



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
D'ANTANANARIVO

Département : Génie Mécanique et Productique
Génie Electrique

Filière : Génie Industriel



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur en génie Industriel

ETUDE ET CONCEPTION D'UN MINI SECHOIR ELECTRIQUE POUR LA
MODELISATION D'UN SECHOIR SOLAIRE INDIRECT POUR BREDE

Présenté par : Monsieur ANDRIAMAROMANANA Hasimanjaka Tsiferana

Directeur de mémoire : Monsieur RANARIJAONA Jean Désiré

Date de soutenance : 17 Décembre 2014

Promotion 2011-2012



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
D'ANTANANARIVO

Département : *Génie Mécanique et Productique*
Génie Electrique

Filière : Génie Industriel



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur en génie Industriel

ETUDE ET CONCEPTION D'UN MINI SECHOIR ELECTRIQUE POUR LA
MODELISATION D'UN SECHOIR SOLAIRE INDIRECT POUR BREDE

Présenté par : Monsieur ANDRIAMAROMANANA Hasimanjaka Tsiferana

Président du jury :

Monsieur RAKOTOMANANA Rodin

Directeur de mémoire :

Monsieur RANARIJAONA Jean Désiré

Membres du jury :

- *Monsieur ANDRIAMANOHSOA Hery Zo*
- *Monsieur RAKOTONINDRINA Tahiry Fanantenana*

Date de soutenance : 17 Décembre 2014

REMERCIEMENTS

Après des années d'étude à l'Ecole Supérieure polytechnique d'Antananarivo (ESPA) ; je voudrais tout d'abord rendre honneur à Dieu Tout Puissant qui m'a donné la santé, la force et le courage afin de réaliser le présent mémoire

J'adresse aussi mes remerciements à :

- Monsieur ANDRIANARY Philipe Antoine, Directeur de l'E.S.P.A qui m'a accueilli dans son établissement pour effectuer mes études.
- Monsieur RAKOTONIAINA SolofoHery (Chef de département Génie électrique) et Monsieur RAKOTOMANANA Rodin (Chef de département mécanique et productique) président de jury de ce mémoire, qui m'a autorisé à soutenir ce thème.
- Monsieur RANARIJAONA Jean Désiré qui m'a permis et aider sous sa direction, à réaliser ce mémoire ainsi que pour ses précieux conseils tout le long de la recherche
- Aux membres de Jury d'avoir bien voulu examiner ce travail :
 - *Monsieur ANDRIAMANOHSOA Hery Zo*
 - *Monsieur RAKOTONINDRINA Tahiry Fanantenana*

Je ne saurais oublier de remercier tous les enseignants de la filière Génie industriel pour leurs dévouements au fil de mes années d'études.

J'éprouve une éternelle reconnaissance à ma femme, qui a été toujours présente pour me soutenir moralement et financièrement en ayant toujours confiance en moi.

Enfin, je tenais à exprimer mes sentiments affectueux à toute ma famille, mes amis, mes collègues qui n'ont cessé de me prier pour moi et m'ont apporté leur collaboration et sympathie, trop nombreux pour vous nommer tous, vous vous reconnaitriez.

TABLE DES MATIERES

Table des matières

<i>REMERCIEMENTS</i>	i
TABLE DES MATIERES	ii
LISTE DES FIGURES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES ABREVIATIONS	vii
INTRODUCTION.....	1
<i>PARTIE I : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES</i>	1
Chapitre I: GENERALITES SUR LE SECHAGE	2
I Généralités	2
II Quelques terminologies ^[16]	2
1) Air humide.....	2
2) Solide humide.....	4
3) Activité de l'eau dans un produit	4
III Courbe de séchage	7
1) Période de séchage	7
2) Influence des paramètres de l'air sur la vitesse de séchage	10
Chapitre II: CLASSIFICATION DES DIFFERENTS MODES ET TYPES DE SECHOIRS	11
I Différents modes de séchages.....	11
1) Séchage directe ou séchage par convection	11
2) Séchage indirect ou séchage par conduction.....	11
3) Séchage par rayonnement.....	11
II Différents types de séchoirs.....	11
1) Caractéristique d'un séchoir	11
2) Différents types de séchoirs	12
3) Mode de transfert de chaleur et de masse au cours de séchage.....	16
<i>PARTIE II : ETUDE ET CONCEPTION D'UN MINI SECHOIR ELECTRIQUE POUR LA MODELISATION D'UN SECHOIR SOLAIRE INDIRECT</i>	18

Chapitre III: LE BREDE.....	19
I Le chou de chine.....	19
1) Définition et propriétés.....	19
2) Intérêt diététique.....	19
3) Mode de conservation	20
4) Utilisation	20
II Etapes du traitement du produit.....	20
1) Nettoyage	20
2) Triage	20
3) Parage	20
4) Coupage / tranchage	20
5) Blanchiment	21
6) Le prétraitement du chou de chine	21
Chapitre IV: CONCEPTION DU SECHOIR ELECTRIQUE.....	22
I Principe de fonctionnement	22
1) Schéma de principe	22
2) Processus expérimentale	22
II Eléments constitutifs du séchoir électrique	23
III Essai et résultat	24
➤ Courbe de séchage pour « le chou de chine »	25
Chapitre V: MODELISATION DU SECHOIR SOLAIRE INDIRECT.....	28
I Principe de fonctionnement	28
1) Description du séchoir solaire	28
2) Principe de fonctionnement.....	30
II Dimensionnement du séchoir solaire.....	31
1) Capteur solaire.....	31
2) Chambre de séchage.....	31
III Calcul de l'énergie à fournir pour un période de séchage.....	33
1) Echanges thermiques dans une tranche de séchoir.....	33
2) Analogique électrique	34
3) Mise en équation	35
4) Résolution du système.....	36
IV Simulation informatique	36

1) Organigramme de simulation du séchoir.....	36
2) Résultat de la simulation et discussion.....	38
<i>PARTIE III : EVALUATION ECONOMIQUE ET ETUDE D'IMPACTS</i>	
<i>ENVIRONNEMENTAUX</i>	46
Chapitre VI: EVALUATION ECONOMIQUE.....	47
I Introduction	47
II Coûts de l'investissement	47
1) Investissement unité (I)	47
2) Capital fixe (CF).....	48
3) Capital amortissable	48
4) Fond de roulement.....	48
III Chiffres d'affaires prévisionnels (CAP)	49
IV Charge liée à la production	49
V Bénéfices	50
VI Avantages de l'installation.....	51
Chapitre VII: REGARD SUR L'ENVIRONNEMENT	52
I Mise en contexte du projet.....	52
II Description du projet	53
III Impact négatif	53
IV Impact positif	53
V Mesures d'atténuations	53
CONCLUSION	55
BIBLIOGRAPHIES ET WEBOGRAPHIES	I
ANNEXE 1 : LISTING DE LA PROGRAMMATION	II
ANNEXE 2 : NOTION SUR L' AIR HUMIDE.....	IX
ANNEXE 3 : CARACTERISTIQUE GENERALE DU RAYONNEMENT SOLAIRE.....	XIII
ANNEXE 4 : METHODE ITERATIVE DE GAUSS SEIDEL.....	XVIII

LISTE DES FIGURES

figure 1: isotherme d'absorption et désorption	6
figure 2: forme générale de l'isotherme	7
figure 3: Période de séchage	8
figure 4: différents types de séchoirs	12
figure 5: Séchoir solaire direct	14
figure 6: Séchoir solaire indirect	15
figure 7: Séchoir solaire hybride (solaire-gaz)	16
figure 8: Mode de transfert lors de séchage	16
figure 9: fonctionnement du séchoir	22
figure 10: séchoir électrique	23
figure 11: chou de chine séché	23
figure 12: Variation de la masse en fonction du temps	25
figure 13: Isotherme de sorption du chou de chine obtenue après modélisation	26
figure 14: isotherme de sorption du chou de chine	27
figure 15: vue de face de la chambre de séchage	29
figure 16: vue de dessus du chambre de séchage	29
figure 17: Schéma de principe	30
figure 18: capteur solaire à simple vitrage	31
figure 19: chambre de séchage	32
figure 20: Visualisation de l'échange thermique au niveau du séchoir	33
figure 21: schéma électrique relative à une tranche du séchoir	34
figure 22: Organigramme de résolution	37
Figure 23: Variation des puissances solaire reçues sur une surface horizontale et variation de l'air à la sortie de l'insolateur par 2 vitesses d'air [10]	38
figure 24: Température de l'air à la sortie du capteur pour les surfaces de 10m ² , 15m ² et 20m ² (débit : 0.35Kg/s) [9]	40
figure 25: Puissances utile pour les surfaces de 10m ² , 15m ² et 20m ² (débit : 0.35Kg/s) [9] ...	41
figure 26: Energie d'appoint à l'entrée de la chambre de séchage pour les surfaces 10m ² , 15m ² et 20m ² (T consigne: 55°C)	42
figure 27: influence de la température sur le rendement	45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Masse du produit en fonction du temps	24
Tableau 2: dimensionnement chambre de séchage	33
Tableau 3: dimensionnement chariots et claies	33
Tableau 4: Résultat de la simulation informatique.....	44
Tableau 5: Propriété physique de l'air	45
Tableau 7: coût de l'installation du séchoir	47
Tableau 8: Chiffres d'affaires prévisionnelles	49
Tableau 9: Charge Variable.....	49
Tableau 10: Charge fixe	50
Tableau 11: Les mains d'œuvres	50

