :

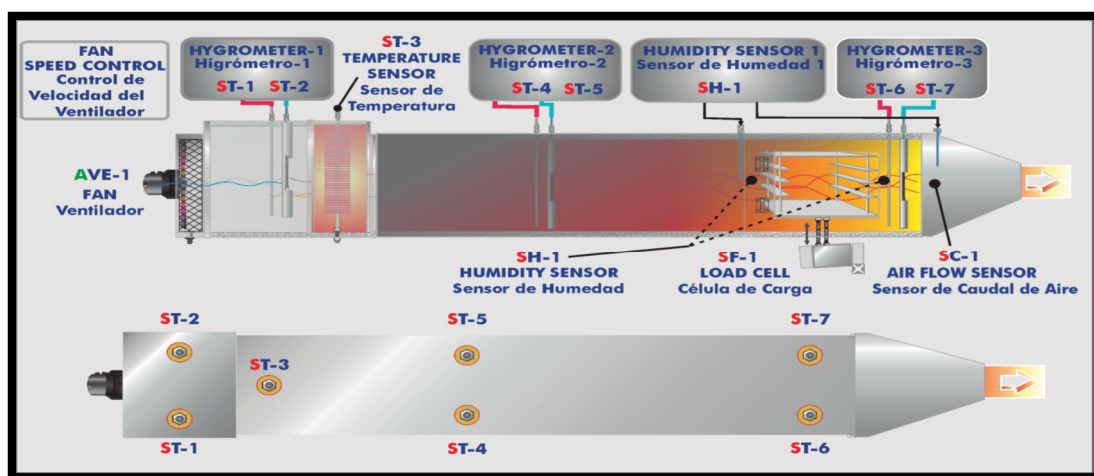


Figure 4.2 : schéma d'un banc didactique. [2]

Le banc représenté à la (figure 4.2) comprend :

ST-1 : Capteur de température (thermomètre sec) : hygromètre 1.

ST-2 : Capteur de température (bulbe humide) : hygromètre 1.

ST-3 : Capteur de température; Résistance électrique.

ST-4 : Sonde de température (thermomètre sec) : hygromètre 2.

ST-5 : Capteur de température (bulbe humide) : hygromètre 2.

ST-6 : Sonde de température (thermomètre sec) : hygromètre 3.

ST-7 : Capteur de température (bulbe humide) : hygromètre 3.

SC-1 : Capteur de débit d'air.

SF-1 : Cellule de charge.

SH-1 : Capteur d'humidité.

AR-1 : résistance de chauffage.

AVE-1 : Ventilateur. [2]

c) 3 eme banc :



Figure 4.3 : Sécheur à convection pour des expériences de séchage sur des solides granulaires. [1]

Ce banc comprend :

- Partie de commande (partie électrique).
- Le balance qui comprend 3 étages, et chaque étage son plats, et aussi le détecteur de poids.
- Un conduit bien isoler qui permet de passer l'air chauffé dans les bons états.
- Un support de banc.

4.4 Conception de notre banc d'un séchoir à plateau :

La figure (4.4) illustre l'ensemble du dispositif expérimental d'un séchoir à plateau. Les principaux éléments de l'installation sont [4] :

- Un ventilateur.
- Un système de chauffage, résistance à air et des instruments de mesure.
- Une balance numérique.

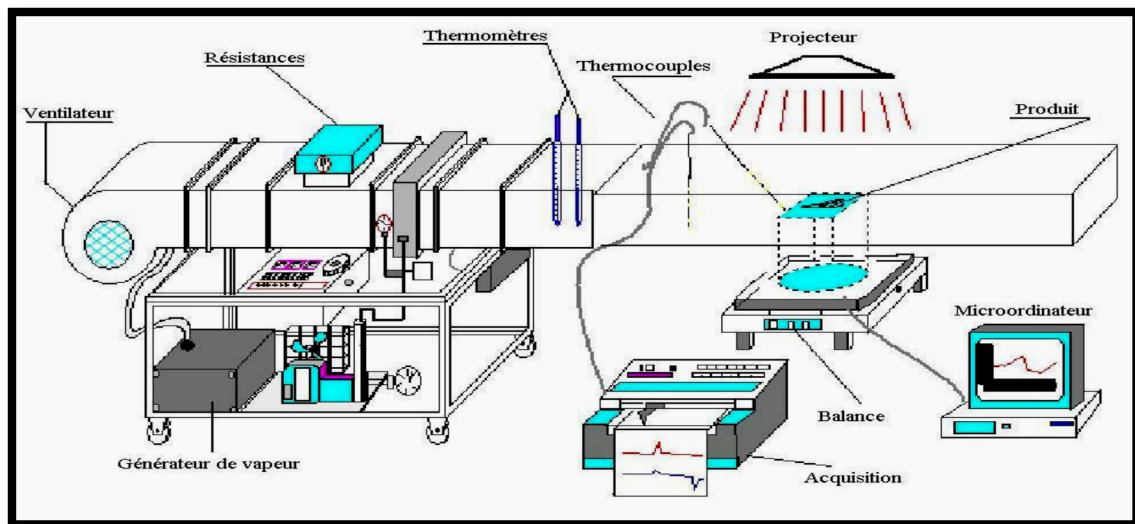


Figure 4.4 : Soufflerie de laboratoire. [4]

4.5 Dimensionnement de notre banc:

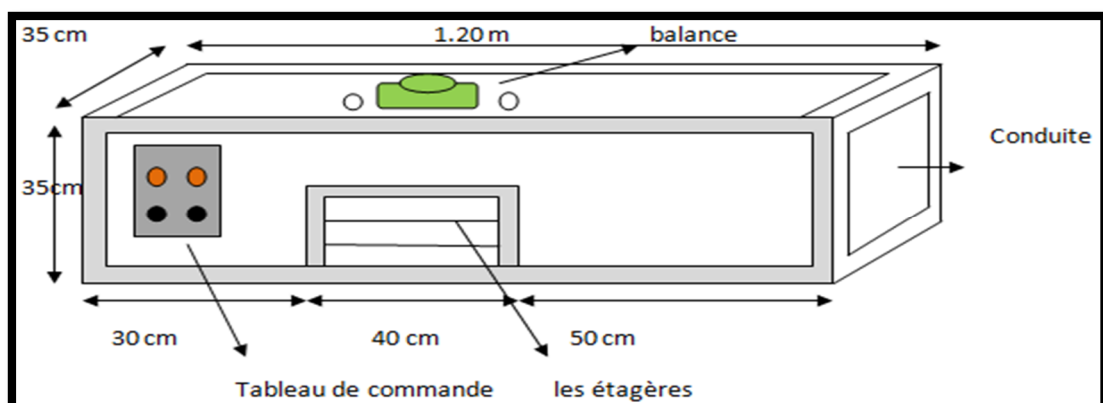


Figure 4.5 : dimensionnement de banc

4.6 Les étapes de la conception :

Avant la réalisation de notre banc on doit tout d'abord faire une conception qui aboutira à :

- Un schéma technologique du banc.
- Une liste des composants essentiels pour la réalisation de ce banc.

L'état de l'art des bancs didactiques présenté dans la recherche bibliographique nous a permis de donner une première configuration de notre module de base (figure 4.6).

La figure 4.6 donne les étapes de la conception de notre banc

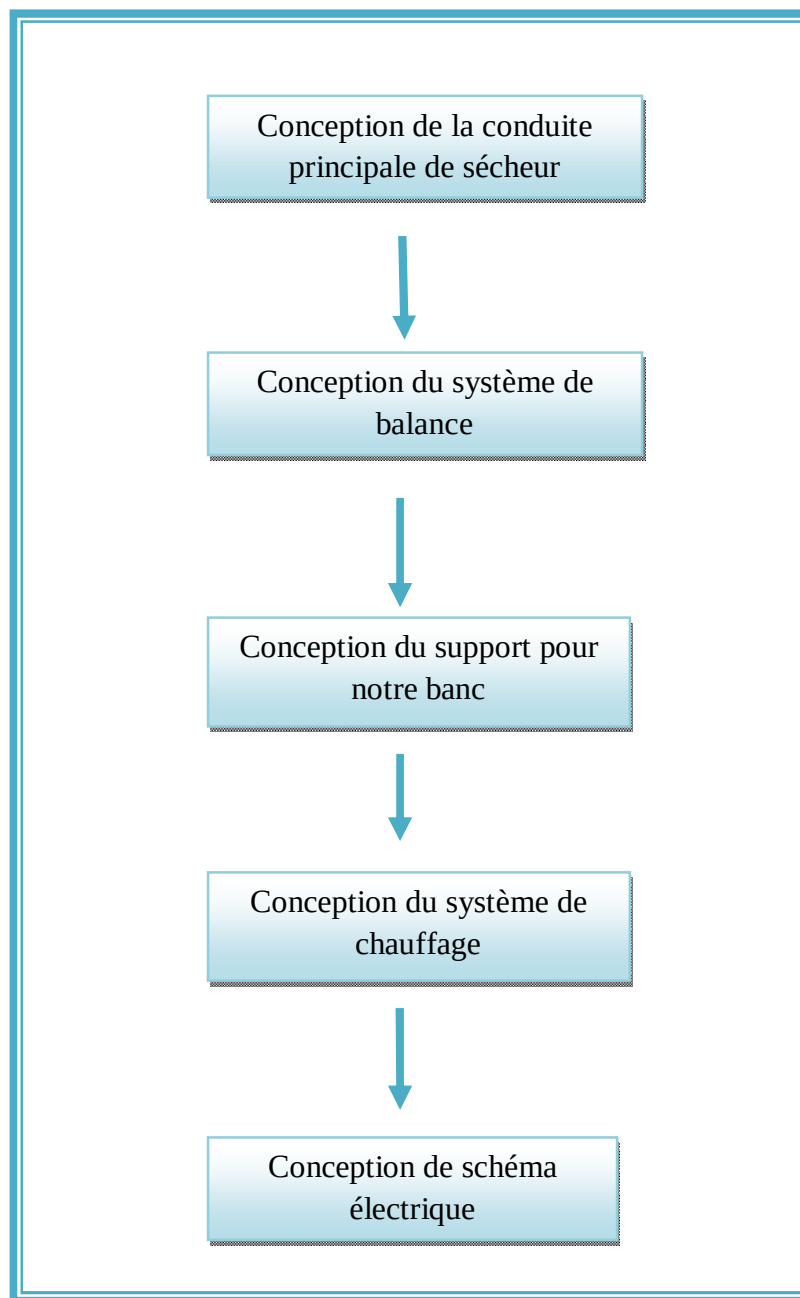


Figure 4.6 : organigramme de la conception

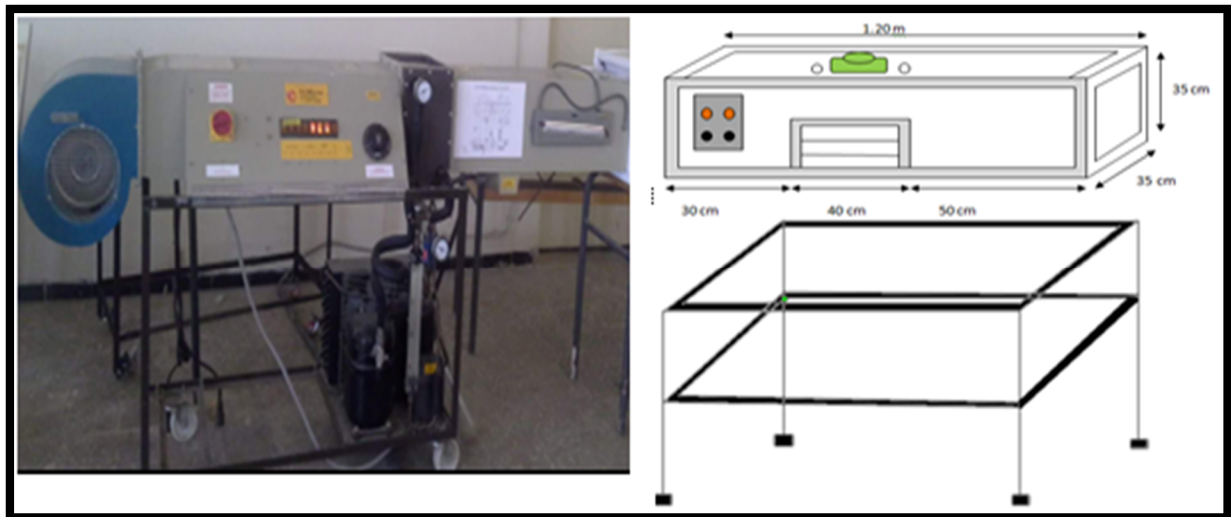


Figure 4.7 : le banc didactique finale

Le schéma de la (figure 4.7) représente la 1^{ère} configuration finale de notre banc couplé au banc de conditionnement d'air déjà existant au niveau de notre laboratoire de transfert thermique. Il nécessite pour sa réalisation les composants essentiels suivants :