LISTE DES ABREVIATIONS

- A_w : activité de l'eau dans le produit [%]
- $C_{pa,p,d,brède}$: chaleur spécifique de l'air, de la paroi, de la dalle et du brède [J/K Kg]
- D_c : coefficient de vapeur d'eau dans l'air libre [m²/s]
- D_p : coefficient de diffusion de l'humidité dans le produit [Kg/m s Pa]
- D_x : largeur d'une tranche [m]
- $e_{p,d}$: épaisseur de la paroi, de la dalle [m]
- H : enthalpie []
- h_a : humidité absolue [%]
- HB : humidité du produit [%]
- $h_{cp,d}$: coefficient d'échange thermique par conduction de la paroi en brique et de la dalle [W/m K]
- h_m : coefficient de transfert de masse entre le produit et l'air [W/m K]
- h_r : humidité relative [%]
- $h_{vabrède}$: coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'air asséchant et le brède [W/m K]
- h_{vad} : coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'air asséchant et la dalle [W/m K]
- h_{vamb} : coefficient de transfert de chaleur par convection entre le milieu extérieure et la paroi externe [W/m K]
- h_{vap} : coefficient de transfert de chaleur par convection entre le milieu extérieure et la paroi interne [W/m K]
- $l_{brède}$: largeur d'une avivé [m]
- L_v : chaleur latente massique de vaporisation [J/Kg]
- m_{AS} : masse de l'air sec [Kg]
- m_e : débit d'eau évaporée [Kg/s]
- $M_{p,d,brède}$: masse de la paroi, de la dalle, du brède [Kg]
- m_{VE} : masse de la vapeur d'eau [Kg]
- Nu : nombre de NUSSELT
- Pr : nombre de PRANDLT
- P_u : énergie utile [kW]
- P_v : pression partielle de vapeur d'eau dans l'air [bar]
- P_{vs} : pression de vapeur d'eau saturante [bar]

q_{air} : énergie perdue par l'air [kW]

q_v : énergie fournie pour l'évaporation dans le produit [kW]

Re : nombre de REYNOLDS

Sc : nombre de SCHMIDT

$S_{p,d,brède}$: surface de la paroi, de la dalle, du brède [m²]

T_{air} : température de l'air [K]

T_{amb} : température de l'air ambiant [K]

$T_{pe,i}$: température de la paroi extérieure, intérieure [K]

t_s : temps de séchage [s]

V_{air} : vitesse de l'air [m/s]

X_{eq} : humidité relative d'équilibre [%]

λ : conductivité thermique [W/m K]

ψ : degré de saturation

Φ : flux de chaleur [W]

[*INTRODUCTION*]

INTRODUCTION

Jusqu' à nos jours, la production agricole à Madagascar rencontre un certain problème compte tenu des difficultés de conservation et de stockage des produits avant leur consommation ou leur exportation. Des techniques traditionnelles de séchage existaient déjà mais souvent lâchées par manque d'efficacité. Or sans recourir à des techniques coûteuses, on peut moderniser l'efficacité du séchage grâce à des séchoirs solaires spécifiquement conçus.

C'est pourquoi, notre étude dans ce mémoire porte sur « ETUDE ET CONCEPTION D'UN MINI SECHOIR ELECTRIQUE POUR LA MODELISATION D'UN SECHOIR SOLAIRE INDIRECT POUR BREDE».

Le but dans ce travail est de déterminer la courbe d'isotherme de sorption à partir des expériences par le séchoir électrique afin de modéliser une programmation informatique pour dimensionner un séchoir solaire indirect, nous avons choisi comme produit à sécher le brède (chou de chine).

Le plan de notre étude se divise en trois grandes parties :

Dans la première partie, nous faisons une étude bibliographique sur le phénomène de séchage en général;

Dans la deuxième partie, nous allons voir l'étude et conception d'un mini séchoir électrique pour la modélisation d'un séchoir solaire indirect pour le brède ;

Et enfin la troisième partie présente l'évaluation économique et l'étude d'impacts environnementaux de ce projet..

PARTIE I : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

Chapitre I: GENERALITES SUR LE SECHAGE

I Généralités

Par définition, le séchage est une opération qui permet d'enlever partiellement ou totalement l'eau d'un corps humide par évaporation de cette eau. L'opération de séchage doit être réalisée en optimisant la quantité de la chaleur nécessaire pour obtenir un produit de qualité avec la dépense globale d'énergie. Il se diffère par la source d'énergie utilisée (énergie fossile, électrique ou solaire) et par la manière dont s'effectue le transfert de chaleur au produit. Les raisons de séchage peuvent être regroupées comme suit :

- Faciliter la conservation des produits (en réduisant l'activité de l'eau) ;
- Diminuer la masse et le volume des produits pour réduire leur encombrement ;
- Donner une présentation, une structure au produit ;
- Modifier le produit dans sa forme, sa texture, sa qualité nutritionnelle et organoleptique.

II Quelques terminologies [16]

1) Air humide

Elle constitue un mélange de gaz parfait : air sec + vapeur d'eau. Les grandeurs caractérisant l'air humide sont définies comme suit :

a) Humidité absolue ou teneur en eau (X)

C'est la masse de vapeur d'eau associée à 1Kg d'air sec. Elle s'exprime en Kg de vapeur d'eau par Kg d'air sec.

$$X = m_{VE}/m_{AS}$$

$$X = 0,622P_v/(101325 - P_v)$$

- m_{VE} : masse de la vapeur d'eau
- m_{AS} : masse de l'air sec
- P_v : pression de vapeur d'eau

b) Humidité relative (h_r)

C'est le rapport de la pression de vapeur à la pression de vapeur saturante

$$hr = 100 * P_v / P_{vsat}$$

$$hr = 100 * 101325X / (0,622 + X)P_{vsat}$$

P_{vsat} : pression de vapeur saturante

En pratique, on utilise beaucoup plus d'humidité absolue que de pression de vapeur. Par conséquent, on donne le rapport entre l'humidité absolue de l'air pour une certaine température :

$$\Psi = \frac{X}{X_s}$$

Ψ : degré de saturation

X_s : humidité absolue correspond à l'état de saturation

c) Température sèche (T)

C'est la température de l'air humide, il s'agit de la température mesurée dans un courant d'air en assurant une protection contre tout rayonnement.

$$T = \frac{5204,9}{20,9 - \ln\left(\frac{P_{vsat}}{100}\right)} - 273,15$$

d) Température de rosée (T_H)

C'est la température à laquelle, au cours d'un refroidissement à la teneur en eau constante, la vapeur d'eau contenue dans l'air se condense.

$$T_H = \frac{5204,9}{20,9 - \ln\left(\frac{1013,25 X}{X + 0,622}\right)} - 273,15$$

La différence ($T - T_H$) représente l'humidité relative de l'air.

e) Enthalpie (H)

L'enthalpie caractérise la quantité de chaleur contenue dans 1 Kg de fluide. Elle représente la quantité de chaleur à fournir à ce mélange sous une pression constante pour amener de la température de référence 0°C. Elle ne dépend que de la température soit :

$$H = C_{pas}T + X(L_v + C_{pv}T) \text{ Par Kg d'air sec}$$

$$H = [C_{pas}T + X(L_v + C_{pv}T)] / (1 + X) \text{ Par Kg d'air humide}$$

- C_{pas} : chaleur massique de l'air

- C_{pv} : chaleur massique de l'eau
- L_v : la chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0°C.

2) Solide humide

a) Humidité absolue (ha)

Elle est définie par la masse quantité d'eau contenue dans un produit, exprimé en pourcentage de la masse sèche de ce produit.

$$ha = \frac{m_{VE} - m_{AS}}{m_{AS}}$$

b) Humidité relative (hr)

Elle s'exprime par la masse du liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse humide.

$$hr = \frac{m_{VE} - m_{AS}}{m_{VE}}$$

3) Activité de l'eau dans un produit

a) Répartition de l'eau dans le produit

L'eau présente dans un produit sous diverses formes est généralement classée en :

- **Eau libre** : remplissant la majeure partie des vides de la structure, retenue sous forme d'un film adhérent à la surface externe du solide ou dans les espaces interstitiels et les pores par des forces de capillarité liée à la tension superficielle du liquide
- **Eau liée** : absorbé sur les parois des structures grâce aux propriétés hydrophiles de leurs constituants. Elle est aussi liée à la taille des pores ; soit d'une façon plus intime par des forces de cohésion plus importants avec la matrice solide et les autres molécules d'eau.
- **Vapeur d'eau** : mélangée à l'air sec, occupe les espaces libérés par l'eau libre, l'eau liée et la matrice solide.

b) Activité de l'eau dans le produit

L'activité de l'eau dans le produit (A_w) est une grandeur liée à l'humidité du produit, utilisée pour évaluer la capacité avec laquelle un produit dans une atmosphère donnée se dégrade d'un point de vue biologique. On définit l'activité de l'eau dans le produit par le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit P_{VP} à la pression de vapeur de l'air saturé P_{VS} .

Elle est la mesure du degré de liberté de l'eau retenue dans diverses façons dans un produit hygroscopique, et détermine directement les propriétés physiques, mécaniques, chimiques et microbiologiques d'un matériau hygroscopique.

$$A_w = \frac{P_{VP}}{P_{VS}}$$

Ces deux pressions sont dépendantes de la température. Elles justifient aussi que l'humidité relative h_r d'une atmosphère est donnée par l'expression :

$$h_r (\%) = \frac{P_{VP}}{P_{VS}} * 100$$

L'activité de l'eau dans le produit est donc directement liée à l'humidité relative d'équilibre au-dessus d'un produit par la relation :

$$A_w = \frac{P_{VP}}{P_{VS}} = h_r (\%) / 100$$

Cette activité représente aussi l'humidité relative d'un air en équilibre avec le produit (lorsqu'il n'y a plus d'échange d'eau entre eux). Sa valeur varie entre 0 (produit sec au point que toute l'eau est liée à l'aliment, et donc sans qualité réactive) et 1 (eau pure et sans soluté, difficile à atteindre et surtout à maintenir). La valeur optimale pour la conservation des produits biologiques, sans additif ni réfrigération, correspond à une activité de l'eau située entre 0.25 et 0.35; la croissance des bactéries est généralement limitée lorsque l'activité de l'eau descend en dessous de 0.90 de même les moisissures et les levures sont inhibées respectivement vers une activité de 0.70 et 0.80.

c) Isotherme d'adsorption et de désorption [12]

➤ Relation entre la teneur en eau et l'activité de l'eau

La courbe, donnant la teneur en eau (X en kg d'eau par kg de matière sèche) en fonction de l'activité de l'eau dans un produit pour une température donnée, est appelée

isothermes de désorption (cas du séchage) ou d'adsorption (cas de la réhumidification). Pour chaque valeur de l'activité (A_w) d'un produit, l'isotherme donne la teneur en eau d'équilibre (X_{eq}) du produit à une température donnée. Ces deux courbes d'isothermes (Fig. ci-dessous) ont généralement des allures différentes (effet hystérésis) car le séchage d'un produit entraîne des modifications de structure et de porosité irréversibles.