- Une conduite principale de séchage
- Un système de la balance
- Un système de chauffage
- Le support de la conduite principale
- Partie électrique

4.6.1 La conception de la conduite principale:

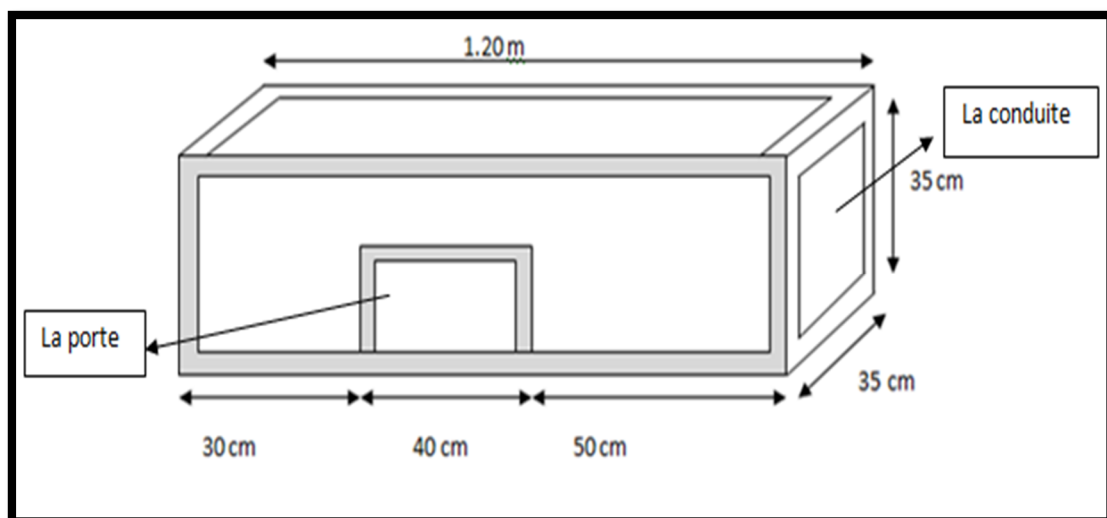


Figure 4.8 : schéma représentatif de la conception de la conduite principale.

4.6.2 La conception du système de la balance :

Le système de balance se compose on deux étage, et chaque étage son plats (les plats doit être léger).

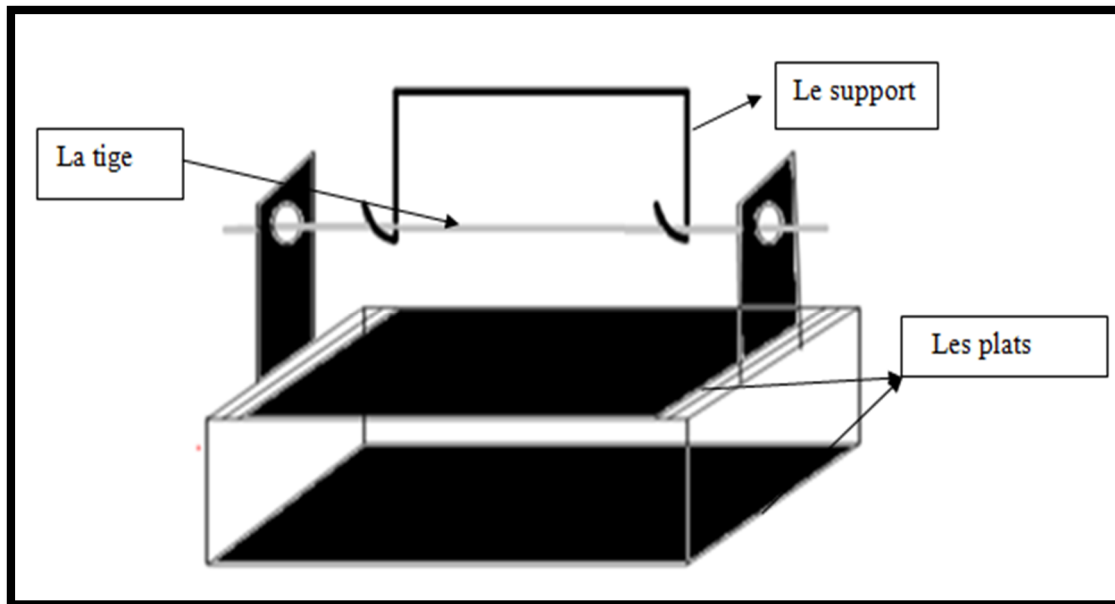


Figure 4.9 : schéma représentatif de la conception de système de balance.

4.6.3 La conception du support du sécheur:

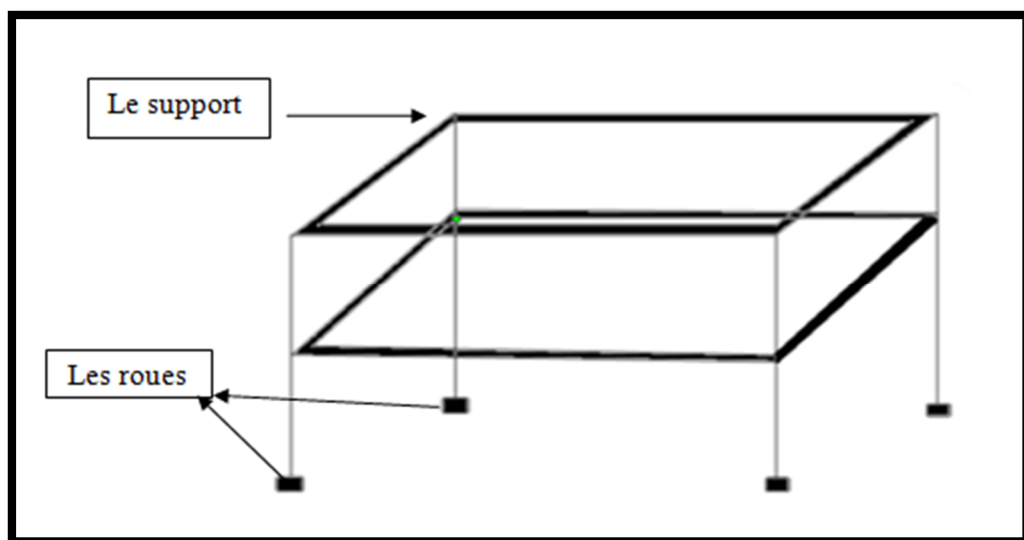


Figure 4.10 : schéma représentatif de la conception du support du sécheur.

4.6.4 La conception de système de chauffage :

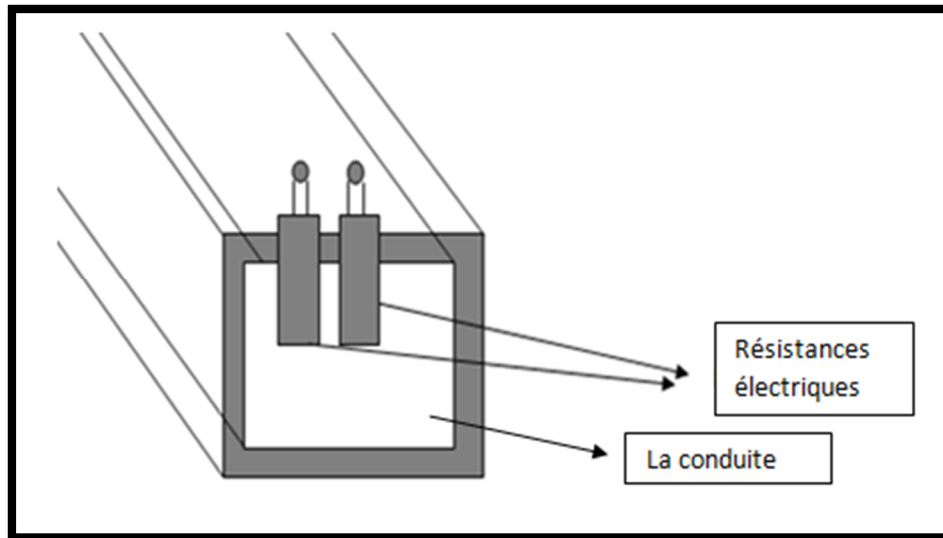


Figure 4.11 : conception de système de chauffage

4.6.5 La conception de la partie électrique :

Cette partie électrique comprend deux résistances chauffants a air pour améliorer la convection au niveau de conduit de séchage, et un lampe pour vue le produit et sa variation de la forme lors de séchage.

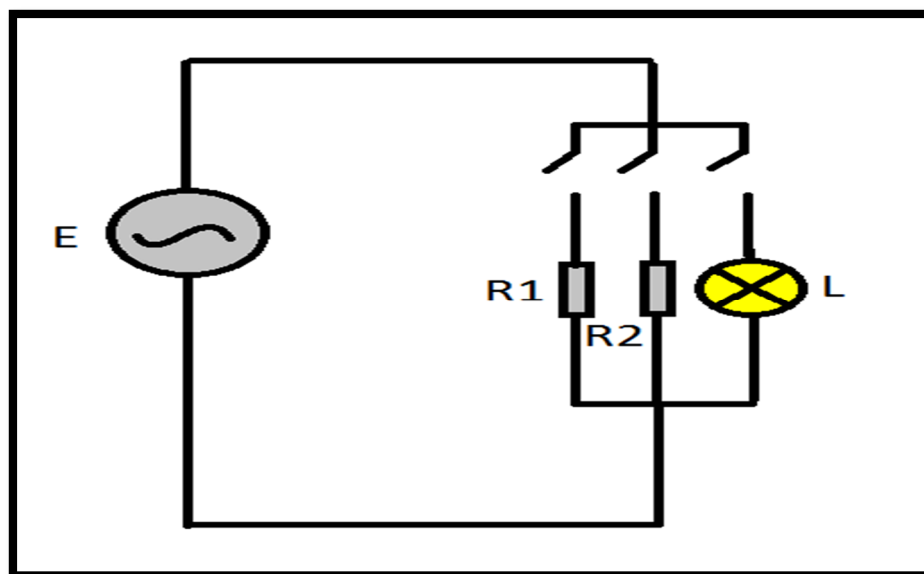


Figure 4.12 : schéma électrique.

E : source (220 v).

R1, R2: résistance thermique à air (0, 75 w).

L: Lampe.