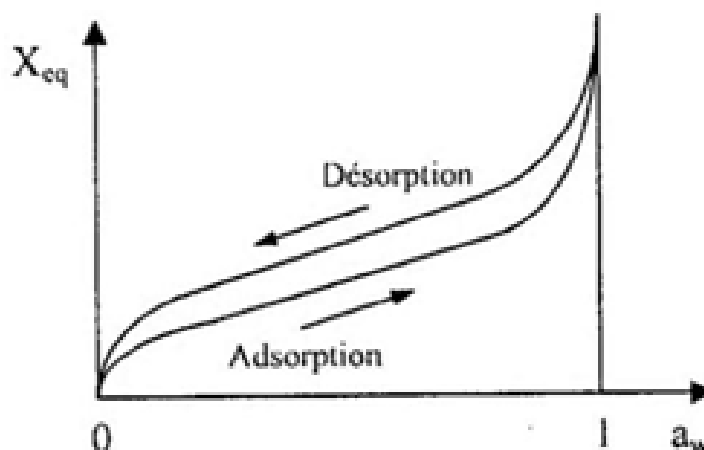


figure 1: isotherme d'absorption et désorption

Les isothermes d'adsorptions/ désorption se composent en trois zones, chaque zone correspond à un mode de fixation particulier de l'eau sur le produit :

- ❖ Zone1 ($A_w < 0.3$) : correspond à l'eau "fortement liée" dite aussi eau de constitution. L'eau est intimement liée aux composantes biochimiques par des liaisons covalentes; cette eau n'est pratiquement pas disponible comme solvant ou réactif et correspond à la première couche (monocouche) qui entoure la matière sèche d'aliment.
- ❖ Zone2 ($0.3 < A_w < 0.7$): correspond à l'eau "faiblement liée", sous forme de couche poly moléculaire (multicouche) recouvrant partiellement la surface du substrat sec.
- ❖ Zone3 ($A_w > 0.7$): correspond à l'eau "libre" ou eau "liquide" qui n'est retenue à la surface du substrat sec que par des liaisons hydrogènes. Cette eau est disponible tant comme solvant que réactif. C'est uniquement sous cette forme que l'eau est utilisée par les micro-organismes et peut permettre les réactions enzymatiques.

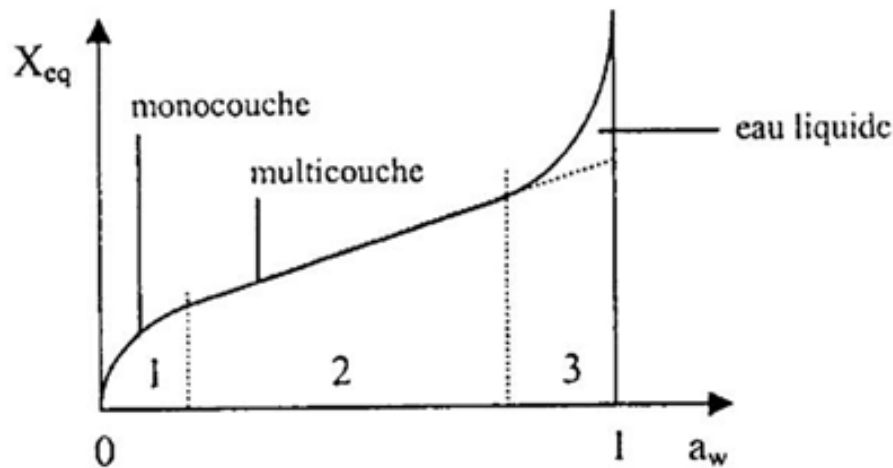


figure 2:forme générale de l'isotherme

➤ **Modèles de représentation des courbes de sorption et désorption:**

De nombreux modèles empiriques, semi-empiriques ou théoriques ont été proposés pour décrire le comportement des courbes de sorption/désorption déterminées expérimentalement. Dans notre cas, on prend le modèle d'HENDERSON pour déterminer l'isotherme de sorption :

$$1 - hr = \exp(-K T h a^n)$$

$$T = 1.8 [T (^{\circ}\text{K}) - 273] + 492$$

K et n sont des constantes dépendant du produit. Dans notre cas ici,

On prend $K = 11,207 \cdot 10^{-4}$ et $n = 0.7$. (par étalonnage)

III Courbe de séchage

La courbe de séchage est représentée soit par la variation de l'humidité absolue (X) du produit en fonction du temps t, soit par la variation de la vitesse de séchage ($-dX/dt$) en fonction du temps t.

1) Période de séchage

Dans la courbe ci-dessous est schématisée la variation de la vitesse de séchage en fonction du temps. Souvent on construit aussi la courbe de la vitesse de séchage en fonction de l'humidité restant dans la matière au cours du séchage.

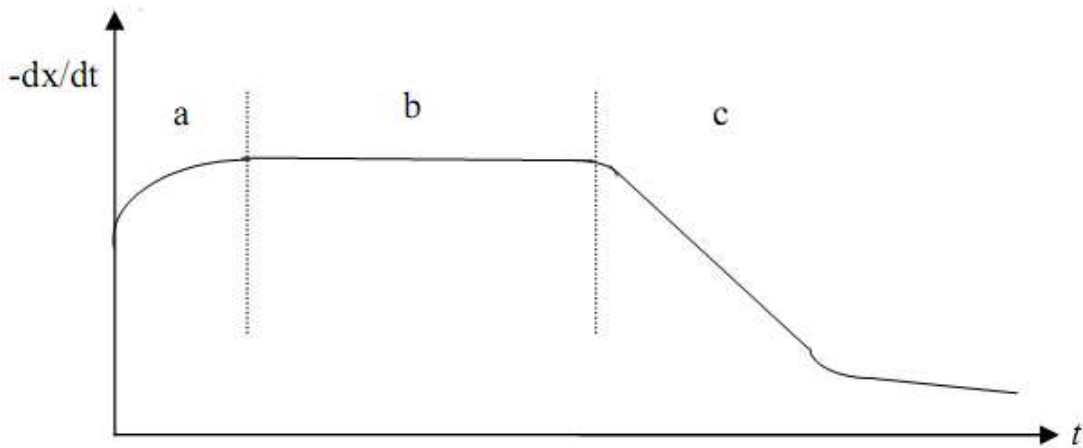


figure 3: Période de séchage [15]

On distingue trois périodes :

a) Période de mise en température (région a)

Cette période est généralement très courte au regard du temps de séchage global. Quand un produit d'une température de surface T_s et d'une pression partielle de vapeur d'eau P_s est brassé par un courant d'air chaud, des échanges 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 fourni par l'air amène le produit à s'échauffer davantage jusqu'à atteindre la température du bulbe humide caractéristique de l'environnement séchant.

b) Période à allure constante (région b)

Cette période de séchage à vitesse constante correspond à l'évaporation du liquide superficielle.

Elle n'existe si une pellicule d'eau libre existe en surface du produit. L'activité de l'eau à la surface du produit (A_{ws}) est alors égale à 1 et le séchage consiste en une évaporation isenthalpique de l'eau. La température de surface du produit correspond à la température humide de l'air asséchant. C'est la température à laquelle le flux de chaleur amené par l'air est égal au flux thermique nécessaire à l'évaporation de l'eau. La vitesse de séchage dépend uniquement des conditions externes telles que l'humidité de l'air, sa température sèche et sa vitesse de circulation. La vitesse d'évaporation peut également s'exprimer par :

$$m_e = K_m (P_{sat} T_{pr} - P_v T_{fs})$$

- m_e : débit d'eau évaporée

- P_{sat} : la pression de vapeur d'eau saturante
- T_{pr} : température à la surface du produit ou pression saturante à la température humide de l'air
- P_v : pression partielle de vapeur d'eau dans l'air
- T_{fs} : température locale
- K_m : coefficient global externe de transfert de matière exprime en s/m.

c) Période de ralentissement (région c)

Cette période est caractérisée par une diminution de la vitesse de séchage. Le ralentissement de la vitesse de séchage est du aux contraintes de la migration de l'eau de l'intérieur du produit vers sa surface. Il est expliqué par les phénomènes suivants :

- **Disparition de l'eau libre en surface de produit** : La zone d'évaporation "front de séchage" qui se trouvait en surface se déplace vers l'intérieur du produit. En amont de cette zone, il y a migration de l'eau libre, tandis qu'en aval c'est l'eau liée et la vapeur d'eau qui sont évacués. La brusque réduction de la surface effective de transfert due à une alimentation insuffisante en eau libre est la cause de ce ralentissement.

- **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 ce ralentissement de l'allure de séchage.

- **La diffusivité de l'eau dans le produit** : elle varie avec la teneur du produit en eau, plus ce dernier est sec, moins il devient perméable à l'eau.

- **La résistance mécanique des parois cellulaires intactes** : Les parois cellulaires intactes empêchent la vapeur d'eau de passer en grande quantité à l'extérieur du produit.

- **Le croutage** : Certains composés solubles notamment les sucres et les sels accompagnent l'eau évaporée pendant la période à allure constante (région b) et sont disposés à la surface. Ce phénomène appelé croutage est à l'origine de fortes concentrations en surface de ces composés solubles qui bouchent les pores du produit. L'accumulation et l'assèchement de ces solutés imperméabilisent la surface du produit.

2) Influence des paramètres de l'air sur la vitesse 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 qui 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.

b) Influence de la vitesse de l'air

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

c) Influence de l'humidité de l'air

La teneur en eau de l'air, joue un rôle important sur le comportement de la vitesse 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.

Chapitre II: CLASSIFICATION DES DIFFERENTS MODES ET TYPES DE SECHOIRS

I Différents modes de séchages

1) *Séchage directe ou séchage par convection*

Le caractère spécifique de ce mode de séchage réside dans le fait que l'air de séchage remplit deux fonctions simultanées, l'apport de chaleur vers la surface du produit, et récupération de la vapeur d'eau dégagée du produit. Il est à noter que la circulation du fluide caloporteur peut être une convection naturelle ou forcée.