4.6.5.1 la partie de commande :

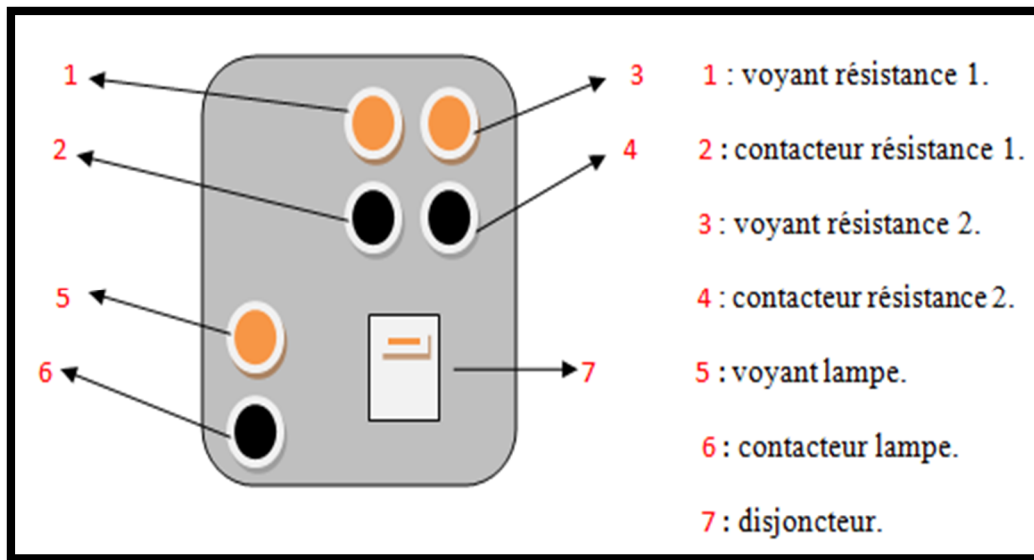


Figure 4.13 : partie de commande.

4.7 Réalisation du banc d'un séchoir à plateau :

L'organigramme de la réalisation de notre banc est donné à la figure (4.14)

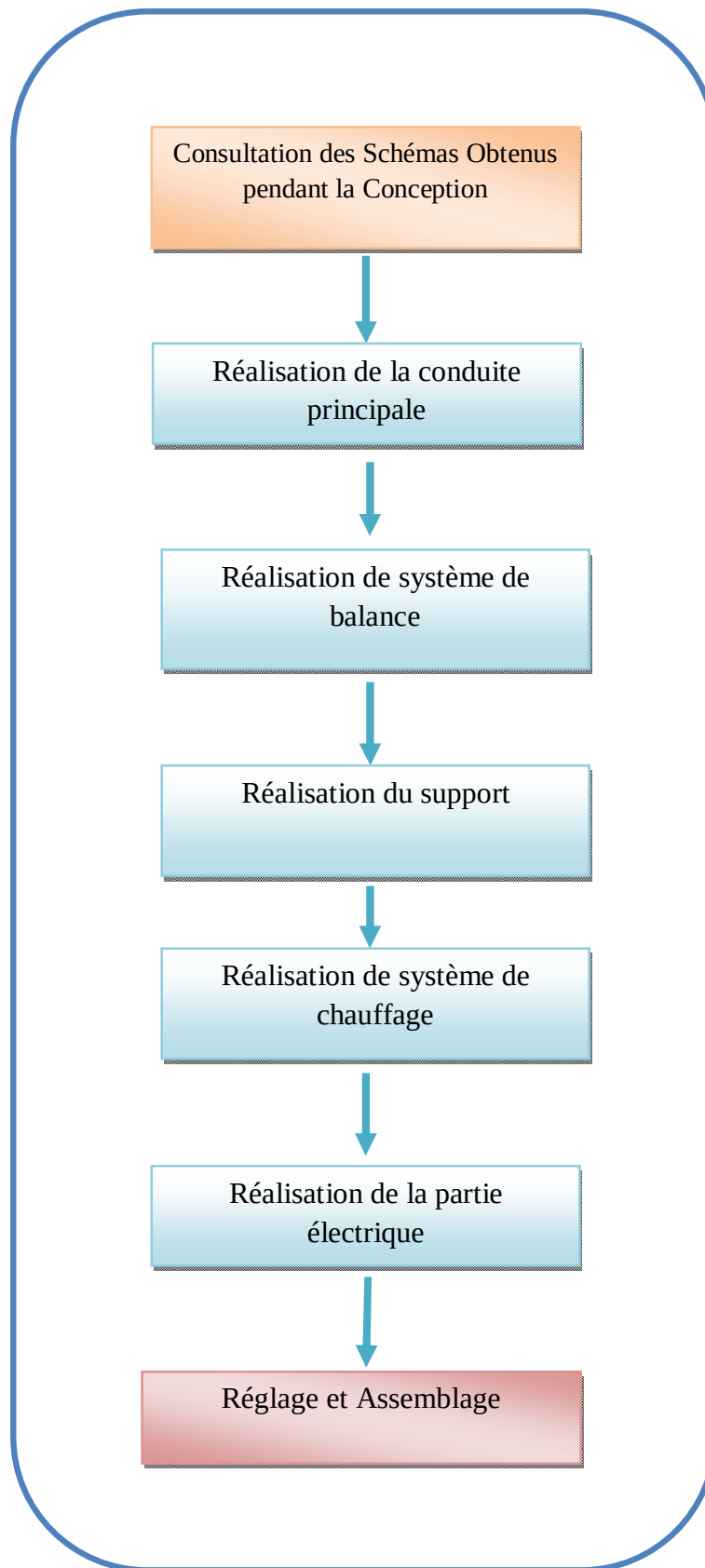


Figure 4.14 : schéma de l'organigramme de réalisation

4.8 Matériels et outillages nécessaires à la réalisation :

La réalisation de tous les modules de notre projet s'est déroulée au niveau des ateliers du département de mécanique. Nous donnons ci-dessous quelques machines et outillages que nous avons utilisés (figure 4.15).

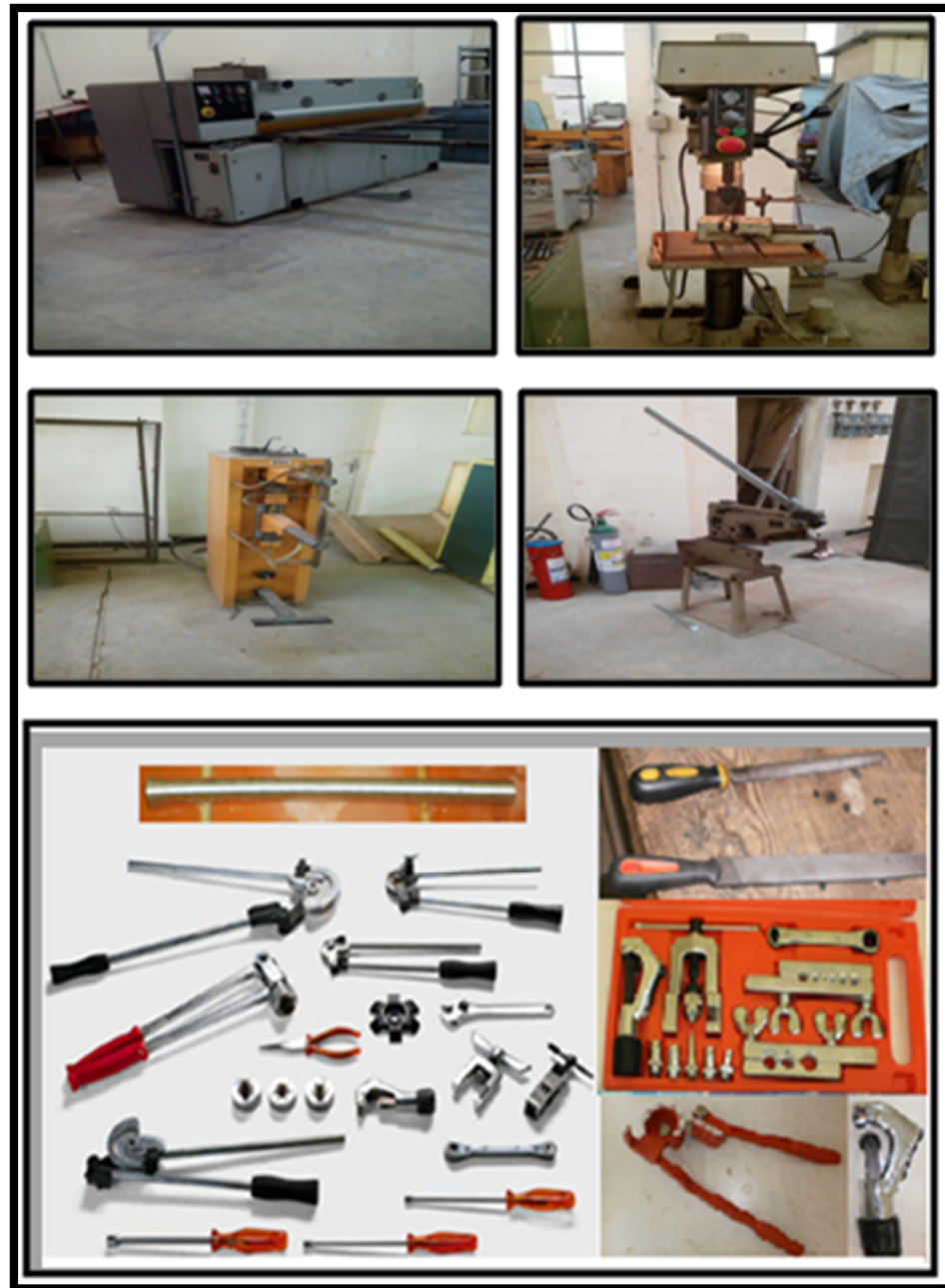


Figure 4.15 : Machines et outillages utilisés dans le cadre de notre projet.

La réalisation de notre projet nécessite des composants qui sont essentiels au bon fonctionnement de notre banc. Les composants du banc sont donnés ci-dessous :

A / balance électronique :

Figure 4.16 : Une balance

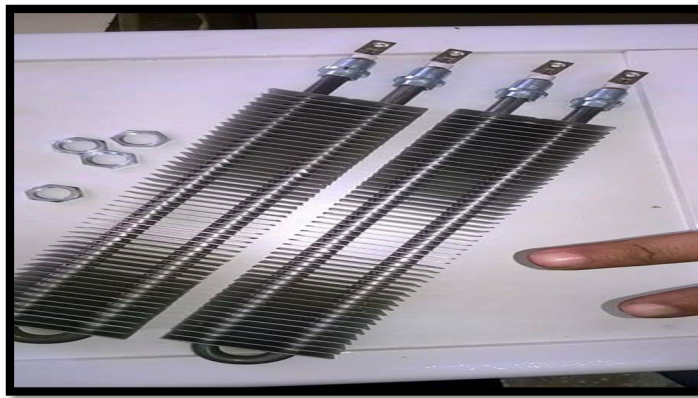
B / les résistances chauffantes :

Figure 4.17 : les résistances chauffantes

C / circuit électrique de commande :

Les composants suivants sont essentiels pour réaliser le circuit électrique

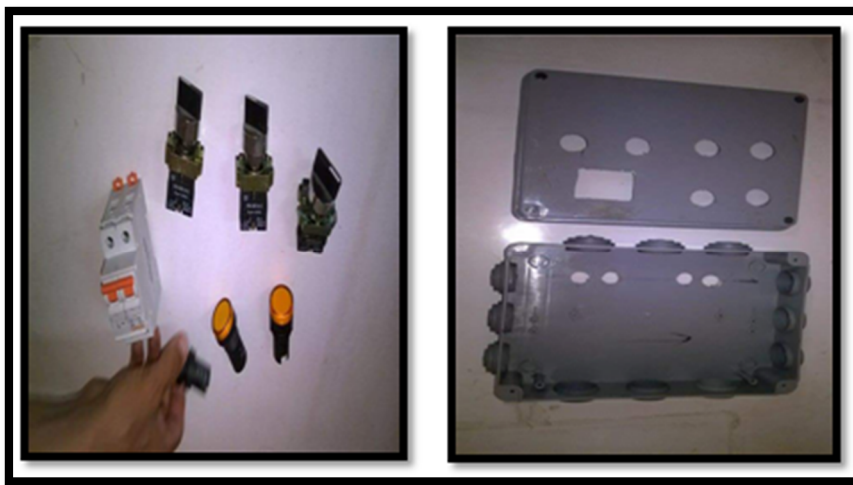


Figure 4.18 : les composants de circuit électrique

En plus des composants, nous avons besoin de la matière première. Les figures (4.18) donnent quelques photos de ces composants et matière première.