2) *Séchage indirect ou séchage par conduction*

Le produit se trouve en contact avec une paroi conductrice de chaleur qui est chauffé par un fluide caloporteur (air, eau, gaz, vapeur d'eau). Sous l'action de la chaleur ainsi transmise par conduction, le liquide s'évapore. La vapeur formée étant entraînée par action d'un léger courant de gaz auxiliaire ou par dépression. Le transfert de chaleur par conduction assure le passage de l'énergie vers les couches internes du produit selon la loi de Fourier

3) *Séchage par rayonnement*

On sait que toute surface dont la température est supérieure au zéro absolu émet un rayonnement capable de se transformer en chaleur, et que l'admittance énergétique totale d'une surface ou flux de chaleur émis par l'unité d'aire de cette surface, est proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue de la surface. Il en résulte que dans de nombreux séchoirs, une fraction plus ou moins grande du flux de chaleur reçu par la matière est transmise par rayonnement et il convient, surtout si la température de la paroi est élevée, d'en tenir compte dans le calcul du flux, pour éviter un échauffement excessif de la matière.

II Différents types de séchoirs

1) *Caractéristique d'un séchoir*

a) *Caractéristiques physiques du séchoir*

- Type, forme et dimension du séchoir
- Capacité du séchage/ densité de charge
- Surface de la claie et nombre de claie (applicable)
- Convenance de la charge et décharge des produits

b) Performances thermiques

- Temps de séchage et vitesse de séchage
- Température et humidité de l'air asséchant
- Flux de l'air asséchant
- Efficacité du séchoir

c) Qualité du produit séché

- Qualité organoleptique (couleur, saveur, goût, arôme, texture)
- Eléments nutritifs
- Capacité de réhydratation

2) Différents types de séchoirs

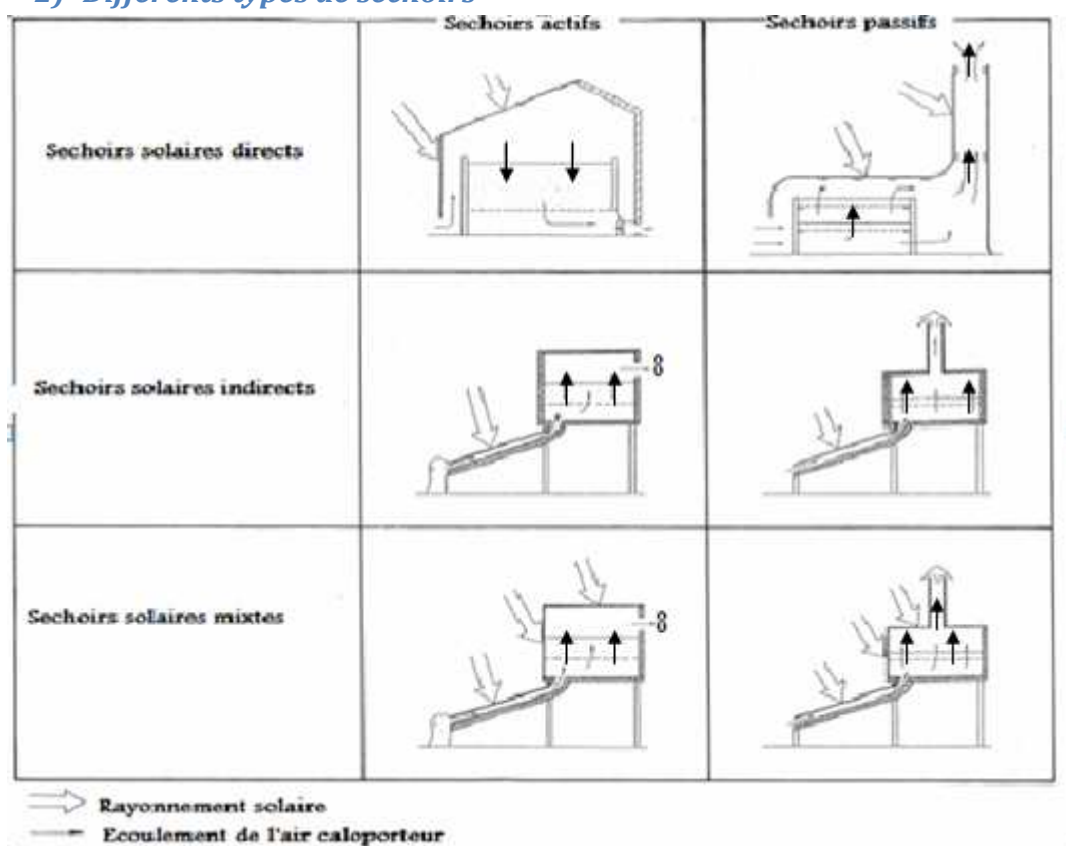


figure 4:différents types de séchoirs [8]

On distingue deux grandes classes de séchoir solaire pour les produits agricoles:

a) Séchoir solaire passif ou à convection naturelle

Le séchage par convection naturelle utilise l'énergie solaire, qui chauffe l'air caloporteur, et lui donne une capacité supplémentaire d'accueil de vapeur d'eau. Cet air chauffé a tendance de monter vers le haut et sort par une cheminée en emportant avec lui l'humidité extraite des produits à sécher. L'écoulement de l'air asséchant ici se fait par effet

de cheminée. L'énergie solaire seule en assure le fonctionnement, ces séchoirs sont particulièrement adaptés aux régions éloignées de toute sorte de distribution d'énergie. L'un des inconvénients de ce type de séchoir c'est le risque de dépassement de la température maximale admise par le produit, souvent due à la mauvaise circulation de l'air, fréquente dans ces systèmes.

b) Séchoir solaire actif ou à convection forcée

Le fluide asséchant est forcé par un ventilateur, ce qui permet une augmentation du pouvoir évaporateur du séchoir. Généralement la convection forcée l'emporte largement sur la convection naturelle qui ne permet pas encore, étant donné l'état des recherches en cette matière, de contrôler le déroulement du séchage.

Cette classe de séchoir solaire permet un meilleur contrôle de l'opération de séchage et une bonne amélioration du temps de séchage par rapport au séchoir passif, car l'air asséchant est évacué en vitesse et d'une façon continue. Néanmoins ce type de séchoir a pour inconvénient: un coût de production et d'investissement relativement élevé par rapport au séchoir passif, nécessité d'approvisionnement local en électricité conventionnelle ou photovoltaïque pour faire fonctionner le ventilateur.

Ces 2 types de séchoir peuvent diviser en 4 :

c) Séchoir solaire direct

Les rayons solaires frappent directement les produits. Le séchoir solaire direct se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de la chambre de séchage et de collecteur solaire. Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de chaleur, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent sert généralement de toit mais on peut également utiliser d'autres matériaux comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles).

Il combine 2 effets :

- La température qui augmente sous l'effet de serre
- La circulation naturelle de l'air dans le séchoir

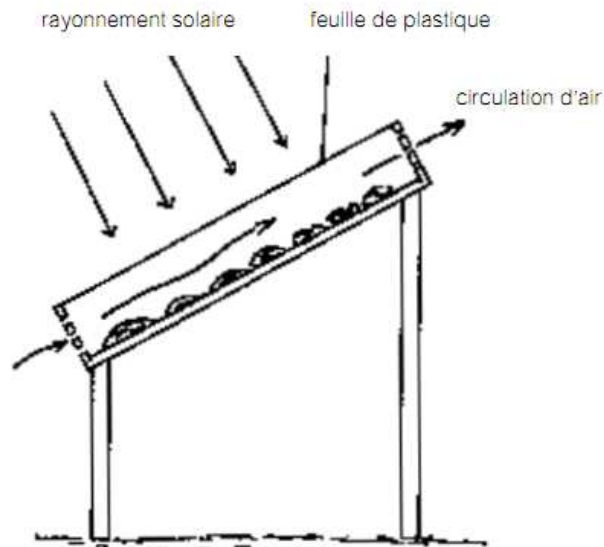


figure 5: Séchoir solaire direct

d) Séchoir solaire indirect

Le séchoir solaire indirect se compose essentiellement de deux parties: en amont un isolateur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur où l'air asséchant est chauffé et monte par convection naturelle ou forcée jusqu'à la chambre de dessiccation contenant les produits à sécher où un transfert de chaleur de l'air vers le produit et un transfert de masse du produit vers l'air se produisent au cours du parcours du fluide caloporteur. Ce dernier sort vers l'extérieur de la chambre de dessiccation par le biais d'une cheminée en emportant avec lui l'humidité extraite du produit. Ce système possède des isolateurs plans en amont qui sont plus performants et plus répandus que les séchoirs directs, ils présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : (couleur, propriétés organoleptiques, valeur nutritive.....etc.). Ils sont donc particulièrement adaptés au séchage des produits agroalimentaires.

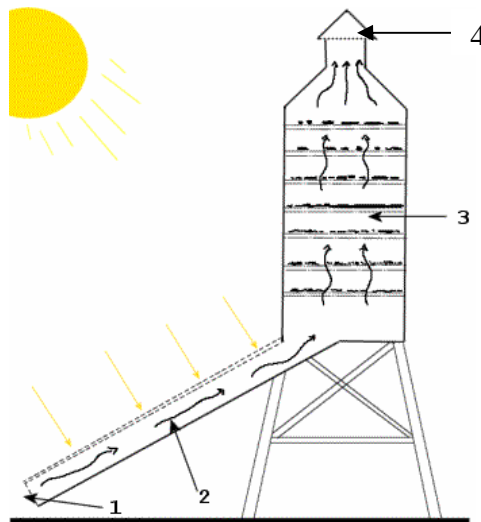


figure 6: Séchoir solaire indirect

- 1 : Entrée d'air
- 2. isolateur plan
- 3. claies
- 4. cheminée

e) Séchoir solaire mixte

Ce séchoir est la combinaison des dispositifs de séchoirs directs et indirects.

f) Séchoir solaire hybride

Dans ce type de séchoir hybride, on utilise une des sources d'énergies auxiliaires (électrique, gaz, fuel, bois, biomasse.....) pour parer aux aléas climatiques et ajuster la température de l'air asséchant à la température fixe de consigne moyennant des thermorégulateurs. Les séchoirs solaires hybrides sont plus performants que les séchoirs solaires passifs, car ils peuvent fonctionner à temps couvert ou pendant la nuit.

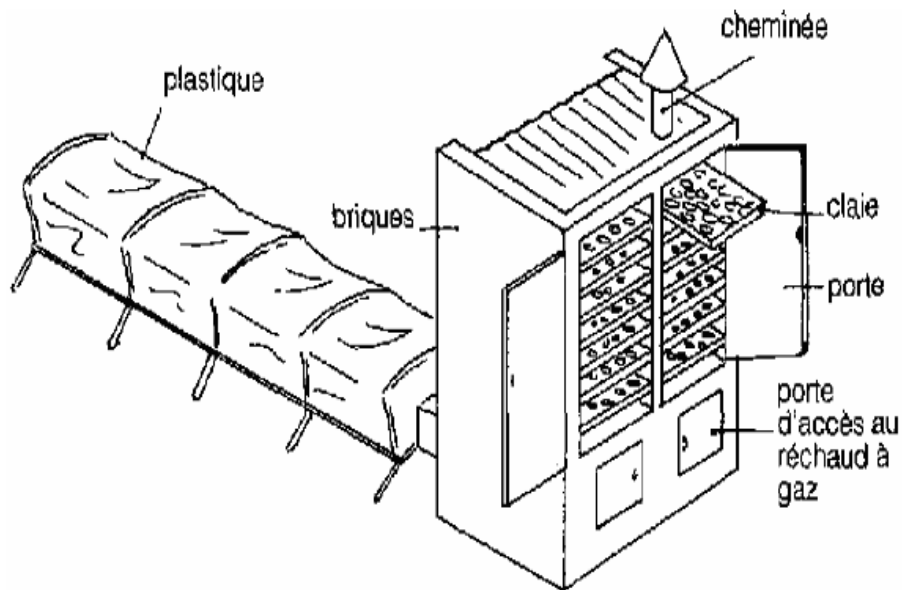


figure 7: Séchoir solaire hybride (solaire-gaz)

3) Mode de transfert de chaleur et de masse au cours de séchage

Le séchage (Fig. ci-dessous) est caractérisé par un transfert de chaleur et de masse (l'eau sous forme de vapeur). L'eau est transférée de l'intérieur du produit vers l'interface produit-air par le phénomène de diffusion et de l'interface vers l'air asséchant par le phénomène de convection.

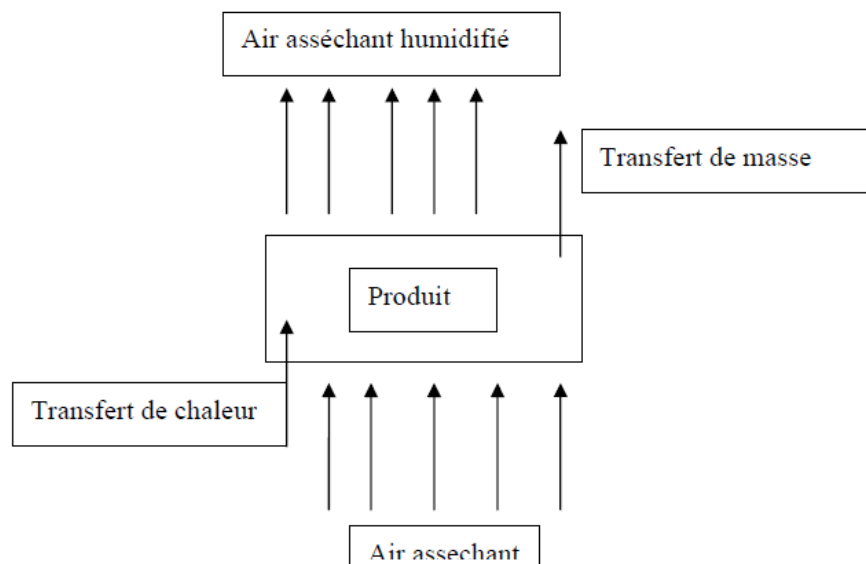


figure 8: Mode de transfert lors de séchage

Apportant l'énergie nécessaire à l'activation et la libération des molécules d'eau, ce transfert de chaleur se fait en deux étapes différentes:

a) Transfert par convection

L'air asséchant alimente la surface du produit en chaleur. Le flux de chaleur transmis est donné par la loi de Newton :

$$\phi = h * S * \Delta T$$

- h : coefficient de transfert de chaleur par convection
- S : Aire de la section de passage de chaleur
- $\Delta T = T_f - T_p$
- T_f : température du fluide
- T_p : température de la surface solide

b) Transfert par conduction

La surface du produit est chauffée par l'air asséchant, cette chaleur est transmise vers les couches internes du produit par conduction. Le flux de chaleur repose sur la loi de Fourier :

$$\phi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}$$

λ : Conductivité thermique de la paroi

$\frac{\partial T}{\partial x}$: Gradient de température au rapport de la variation de la température à la distance parcourue par le flux.

***PARTIE II : ETUDE ET CONCEPTION D'UN MINI
SECHOIR ELECTRIQUE POUR LA MODELISATION D'UN
SECHOIR SOLAIRE INDIRECT***

Chapitre III: LE BREDE

Le brède désigne un ensemble très divers de feuilles comestibles de nombreuses plantes et qui sont cuisinées avant d'être consommées. Ce terme est employé dans les Mascareignes depuis le XVII^e siècle. Le mot brède est un emprunt au portugais, dans lequel bredo désigne la plante *Amaranthus blitum* (syn.: *Amaranthus lividus*) - une plante toujours appréciée en tant que brèdes dans les Mascareignes. Pour sa part, le mot portugais bredo descend du mot latin blitum, qui lui-même vient du grec bliton. Le mot latin blitum est aussi la source du mot blette français. Ce mot, qui de nos jours est devenu un synonyme du mot bette (nom de la plante *Beta vulgaris*), désignait à l'origine la plante *Amaranthus blitum* lui aussi.

Il existe plusieurs variétés de brède comme le brède morelle, le brède mafane, le brède cresson le chou chinois. Mais dans notre cas ici, on va étudier le brède chou chinois (chou de chine).

I Le chou de chine

1) Définition et propriétés

Le chou de chine est une plante à feuille comestible, originaire de l'Asie, nom scientifique : *Brassica rapa*. Il fait partie des crucifères, une famille botanique qui contribuerait à nous protéger des cancers, particulièrement ceux du poumon et de l'appareil digestif. Il contient du calcium bio disponible, c'est-à-dire que l'organisme peut bien l'absorber et l'utiliser. Le chou de chine contient une multitude de vitamines et de minéraux ainsi que des composés actifs dont les propriétés sur la santé sont bien démontrées.

2) Intérêt diététique

Il est riche en protéine, sans matières grasses, faible teneur en graisses saturées, riche en fibre, très pauvre en sel, riche en vitamine C et riche en vitamine B9.

Pour 100g de chou de chine, on obtient :

- Valeur énergétique : 15.74 Cal
- Eau : 94.9g
- Protéines : 1.07g
- Glucides : 1.24g
- Fibres alimentaires : 1.9g
- Calcium : 40 mg

- Vitamine C : 26 mg
- Vitamine B9 : 0.066 mg
- Acides gras saturés : 0.04g
- Cholestérol : 0mg

3) Mode de conservation

On peut le conserver dans le réfrigérateur pendant 2 semaines avant le consommer ou il est préférable de le consommer dans les 4 à 5 jours suivant après récoltes

4) Utilisation

Il possède une très légère saveur piquante qui rehausse les plats de légumes, et il épouse parfaitement toutes les saveurs orientales.

On peut le farcir ou braiser, il est aussi excellent dans un bouillon de viande ; Il peut être consommé sauté, à l'étuvée ou en soupe. Il peut faire aussi partie de farces, et être consommé froid comme une salade.

II Etapes du traitement du produit

Avant le séchage, le produit doit être préparé pour améliorer le séchage et la qualité du produit fini :

1) Nettoyage

Il permet d'éliminer les impuretés : boue, débris végétaux, insectes, caillou...

2) Triage

Il consiste à éliminer les produits abimés. Cette phase est particulièrement importante car elle permet :

- Un séchage uniforme
- Un meilleur contrôle des traitements ultérieurs : blanchiment, soufrage...
- Une bonne valorisation du produit

3) Parage

Il consiste à éliminer les parties abimées, insuffisamment mûres, les tiges, les fibres, les racines

4) Coupage / tranchage

Il consiste à découper le produit pour donner forme et pour faciliter l'emplacement sur la claie.

5) Blanchiment

On trempe dans l'eau bouillante le produit pendant quelque temps pour faciliter le séchage et pour garder la couleur et sa qualité. Cette phase n'est pas obligatoire pour tous les produits.

6) Le prétraitement du chou de chine

Avant de sécher le chou de chine, il faut nettoyer, trier, tranche, et blanchir pour que le séchage du produit soit uniforme et de bonne qualité.

Chapitre IV: CONCEPTION DU SECHOIR ELECTRIQUE

I Principe de fonctionnement

1) Schéma de principe

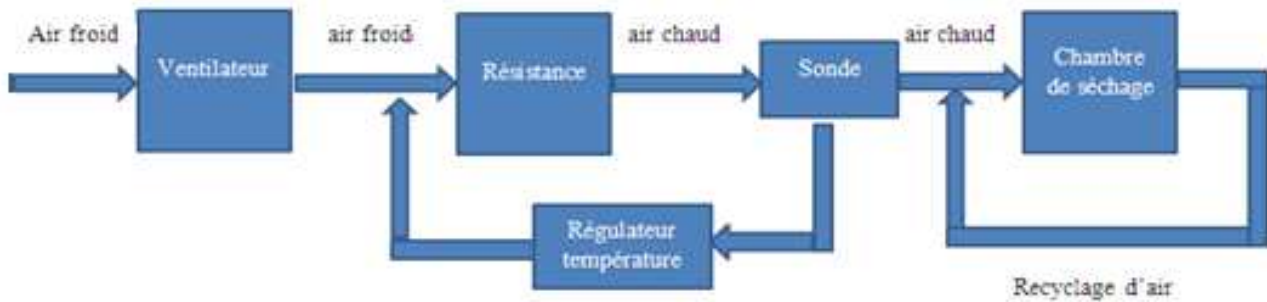


figure 9: fonctionnement du séchoir

Le ventilateur aspire l'air extérieur pour l'envoyer directement sur la résistance qui chauffe l'air, ainsi échauffé, il est envoyé dans la chambre de séchage pour sécher le produit. A la sortie de l'enceinte de séchage, l'air asséchant est soit évacué vers l'extérieur, soit recyclé à travers le conduit de recyclage d'air.

2) Processus expérimentale

On fixe à 100g la masse du produit à sécher sur la claie. On règle la température de séchage à 55°C à l'aide d'un régulateur de température. On fixe le débit d'air à 1,2m/s à l'aide du ventilateur et on pèse le produit de la claie toutes les heures jusqu'à l'atteinte de la teneur en eau souhaitée. On met un relai de type NO et une sonde à l'entrée du chambre de séchage pour que la température à l'intérieur du chambre de séchage reste constante et uniforme. Ce relai coupe le fonctionnement de la résistance si la température dans la chambre de séchage atteint 55°C et se remet automatiquement en marche si cette température descend de 50°C.