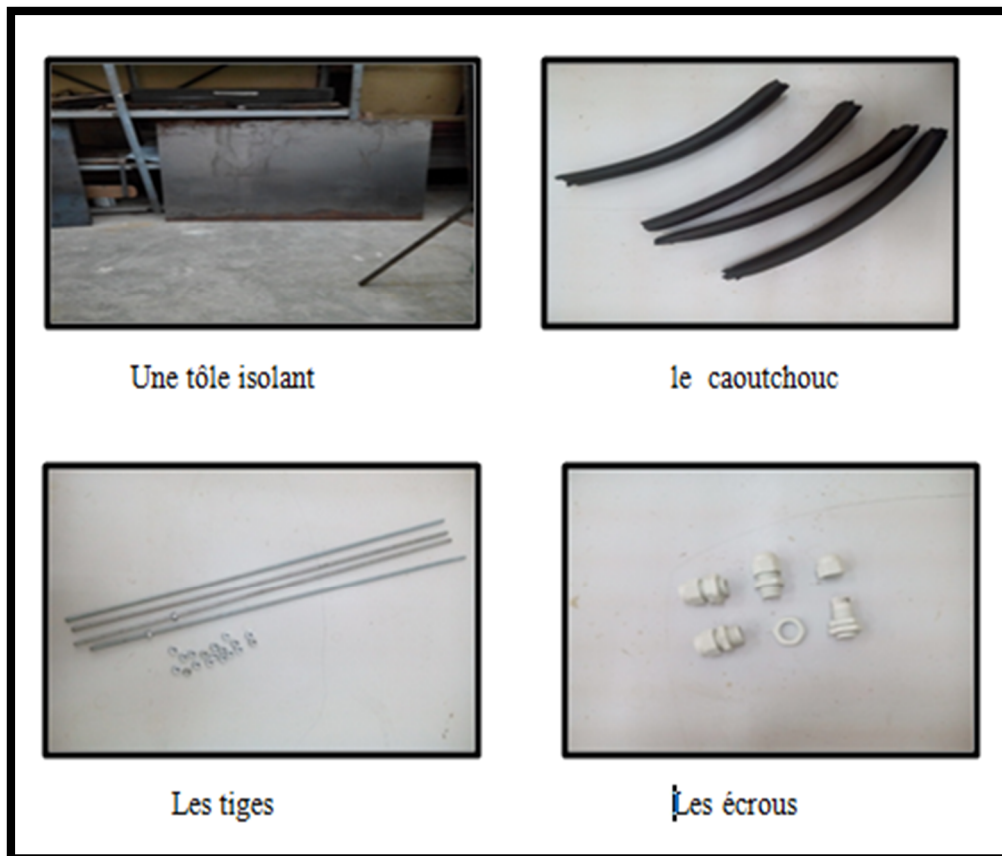


Figure 4.19 : Photos de quelques composants et matière utilisés dans le cadre de notre projet.

4.9 Les étapes de la réalisation de banc :

La réalisation de ce travail se fait étape par étape, nous avons commencé à réaliser chaque élément de l'installation effectuée conformément aux étapes d'écrites dans l'organigramme de la figure (4.14).

4.9.1 Réalisation du tunnel de séchoir :



Figure 4.20 : les composants du sécheur.

4.9.2 Réalisation du système de la balance :

Le système de la balance de notre installation a nécessité un outillage spécialisé utilisé par les tôles, le traceur, une règle, la cisaille guillotine et une presseuse.

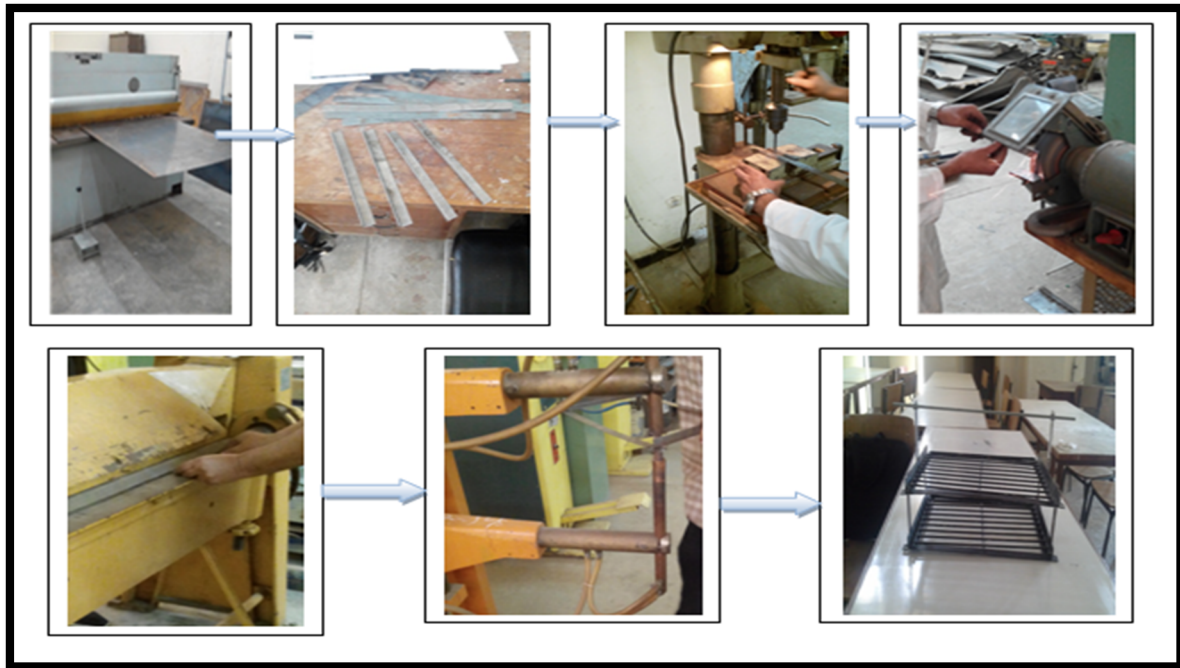


Figure 4.21 : les étapes de la réalisation du système de la balance.

4.9.3 Réalisation de support:

Une table de 110 cm longueur et 45 cm largeur. La table est portée sur quatre roues, deux roues avec frein pour faire déplacer ou fixer la table facilement.



Figure 4.22 : les étapes de réalisation du support.

4.9.4 Réalisation de la partie électrique:

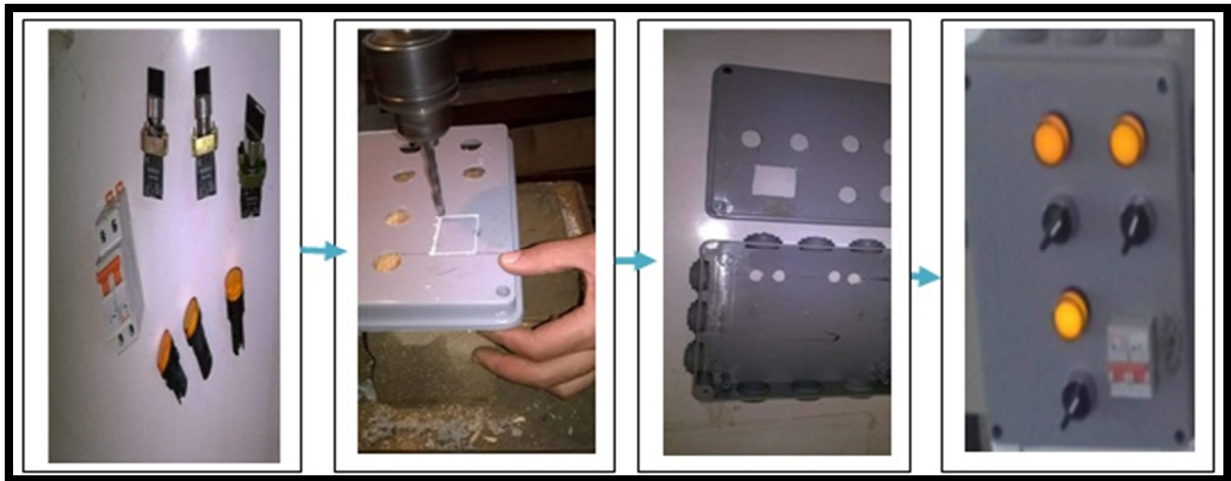


Figure 4.23 : les étapes de réalisation de la partie électrique (partie de commande).

4.9.5 Réalisation de système de chauffage :



Figure 4.24 : photos de système de chauffage

4.9.6 Réglage et assemblage :

Après réglage et assemblage on obtient le banc suivant :



Figure 4.25 : le banc finale.

F) banc finale :

Figure 4.26 : banc didactique finale.

Le banc didactique réalisé sera couplé à un banc didactique de conditionnement d'air déjà existant au laboratoire de transfert thermique du département. La figure (4.26) représente les 2 bancs couplés ensemble.

4.10 Conclusion :

On espère que la réalisation de ce projet se déroule dans des bonnes conditions et qu'il Permettre de combler le manque de manipulations au niveau du laboratoire de thermodynamique et transfert thermique de notre département.

5.1 Introduction :

La détermination de la cinétique de séchage d'un produit de façon expérimentale est nécessaire pour la modélisation du procédé de séchage. L'équation de la courbe de séchage sera injectée dans les équations du modèle du procédé.

Dans notre cas on a pris de la littérature des données expérimentales de quelques produits (la pomme, banane, carotte) pour déterminer leur cinétique de séchage en utilisant quelques modèles de courbe de séchage proposés par certains auteurs (Henderson, Page ...)

On précise que le séchage des produits s'est fait dans un séchoir à plateau.

5.2 Définition de la teneur en eau X:

$$X = \frac{(\text{masse produit humide} - \text{masse produit sec})}{\text{masse produit sec}}$$

$$X_R = \frac{(X - X_e)}{(X_0 - X_e)}$$

X_R : teneur en eau adimensionnelle

X_e : teneur en eau à l'équilibre (Kg/Kg_{ms})

X_0 : teneur en eau initiale (Kg/Kg_{ms})

5.3 Modélisation des courbes de cinétique de séchage :

Plusieurs modèles empiriques ont été utilisés pour modéliser les cinétiques de séchage.

On peut citer : les modèles de Lewis, Page, Henderson...etc. (Tableau 5.1)

Avec : a, b, c, d, e, k₀, k₁, n, = des constantes qui varient selon le modèle utilisé et

t = le temps (durée de séchage).

N°	Equation du modèle	Nom du modèle
1	$X_R = \exp(-kt)$	Newton
2	$X_R = \exp(-kt^n)$	Page
3	$X_R = a.\exp(-kt) + c$	Logarithmique(1)
4	$X_R = a.\exp(-k_0t) + b.\exp(-k_1 t)$	Two-term
5	$X_R = 1 + a.t + b.t^2$	Wang et singh
6	$X_R = a + b.t + c.t^2 + d.t^3$	Polynôme 3eme degré
7	$X_R = a + b.t + c.t^2 + d.t^3 + e.t^4$	Polynôme 4eme degré
8	$X_R = a.\exp(-kt)$	Henderson et Pabis
9	$X_R = a.\exp(-kt) + (1-a).\exp(-k.b.t)$	Diffusion approach
10	$X_R = a.t + b$	Linéaire
11	$X_R = a.t^2 + b.t + c$	Polynôme 2eme degré
12	$X_R = a.\ln(t)$	Logarithmique(2)
13	$X_R = a.\ln(t) + b$	Logarithmique(3)
14	$X_R = a.\exp(-k.t^n) + bt$	Midilli-Kucuk

Tableau 5.1 : les modèles mathématiques des courbes de séchage. [26]

L'ajustement entre les données expérimentales et les données prévues peut être déterminé en utilisant le coefficient de corrélation (R^2), le chi-square (χ^2) et l'erreur moyenne de la racine carrée (RMSE). Le choix du meilleur modèle est basé sur le R^2 le plus élevé, χ^2 et RMSE les plus bas.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(X_{R\text{exp}}(i) - X_{R\text{pre}}(i))^2}{N - n}$$

$$\text{RMSE} = \left[\frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N (X_{R\text{exp}}(i) - X_{R\text{pre}}(i))^2 \right]^{1/2}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_{R\text{exp}}(i) - X_{R\text{pre}}(i))^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{X}_{R\text{exp}} - X_{R\text{pre}}(i))^2}$$

X_{Rexp} : siccité expérimentale

X_{Rpre} : siccité prédite

N : nombre d'expérience.

n: nombre de constantes dans le modèle.

i: l'indice (1...N).

5.4 Organigramme de calcul

A / incertitudes de chaque modèle de cinétique de séchage :

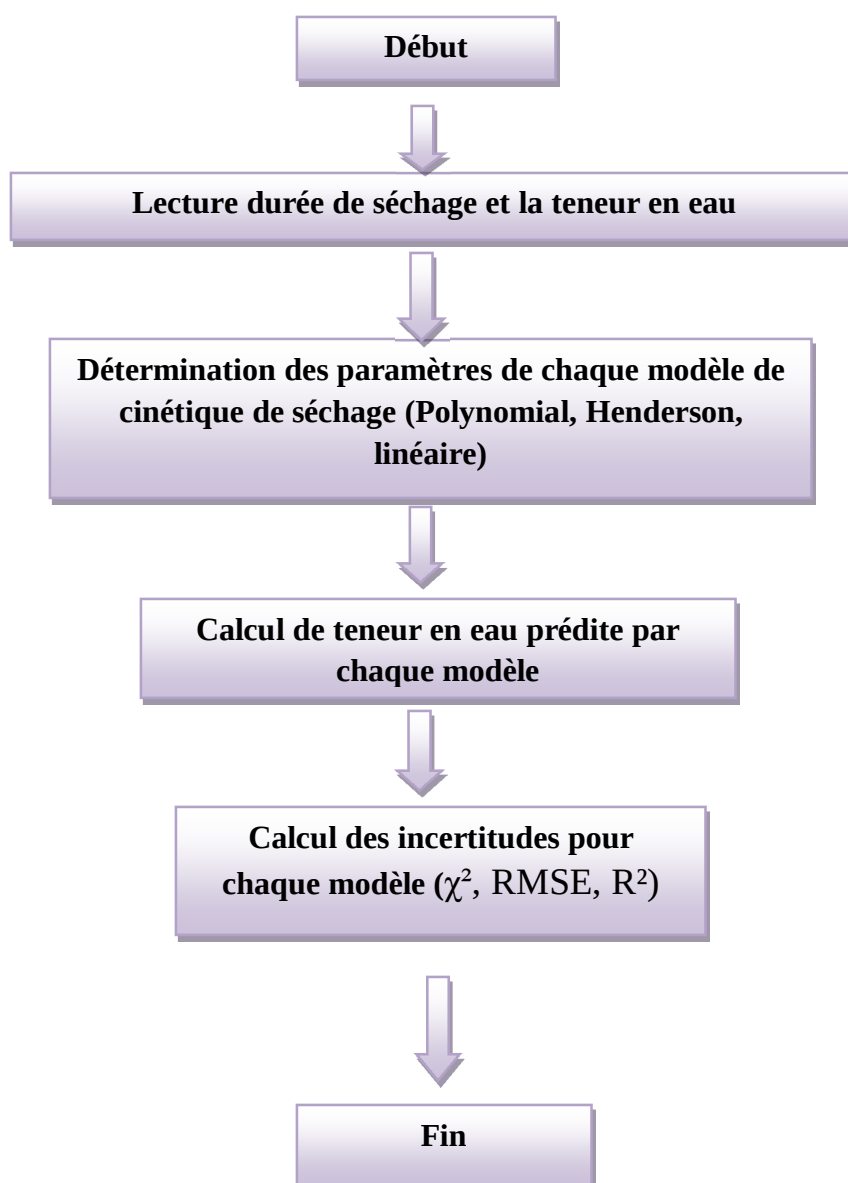


Figure 5.1 : organigramme de calcul de différents coefficients (χ^2 , RMSE, R^2) de chaque modèle.

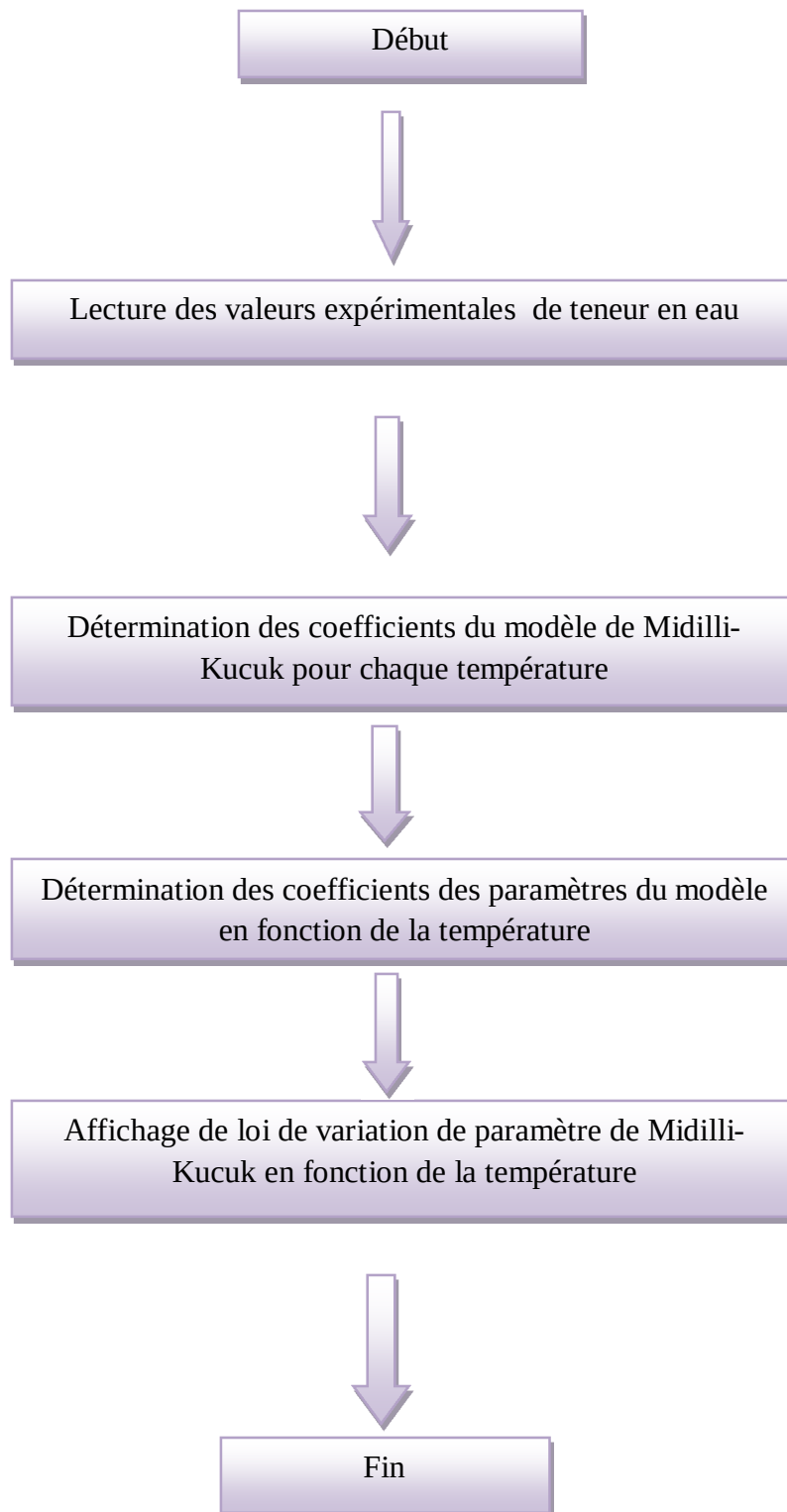
B / détermination des coefficients du modèle de séchage de Midilli en fonction de la température :

Figure 5.2 : Détermination des coefficients des paramètres du modèle Midilli-Kucuk en fonction de la température

5.5 Détermination de la cinétique de séchage de quelques produits :

5.5.1- Produit : pomme

La figure 5.3 montre le produit avant et après séchage dans un séchoir à plateau.

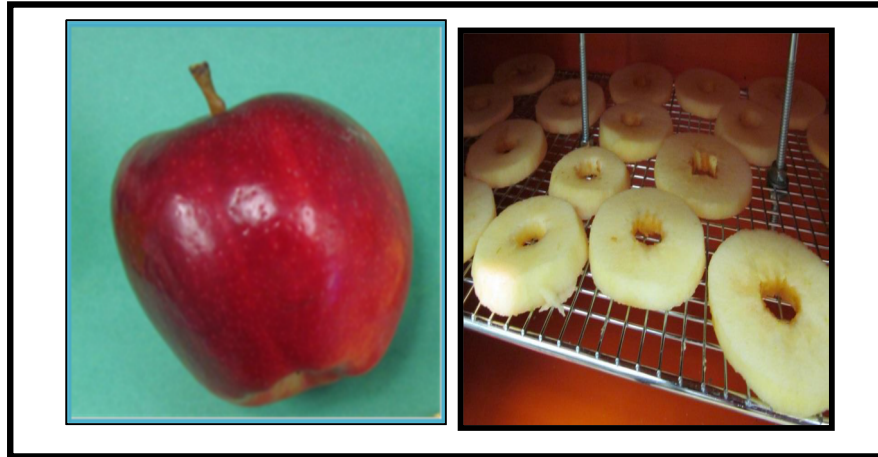


Figure 5.3 : photos représentatif le produit utilisé (pomme) [27].

a) Données expérimentales : L'expérience se fait avec les conditions suivantes : $T = 50\text{ °C}$ et $v = 0.5\text{ m/s}$

X/X0	1	0,673	0,452	0,304	0,205	0,092	0,042
T (h)	0	1	2	3	4	6	8

Tableau 5.2: Les résultats de la teneur en eau de produit sur la teneur en initiale de produit en fonction du temps [27].

b) Courbe de séchage :

La figure 5.4 représente la courbe de séchage de la pomme dans les conditions déjà citées.

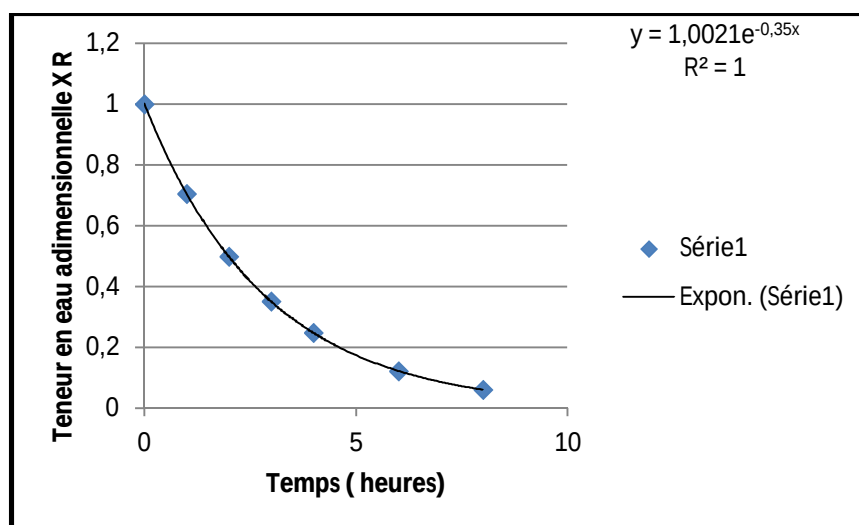


Figure 5.4: Graphe de la teneur en eau adimensionnelle de produit en fonction du temps.

c) Modèle cinétique du produit :

Le tableau 5.3 donne les coefficients de modèle cinétique de notre produit ainsi que R^2 , χ^2 , RMSE.