II Eléments constitutifs du séchoir électrique

- Un ventilateur 12V, 0.5 mA tournant en amont et donne une vitesse de 1.5 m/s au maximum.
- La résistance : c'est une résistance de puissance maximale de 950Watts, double fonctions
- Le séchoir : c'est un boîtier en tôle galvanisée d'épaisseur 5/10ème de dimensions 150 * 400 * 150 mm
- Le régulateur de température : type AKO
- La sonde : type NTC
- le relai : type NO

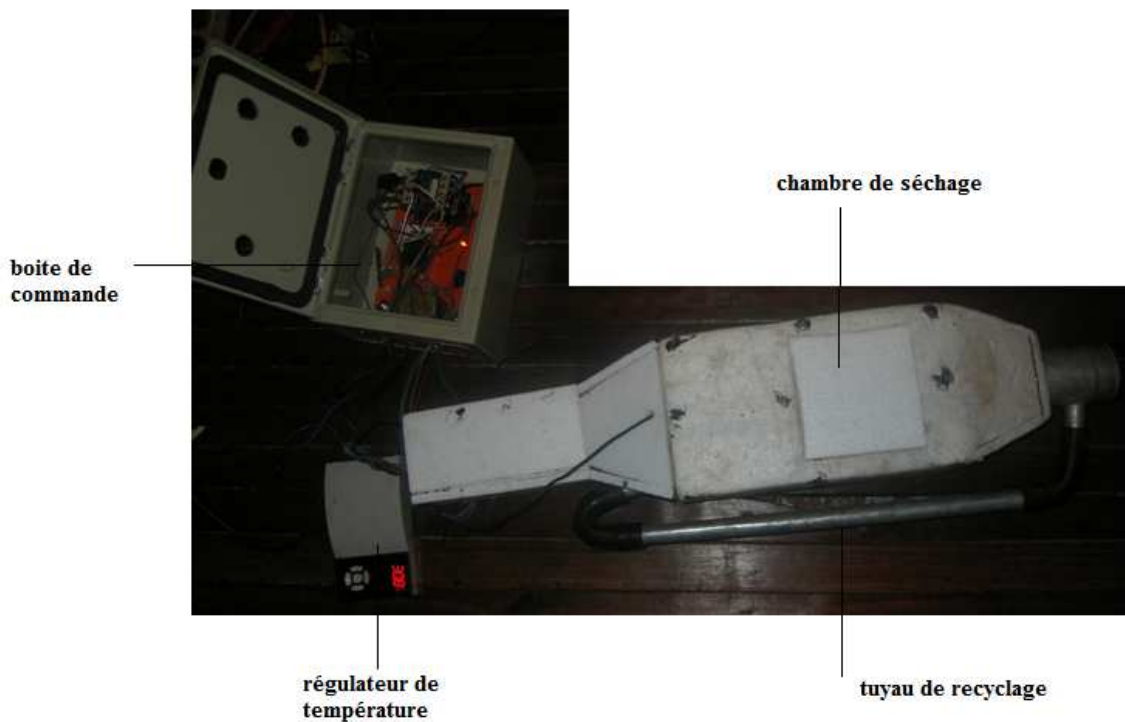


figure 10: séchoir électrique



figure 11: chou de chine séché

III Essai et résultat

$V_{\text{air}} = 1,2 \text{ m/s}$ $T^{\circ}_{\text{ambiante}} = 25,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $T^{\circ}_{\text{séchage}} = 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Masse du produit humide : 100 [g]

Temps (heure)	T° min (°C)	T° max (°C)	Masse séché (gramme)				
			hr : 70%	hr : 60%	hr : 50%	hr : 40%	hr : 30%
0	50	60	100	100	100	100	100
1	48,9	59,8	90	90	90	90	90
2	48,9	59,8	82	82	80	78	76
3	49	60,4	78	74	72	68	66
4	49	60,4	72	68	66	62	60
5	48,9	60,4	66	62	58	56	54
6	48,9	60,4	60	56	54	50	46
7	48,9	60,3	56	52	48	44	40
8	48,9	60,3	52	48	42	38	34
9	48,9	60	48	44	36	32	30
10	48,9	60	44	40	32	28	26
11	48,7	60	40	36	28	24	22
12	48,7	60,6	36	32	24	20	18
13	48,7	60,6	32	28	22	16	14
14	48,7	60,4	28	24	18	14	12
15	49	60,4	24	20	16	12	10
16	49	60,2	20	18	14	10	10
17	49	60,2	18	14	10	10	10
18	49	60,4	16	12	10	10	10
19	49,2	60,4	14	10	10	10	10
20	49,2	60,4	12	10	10	10	10
21	48,8	60	10	10	10	10	10
22	48,8	60	10	10	10	10	10

Masse du produit sec: 10 [g]

Tableau 1: Masse du produit en fonction du temps

➤ **Courbe de séchage pour « le chou de chine »**

La courbe de séchage représente la variation de la teneur en eau en fonction du temps. Pour l'obtenir, on fait plusieurs tests (on varie l'humidité relative dans la chambre de séchage) et on a suivi l'évolution de masse humide du produit au cours de séchage en pesant le produit toutes les heures jusqu'à atteindre la teneur en eau finale souhaitée.

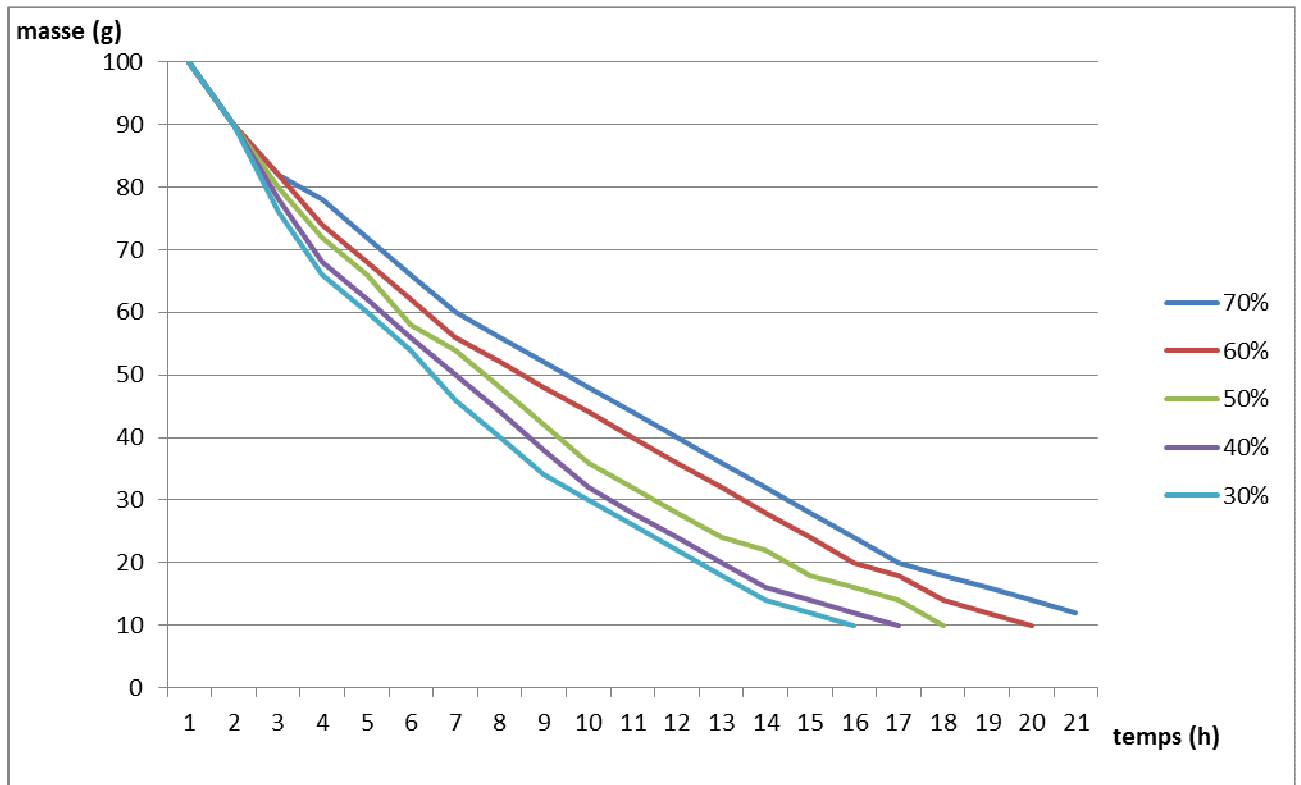


figure 12: Variation de la masse en fonction du temps

La courbe ci-dessous montre l'isotherme de chou de chine obtenue après la modélisation d' HENDERSON et l'expérience qu'on a fait par le séchoir électrique:

$$1 - hr = \exp(-K T h \alpha^n)$$

$$T = 1.8 [T (^{\circ}\text{K}) - 273] + 492$$

Dans notre cas ici, on prend $K = 11,207 \cdot 10^{-4}$ et $n = 0.7$ et $T = 328$ [K].