Modèles	Équations	A	B	C	D	E	K	R^2	χ^2	RMSE
Henderson	Ae^{-kt}	0,999	----	----	----	----	0,397	1	0,170872	0,34935
Polynomiale	At^2+Bt+c	0,020	-0,274	0,957	----	----	----	0,9893	0,171242	0,34973
Polynomiale	$At^4+Bt^3+Ct^2+Dt+E$	0,0003	-0,006	0,070	-0,390	0,999	----	1	0,004577	0,05718
Linéaire	$At+B$	-0,110	0,775	----	----	----	----	0,8302	0,170505	0,34898

Tableau 5.3 : les équations et les modèle de cinétique de séchage de la pomme.

D'après les résultats obtenus, Le modèle de Henderson est le plus approprié pour décrire la cinétique de séchage de la pomme car R^2 est grand tandis que χ^2 et RMSE sont faibles.

5.5.2- Produit : Banane

La figure 5.5 montre le produit avant et après séchage dans un séchoir à plateau.

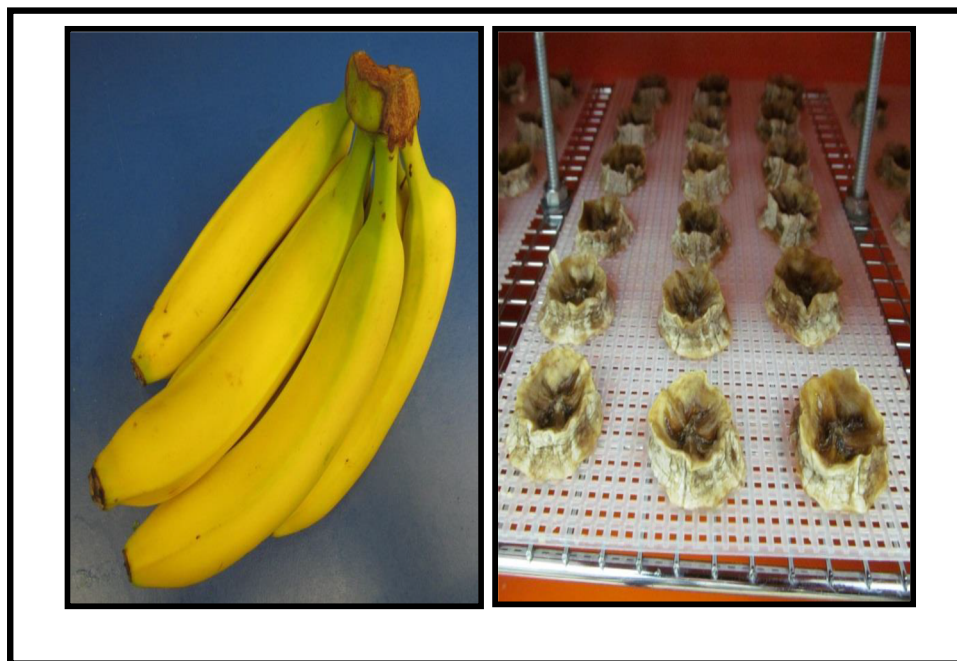


Figure 5.5 : photos représentatif le produit utilisé (banane) [27].

a) Tableau des résultats:

L'expérience se fait avec les conditions suivantes : $T = 50\text{ °C}$ et $v = 0.5\text{ m/s}$

X/X0	1	0,706	0,498	0,352	0,248	0,123	0,061
T (h)	0	1	2	3	4	6	8

Tableau 5.4: Les résultats de la teneur en eau de produit sur la teneur en initiale de produit en fonction du temps [27].

b) Courbe de séchage :

La figure 5.6 représente la courbe de séchage de la banane dans les conditions déjà citées.

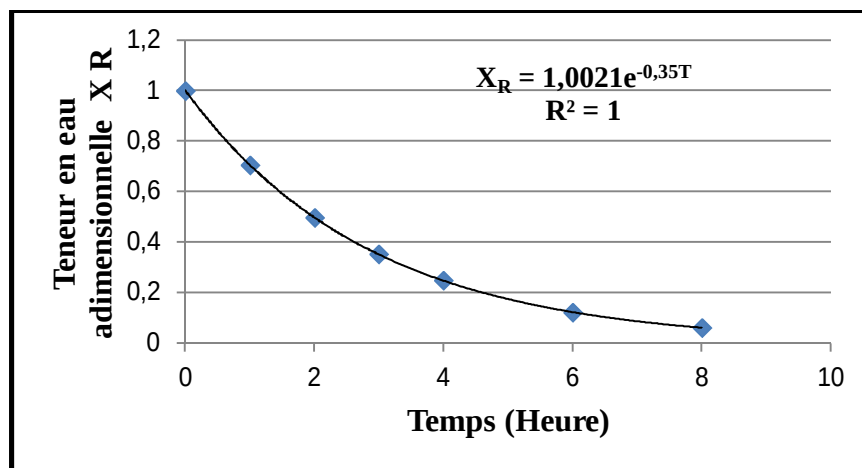


Figure 5.6 : Graphe de la teneur en eau adimensionnelle de produit en fonction du temps.

c) Equations et modèle de cinétique de produit :

Le tableau 5.5 donne les coefficients de modèle cinétique de notre produit ainsi que R^2 , χ^2 , RMSE.

Modèles	Équations	A	B	C	D	K	R^2	χ^2	RMSE
Polynomiale	At^2+Bt+c	0,0182	- 0,256	0,9672	----	----	0,9931	0,00093958	0,025905 2
Polynomiale	At^3+Bt^2+Ct+D	-0,002	0,0419	- 0,3237	0,9962	----	0,9998	0,000031648	0,004754 55
							0,8615	0,01869953	0,115571 65
Henderson	Ae^{-kt}	1,002	----	----	----	0.35	0.998	0,000001393	0,000997 49

Tableau 5.5 : Tableau représente les équations et les modèle de cinétique de séchage de banane.

Les résultats ont montré que la valeur du coefficient de corrélation (R^2) la plus élevée et la valeur de chi-deux (χ^2) et l'erreur moyenne de la racine carrée (RMSE) les plus faibles a été obtenu pour le modèle de Henderson.

5.5.3- Produit : carotte

La figure 5.7 montre le produit avant et après séchage dans un séchoir à plateau



Figure 5.7: photos représentatif le produit utilisé carotte. [27]

a) Données expérimentales :

L'expérience se fait avec les conditions suivantes : $T = 50\text{ °C}$ et $v = 0.5\text{ m/s}$

X/X0	1	0,664	0,441	0,293	0,194	0,085	0,037
T (h)	0	1	2	3	4	6	8

Tableau 5.6 : Les résultats de la teneur en eau de produit sur la teneur en initiale de produit en fonction du temps. [27]

b) Courbe de séchage :

La figure 5.8 représente la courbe de séchage de la banane dans les conditions déjà citées.

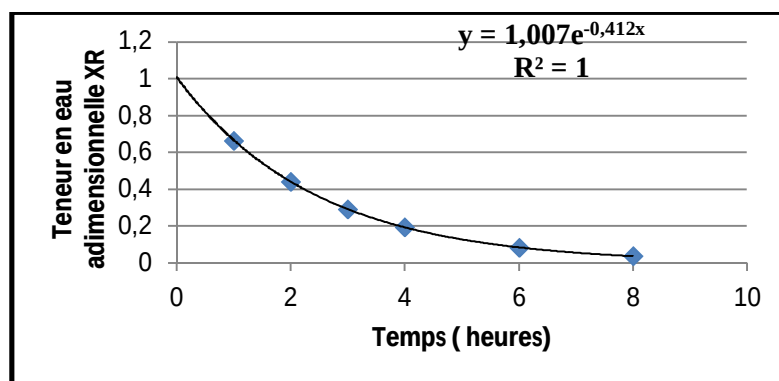


Figure 5.8 : Graphe de la teneur en eau adimensionnelle de produit en fonction du temps..

c) Modèle cinétique du produit :

Le tableau 5.7 donne les coefficients de modèle cinétique de notre produit ainsi que R^2 , χ^2 , RMSE.

Modèles	Équations	A	B	C	D	K	R^2	χ^2	RMSE
Polynomial	At^2+Bt+c	0,021	-0,279	0,955	----	----	0,988	0,00169	0,0347
Polynomial	At^3+Bt^2+Ct+D	-0,002	0,052	- 0,369	0,994	----	0,999	0,02945	0,1450
Linéaire	$At+B$	-0,111	0,768	----	----	----	0,822	0,02537	0,1346
Henderson	Ae^{-kt}	1,004	----	----	----	0.412	1	0,00000 4	0,0017

Tableau 5.7 : Tableau représente les équations et les modèles de cinétique de séchage de carotte.

Le modèle de Henderson est le plus approprié pour décrire la cinétique de séchage de la carotte car R^2 est grand tandis que χ^2 et RMSE sont faibles.

5.6 Détermination de la cinétique de séchage dans des conditions variables :

Dans le cas où on varie la température de séchage, on détermine les coefficients du modèle choisi en fonction de la température (détermination de la courbe de tendance des coefficients du modèle en $f(T)$).

On a pris dans ce cas le séchage de menthe verte à des températures variables.

➤ Cinétique de séchage de la menthe verte :

La figure 5.9 montre le produit avant et après séchage dans un séchoir à plateau

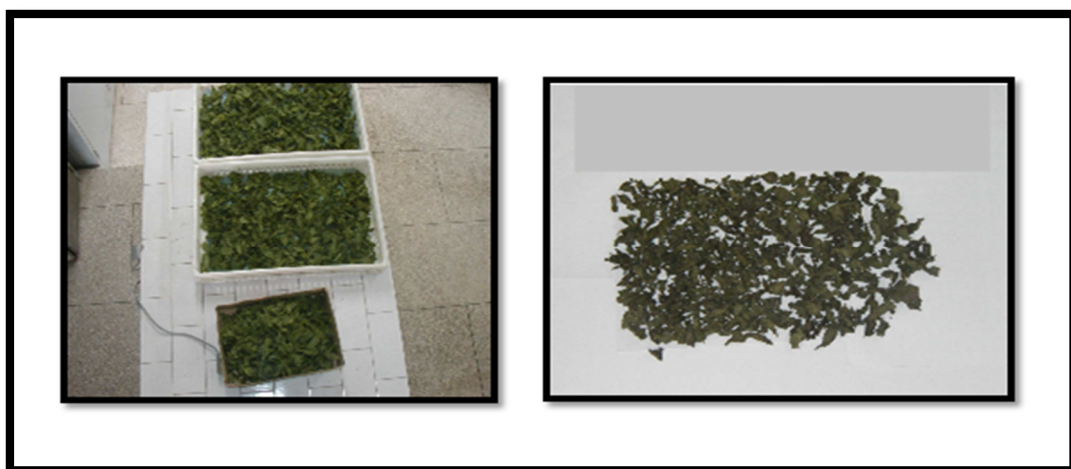


Figure 5.9 : photos représentatif le produit. [26]

a) Tableau des résultats :

Les essais ont été effectués pour quatre températures de l'air asséchant (40,45, 50 et 55°C).les conditions de séchage au cours de ses essais sont mentionnées dans le tableau 5.8.

T ° C	V (m/s)	X _{in} (kg h ₂ O/kgms)	X _f (kg h ₂ O/kgms)	X _f / X _{in}	t(mn)
40	1.5	8.8814	1.1442	0,1288	320
45	1.2	8.2850	0.9127	0,1101	315
50	1	5.1652	0.177	0,0342	245
55	0.8	4.8411	0.1261	0,0260	220

Tableau 5.8 : conditions de séchage au cours des essais. [26]

b) Courbe de séchage :

La figure 5.10 représente la courbe de séchage de la menthe verte dans les conditions déjà citées.

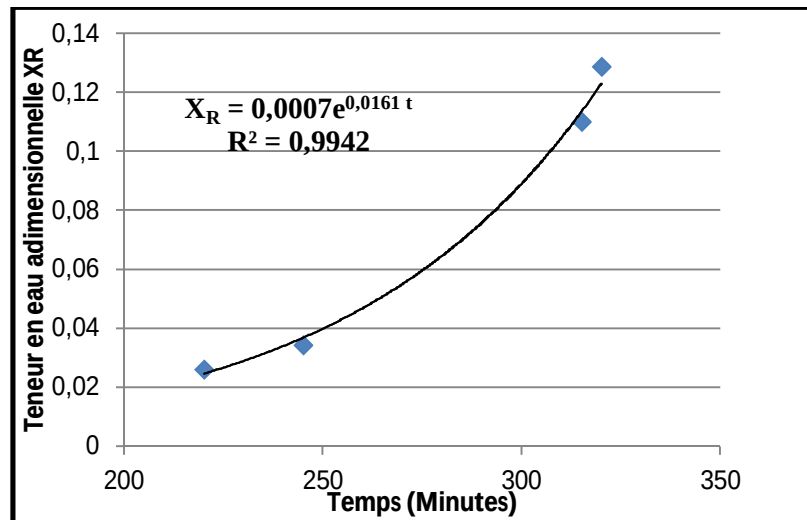


Figure 5.10 : Graphe de la teneur en eau adimensionnelle de produit en fonction du temps.

Cette courbe est montrée que le séchage à des températures variables est plus performant que celui à des températures constantes. Au cours du séchage à température croissant, les excitations lors du changement de la température a créé une accélération du phénomène d'évaporation, donc vitesse de séchage la plus élevée avec une masse finale et un temps de séchage le plus faible.

c) Modèle de cinétique de produit :

Le tableau 5.9 donne les coefficients de modèle cinétique de notre produit ainsi que R^2 , χ^2 à 55°C.

Modèle	coefficients	R ²	χ^2
Page	K=0.01807 ; n=0.92957	0.99243	0.00069
Newton	K=0.01339	0.99056	0.00084
Logarithmique	a= 1.0286 ; K= 0.01085 ; c= - 0.07475	0.99532	0.00044
Midilli-Kucuk	a=1.01218; K=0.0315;b=-0.00076 ; n=0.75588	0.99913	0.00008

Tableau 5.9: Modélisation de séchage de la menthe verte à 55°C.

Pour tous les essais à des températures variables, les données de la teneur en eau adimensionnelle en fonction du temps ont été adaptées à modèles de séchage (Tableau 5.9). Les coefficients des modèles de séchage ont été déterminés et présentés dans les tableaux 5.9, 5.10. Les résultats ont montré que la valeur du coefficient de corrélation (R²) la plus élevée et la valeur de chi-deux χ^2 la plus faible a été obtenu pour le modèle de séchage Midilli-Kucuk. L'équation de ce modèle est la plus appropriée, qui décrit la courbe de séchage de la menthe verte à température variable. Pour les essais de séchage à température constante, les coefficients du modèle Midilli-Kucuk ont été déterminés en fonction de la température et représenté dans les équations ((1)-(4)).

Coefficient	40°C	45°C	50°C	55°C
a	1.02127	0.98471	0.99148	1.01218
k	0.04811	0.02243	0.01065	0.0315
n	-0.0004	-0.0003	-0.00069	-0.00076
b	0.65114	0.82687	0.94187	0.75588

Tableau 5.10 : Valeurs des coefficients du model Midilli-Kucuk en fonction de la température.

➤ $a = f(T)$:

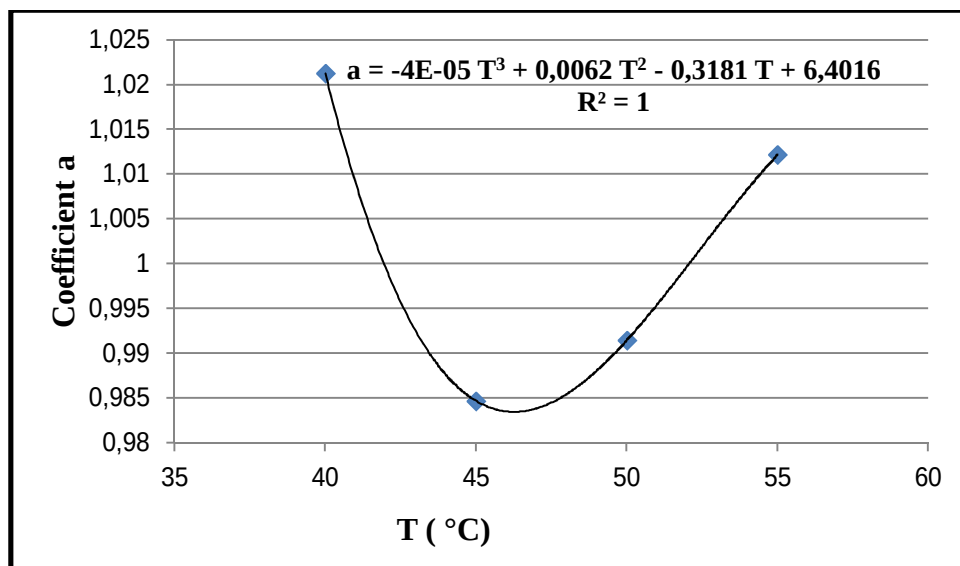


Figure 5.11 : la variation de coefficient(a) en fonction de la température.

➤ $k = f(T)$:

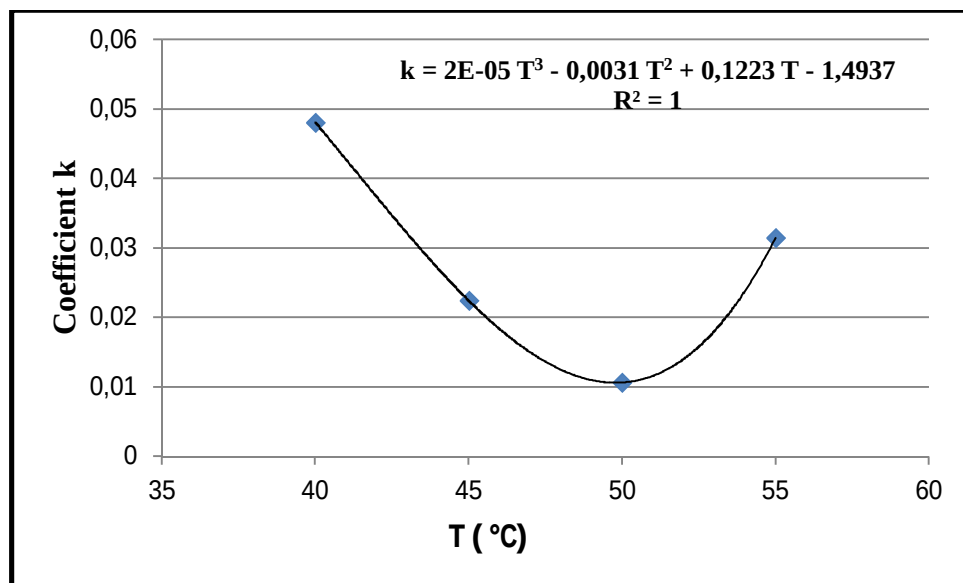


Figure 5.12 : la variation de coefficient(k) en fonction de la température.

➤ $n = f(T)$:

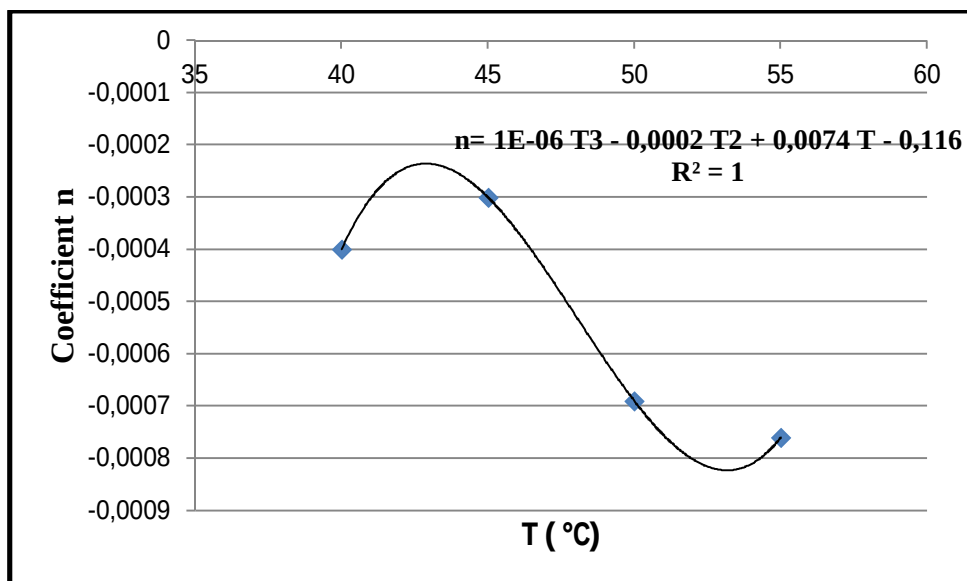


Figure 5.13 : la variation de coefficient (n) en fonction de la température.

➤ $b = f(T)$:

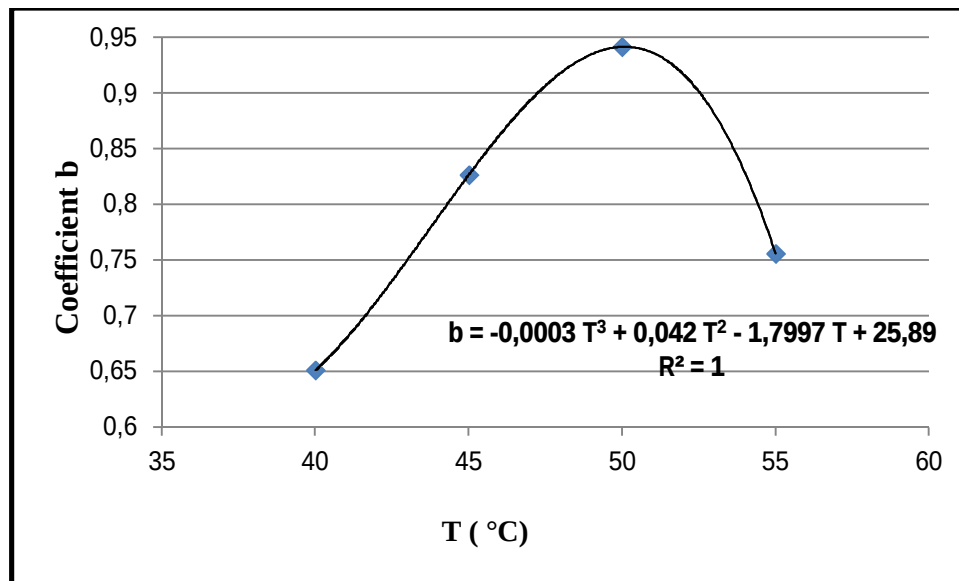


Figure 5.14 : la variation de coefficient(b) en fonction de la température.