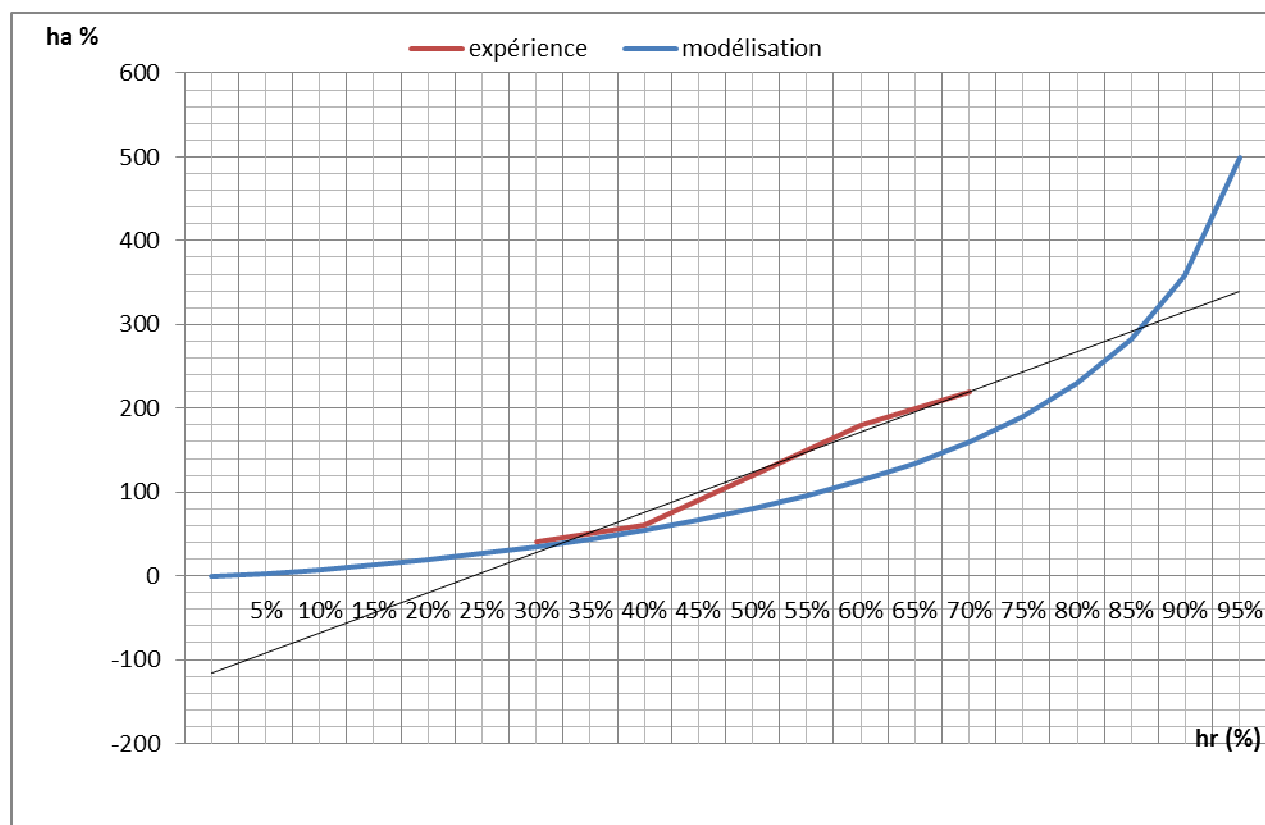


figure 13: Isotherme de sorption du chou de chine obtenue après modélisation

Ce qui suit représente les courbes des isothermes obtenus pour quelques valeurs de températures

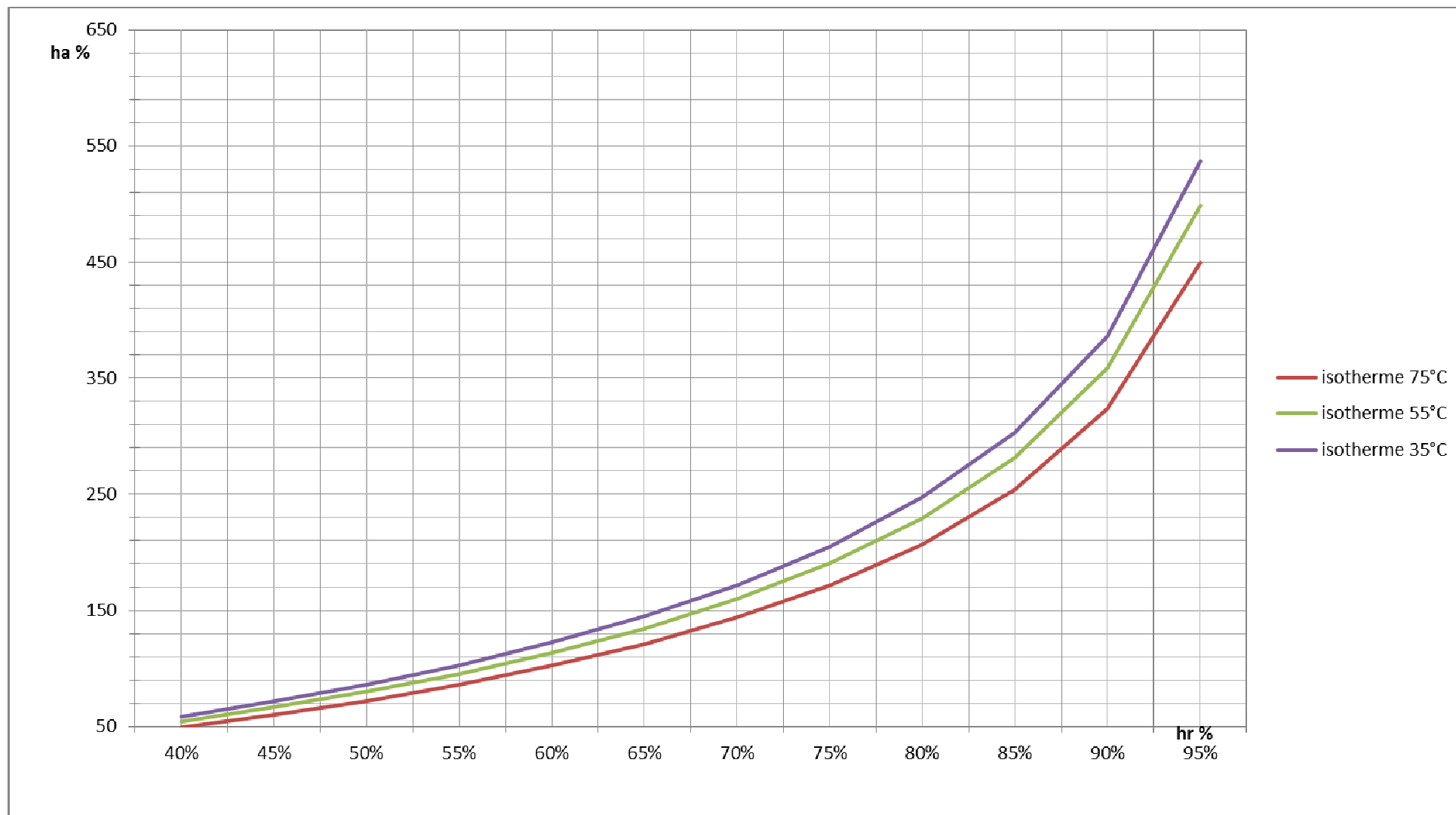


figure 14: isotherme de sorption du chou de chine

Chapitre V: MODELISATION DU SECHOIR SOLAIRE INDIRECT

I Principe de fonctionnement

1) Description du séchoir solaire

Il n'existe pas de mécanisme universel dans le choix technologique d'un séchoir solaire. Des diverses études de cas et présentations ont été faites, et il en ressort qu'il est difficile d'avoir des éléments indiscutables de validation et de comparaison entre les différents modèles de séchoirs, soit l'outil de séchage est encore en phase d'expérimentation et de validation dans les conditions réelles d'utilisation, soit il est difficile d'extrapoler les résultats en zone climatique différente pour des produits différents. Suite à cet état de fait et compte tenu du caractère expérimental de notre étude, nous avons opté pour un modèle de séchoir classique et assez simple. Il s'agit d'un séchoir solaire indirect

- Un capteur solaire plan à simple vitrage incliné de 30° par rapport à l'horizontale et orienté de sud vers le nord.

Les matériaux simulés constituant le capteur sont : une tôle peinte en noire (absorbeur), il est couvert de haut par un verre laissant passer le rayonnement solaire, et en bas un polystyrène utilisé comme isolant.

- Une chambre de séchage en brique

Le matériau simulé constituant ce séchoir est la brique pleine en terre cuite. Il comporte 10 claies galvanisées et grillagées sur lesquelles sont posés les produits à sécher. Les claies sont distantes les unes des autres de 12 cm, un espace pour la circulation de l'air

- Un ventilateur à la hauteur du séchoir pour assurer la convection forcée.