Ces quatre expressions (équations (1)-(4)) ont bien prédit la teneur adimensionnelle de l'humidité de la menthe verte aux quatre températures constantes 40, 45, 50, 55°C avec un (R^2) de 1 et χ^2 de 0.

$$a = 6,4016 - 0,3181 T + 0,0062 T^2 + 410 \cdot 10^{-5} T^3 \quad (1)$$

$$k = -1,4937 + 0,1223 T - 0,0031 T^2 + 2 \cdot 10^{-5} T^3 \quad (2)$$

$$b = 25,89 - 1,7997 T + 0,042 T^2 - 0,0003 T^3 \quad (3)$$

$$n = -0,116 + 0,0074 T - 0,0002 T^2 + 1 \cdot 10^{-6} T^3 \quad (4)$$

5.7. Mise en marche du banc expérimental:

a. Vérification matériel :

Matériel nécessaire :

- ☒ Une balance.
- ☒ Résistances chauffantes.
- ☒ Une lampe.
- ☒ Un conduit (tunnel).
- ☒ Système de balance.
- ☒ Un support du conduit.

Mode opératoire :

- Raccordement de matériel nécessaire (résistances, lampe, ...etc.).
- Utilisation d'une balance afin de connaître la quantité de produit totale introduite dans l'installation.
- Démarrage de l'installation.
- Ajustement de la température jusqu'à obtention d'un séchage en bon condition.

b. Procédure de vérification avant mise en service :

- ✓ Vérification visuelle de l'état du banc.
- ✓ S'assurer de l'augmentation de la température jusqu'à une valeur pour assurer le séchage dans les bonnes conditions.
- ✓ Vérification du support de balance.
- ✓ Vérifier le bon fonctionnement de la balance numérique.
- ✓ Vérification des raccordements électriques (partie commande, la lampe, les résistances ...etc).
- ✓ Vérifier de l'afficheur de température.

c. Procédure de mise en marche :

Tout d'abord l'installation doit être terminée avec tous les raccordements électriques. La procédure de mise en service est décrite ci-dessous :

- o Alimentation du banc via le disjoncteur électrique.
- o Mise en marche de l'afficheur de température.
- o Mise en marche de (résistances chauffant, balance, lampe....etc.).
- o Démarrage de la soufflerie avec ces résistances.

d. Procédure de vérification du bon fonctionnement :

Lors du premier démarrage on doit vérifier que le fonctionnement est normal et que les résistances atteignent certaine valeur de température d'entré efficace pour le séchage.

Tableaux des prix :

Recherche bibliographique

1. Documentation technique et théoriques:

Une définition globale sur la théorie et la pratique du séchage ainsi que les différents procédés de séchage ont été données par André Charreau et Roland Cavaillé [1] et M. Dagueneat [5].

Les sites internet spécialisés [2] et [3] donnent des notions sur le séchage solaire et son application dans le domaine alimentaire.

R. Benkhelfellah a réalisé des études comparatives sur la cinétique de séchage des produits agroalimentaires dans les différents types de séchoir [6].

Dans leur article, S. El Mokretar, R. Miri et M. Belhamel, étudient le bilan énergétique d'un séchoir solaire de type serre et ont fait le relevé temporel des paramètres suivants : les différentes composantes du rayonnement solaire, le taux d'humidité relative et les valeurs de température de l'air asséchant dans ce modèle [7].

Haoua Amado donne une étude sur la modélisation de séchage solaire sous serre des boues de station d'épuration [21].

Le séchage des feuilles de la menthe verte dans un séchoir solaire a été étudié théoriquement et expérimentalement par Boumediene TOUATI [26].

Dans leur article, Aida BAYOUDH, Jalila SGHAIER et Hatem MHIRI se sont intéressés à l'étude expérimentale de l'élimination des boues issues des stations d'épuration. Le séchage est réalisé dans d'une serre solaire régulièrement renouvelée d'air sous laquelle est étalée une couche des boues d'épuration [28].

Une modélisation en régime non nominal d'une pompe à chaleur destinée au tertiaire a été réalisée par Elias KINAB. Le modèle validé expérimentalement est couplé à un modèle de besoins de bâtiment afin d'évaluer les performances saisonnières de la PAC et d'améliorer la conception en fonction de ce critère [29].

1.2 Etat de l'art des bancs didactiques :

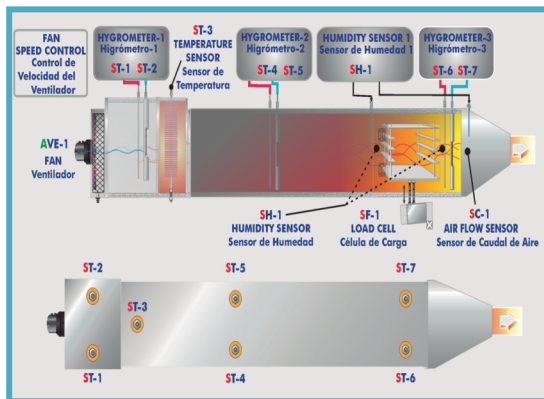
Dans cette partie de la recherche bibliographique, nous allons présenter quelques bancs didactiques développés par des fabricants spécialisés dans les équipements pédagogiques. L'objectif est de voir ce qui a été déjà réalisé dans les domaines traités dans notre projet et de s'inspirer des différents bancs présentés dans cette section pour la conception et la réalisation de notre banc.

Les différents versions des bancs didactiques que nous présentons ont été fabriqués par la société Gunt [1] et aremfil [3] et edibon [2]. Ils comprennent :

Un conduit d'air fabriqué à partir d'acier inoxydable. L'air est aspiré dans le conduit à travers une grille de protection et de débit par amortisseur.

Un ventilateur dont la vitesse peut être contrôlée pour produire une gamme de vitesses d'air dans le conduit. L'air passe sur un élément chauffé électriqulement, qui fournit des températures de l'air stable à la valeur sélectionnée par l'utilisateur.

Un support de plateau est situé dans la section centrale du conduit qui peut contenir jusqu'à trois plateaux de matériau à sécher.



Bancs didactiques des versions de sécheur à plateau

Un banc didactique qui constitue Un conduit d'air, Un ventilateur, Un support de plateau.à pour but pédagogique d'étudier :

- L'influence de la température de l'air et de l'humidité sur le séchage intensité.
- Traçage des courbes de séchage avec une constante externe conditions.
- Détermination de la vitesse de séchage avec de l'air différent des paramètres et des propriétés solides.
- L'évaluation des processus de séchage à l'aide de l'énergie et bilans de masse.

2-Conclusion :

On espère que la réalisation de ce projet se déroule dans des bonnes conditions et qu'il permettra de combler le manque de manipulations au niveau du laboratoire de thermodynamique et transfert thermique de notre département.

Nomenclature :

<i>a, b, c, d, e, n, k, k0, k1</i>	Coefficients des modèles cinétiques de séchage	(-)
<i>a1, a2, a3, a4</i>	Constantes	(-)
<i>ab</i>	coefficient d'absorption de la boue	(-)
<i>ac</i>	coefficient d'absorption de la couverture	(-)
<i>C</i>	Flux de convection	(w/m ²)
<i>Cp</i>	chaleur massique de l'air sec	(W.m-1. °C-1)
<i>COP</i>	le coefficient de performance de la pompe à chaleur.	(-)
<i>De</i>	la diffusivité de l'eau dans le produit à sécher	(m ² /s)
<i>h</i>	coefficient de convection	(W/m2/°C)
<i>hce</i>	coefficient de convection extérieur	(W/m2/°C)
<i>hci</i>	coefficient de convection intérieur	(W/m2/°C)
<i>I</i>	Flux de rayonnement infra rouge de grande longueur d'onde	(w/m ²)
<i>K</i>	Coefficient de courbe de séchage	(-)
<i>l</i>	largeur de la serre	(m)
<i>L</i>	longueur caractéristique	(m)
<i>Lv</i>	chaleur latente de vaporisation d'eau	(J/kg)
<i>mh</i>	Masse initiale du produit humide	(Kg)
<i>mb</i>	masse de la boue	(kg)
<i>ms</i>	Masse séché	(Kg)
<i>mi</i>	masse initiale	(kg)
<i>me</i>	masse d'eau	(kg)

<i>M</i>	Flux massique d'eau évaporée de la boue	(w/m ²)
<i>n</i>	nombre de constantes dans le modèle	(-)
<i>N</i>	nombre d'expérience	(-)
<i>N_u</i>	le nombre de Nusselt	(-)
<i>Pr</i>	Nombre de Prandtl	(-)
<i>R_g</i>	Rayonnement solaire global	(W.m ⁻²)
<i>Re</i>	Nombre de Reynolds	(-)
<i>R²</i>	le coefficient de corrélation	(-)
<i>R</i>	Le renouvellement d'air de la serre	(Volume serre/min)
<i>S_s</i>	surface de la serre	(m ²)
<i>S_b</i>	la surface de la boue	(m ²)
<i>S_c</i>	la surface de la couverture	(m ²)
<i>t</i>	Le temps	(minute, heure)
<i>T_v</i>	température de la voûte céleste	(K)
<i>T_{ae}</i>	température de l'air extérieur	(K)
<i>T_c</i>	la température de la couverture	(K)
<i>T_{ai}</i>	la température de l'air intérieur	(K)
<i>T_b</i>	la température de la boue	(K)
<i>T_s</i>	températures du solide	(k)
<i>T_f</i>	températures du fluide	(k)
<i>U_v</i>	vitesse du vent	(m/s)
<i>U</i>	vitesse moyenne de l'air	(m/s)
<i>V</i>	volume d'air intérieur de la serre	(m ³)
<i>X_{Rexp}</i>	La siccité expérimentale	(-)

X_f	La siccité finale	(kgH ₂ O/kgms)
X_i	La siccité initiale	(kgH ₂ O/kgms)
X_{Rpre}	La siccité prédite	(-)
X	la teneur en eau en base sèche de la boue	(-)
χ^2	Chi-deux	(-)
X_R	teneur en eau adimensionnelle	(-)
X_e	teneur en eau à l'équilibre	(Kg/Kg _{ms})
X_0	teneur en eau initiale	(Kg/Kg _{ms})
Φ_m	le flux de matière	(kg/m ² s)
$grad C$	le gradient de concentration volumique de l'eau C	(Kg eau/ m3),
ρ	massique volumique de l'air	(kg/m ³)
ρb	coefficient de réflexion de la couverture	(-)
ν	viscosité cinématique de l'air	(m2/s)
λ	conductivité thermique de l'air	(W/m-1.°C)
β	fraction Apport pompe à chaleur	(-)
τc	coefficient de transmission de la couverture	(kg/m ³)
σ	Constante de Stefan –Boltzmann	(W/m2/K4)
ε_c	émissivité de la couverture	(-)
ε_b	Emissivité de la boue	(-)
Q	débit volumique de l'air	(m ³ /s)
dT/dt	La variation entre la température et le temps de séchage	
ϕRc	flux net de rayonnement solaire reçu par la couverture.	(w/m ²)
ϕIcv	flux de rayonnement infra rouge émis vers la voûte céleste	(w/m ²)
ϕIcb	flux de rayonnement infra rouge émis vers la boue	(w/m ²)

ϕC_{cae}	flux convectif de la couverture vers l'air extérieur.	(w/m ²)
ϕC_{aie}	flux convectif de l'air intérieur vers la couverture.	(w/m ²)
ϕic	flux d'accumulation d'inertie thermique de la couverture (égale à 0 en régime permanent).	(w/m ²)
ϕC_{bai}	flux convectif de la boue vers l'air intérieur.	(w/m ²)
ϕC_{aiae}	flux convectif de l'air intérieur vers l'air extérieur.	(w/m ²)
ϕC_{aie}	flux convectif de l'air intérieur vers la couverture.	(w/m ²)
ϕiai	flux d'accumulation d'inertie thermique de l'air intérieur (égale à 0 en régime permanent).	(w/m ²)
ϕR_b	Flux net de rayonnement solaire reçu par la boue.	(w/m ²)
ϕI_{bc}	Flux de rayonnement infra rouge émis vers la couverture.	(w/m ²)
ϕC_{bai}	Flux convectif de la boue vers l'air intérieur.	(w/m ²)
ϕib	Flux d'accumulation d'inertie thermique de la boue (Égale à 0 en régime permanent).	(w/m ²)