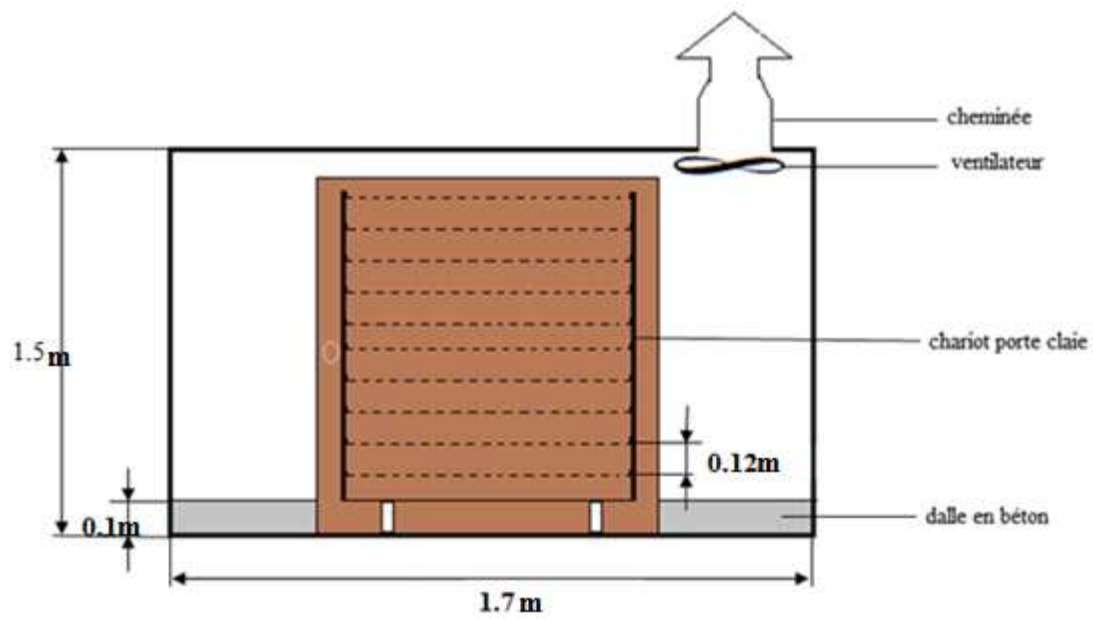


figure 15:vue de face de la chambre de séchage

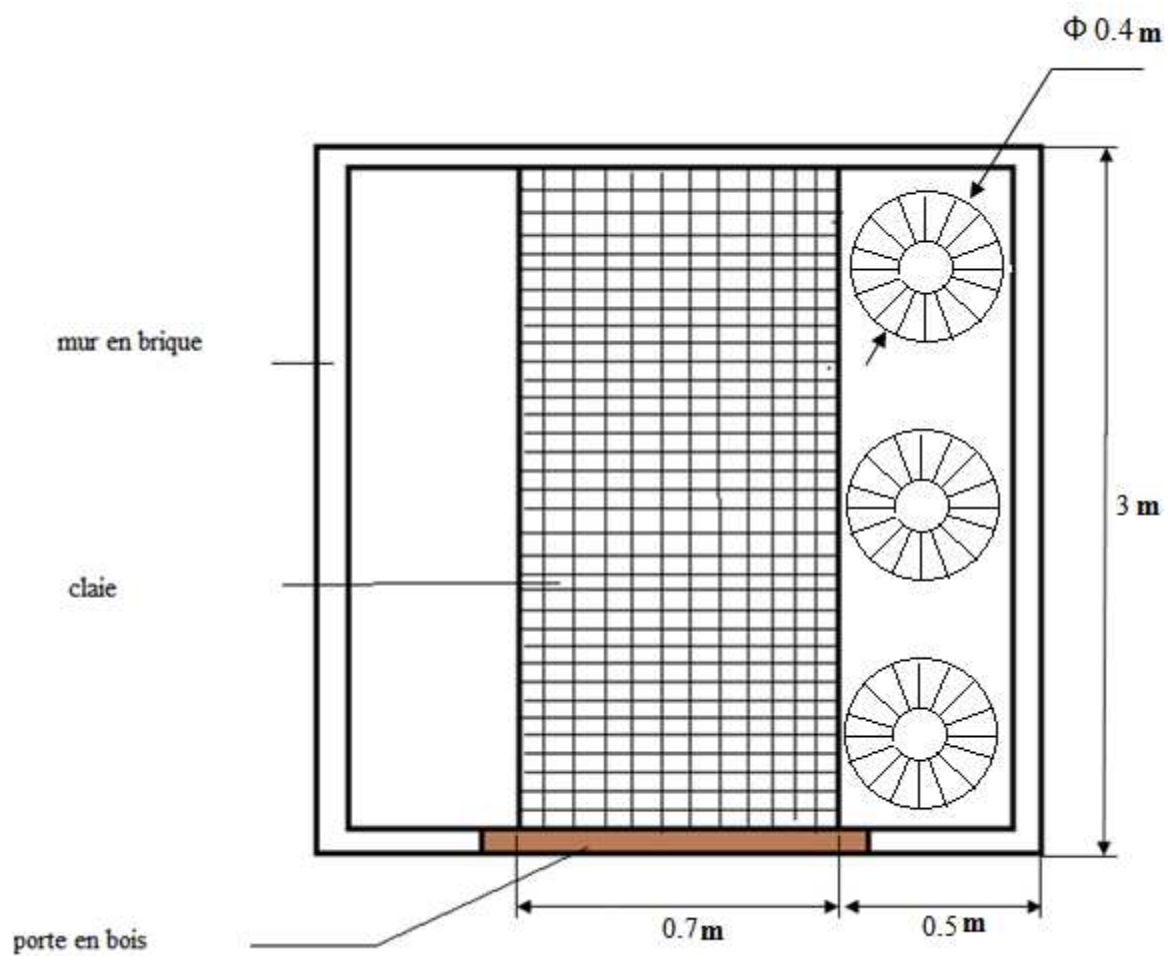


figure 16:vue de dessus du chambre de séchage

h : hauteur de la chambre de séchage (1.5m)

L : longueur de la chambre de séchage (3m)

l : largeur de la chambre de séchage (1.7m)

x : distance entre les claies (0.12 m)

e_d : épaisseur de la dalle (0.1m)

Dx : largeur d'une tranche (0.7 m)

Diamètre ventilateur : 0.4 m

2) Principe de fonctionnement



figure 17:Schéma de principe

L'air frais capté de l'extérieur est chauffé dans le capteur solaire, par le contact air absorbeur qui lui permet d'élever sa température. Cet air chaud dans le capteur arrive à l'entrée de chambre de séchage et traverse sur les claies. À la sortie de l'armoire, il y a un ventilateur qui aspire l'air de séchage traversant les claies superposées, et l'évacue vers l'extérieur.

II Dimensionnement du séchoir solaire

Le dimensionnement du séchoir consiste à déterminer les paramètres utiles pour le faire marcher :

1) Capteur solaire

a) Schéma du principe

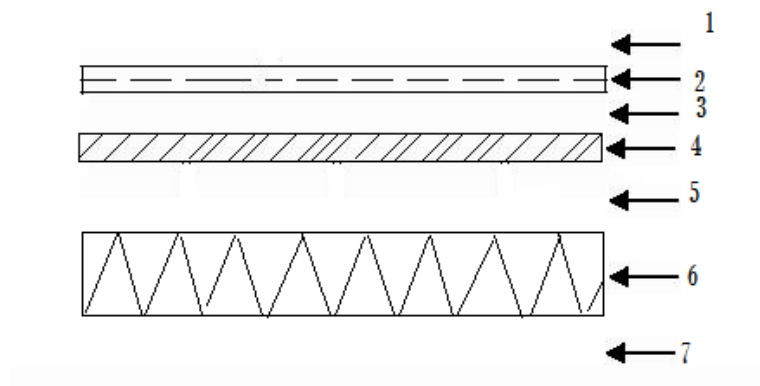


figure 18: capteur solaire à simple vitrage

- 1 : milieu ambiant
- 2 : couverture (en verre)
- 3 : conduit isolant
- 4 : absorbeur
- 5 : conduite utile
- 6 : isolant
- 7 : milieu ambiant

b) Hypothèses simplificatrices

Le modèle étudié est basé sur les hypothèses suivantes :

- Le transfert de chaleur est unidirectionnel ;
- Les échanges par conduction dans l'absorbeur et le vitrage sont négligeables.
- Tuyau isolé

2) Chambre de séchage

Nous avons choisi un séchoir convectif polyvalent pour légume. C'est une armoire à parois opaque munie des claies où sont disposés les produits.

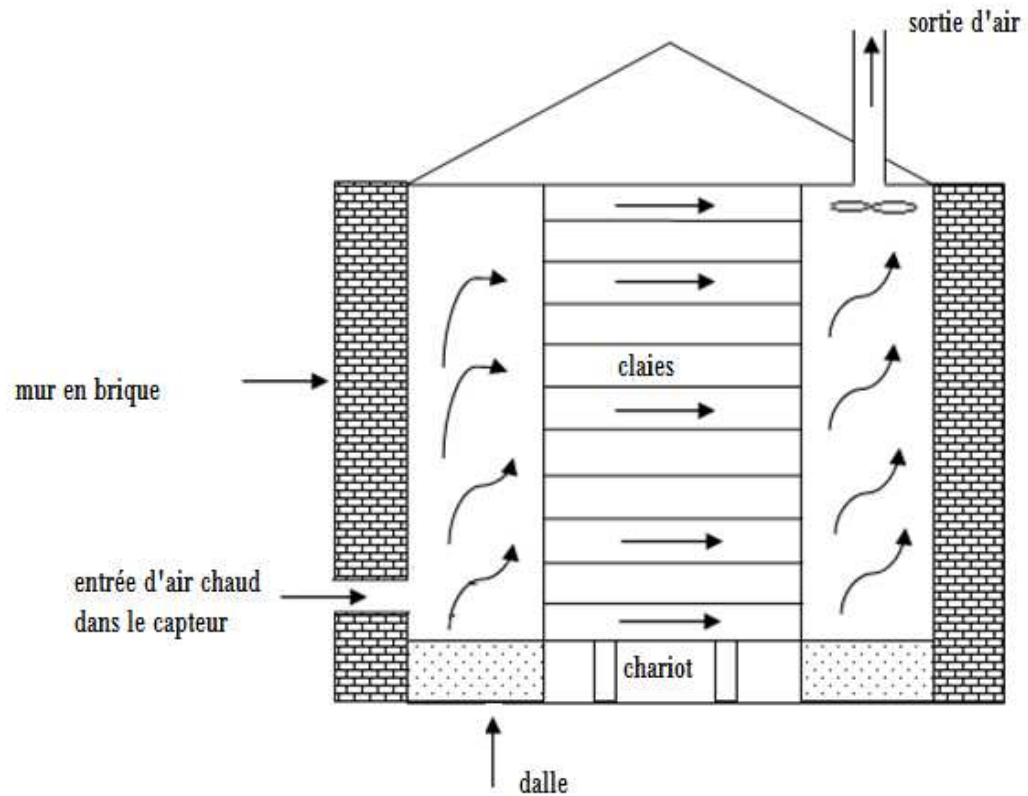


figure 19: chambre de séchage

a) Hypothèses simplificatrices

Les hypothèses de travail sont les suivantes :

- Les produits ont la même température et la même teneur en eau.
- L'ensemble des produits est considéré comme un milieu homogène qui sera caractérisé par sa température de surface.
- La porosité du séchoir chargé en produits reste constante au cours du séchage.
- La température, l'humidité, le débit de l'air asséchant sont homogène et uniforme
- L'inertie thermique de l'air est négligeable devant celle des produits.
- Les parois ont une température uniforme.
- Les échanges radiatifs à l'intérieur sont négligeables.
- Les échanges thermiques relatifs aux claies sont négligeables.
- les pertes au niveau de la porte et façade de derrière sont négligeables.

b) Dimensionnement de la chambre de séchage

La masse du produit à sécher est de 100 Kg

✚ La chambre de séchage

Chambre de séchage	Mur en brique	Porte en bois
profondeur : [m]	3	
Largeur : [m]	1.7	1.4
hauteur: [m]	1.5	1.2
Epaisseur : [m]	0.1	0.02

Tableau 2: dimensionnement chambre de séchage

✚ Les chariots et claies

Les claies seront disposées sur un chariot pour facilité le chargement et déchargement du produit.

	claie	chariot
Longueur : [m]	3	3
Largeur : [m]	0.7	0.7
hauteur: [m]	0.12/claie	1.2

Tableau 3: dimensionnement chariots et claies

III Calcul de l'énergie à fournir pour un période de séchage

1) Echanges thermiques dans une tranche de séchoir

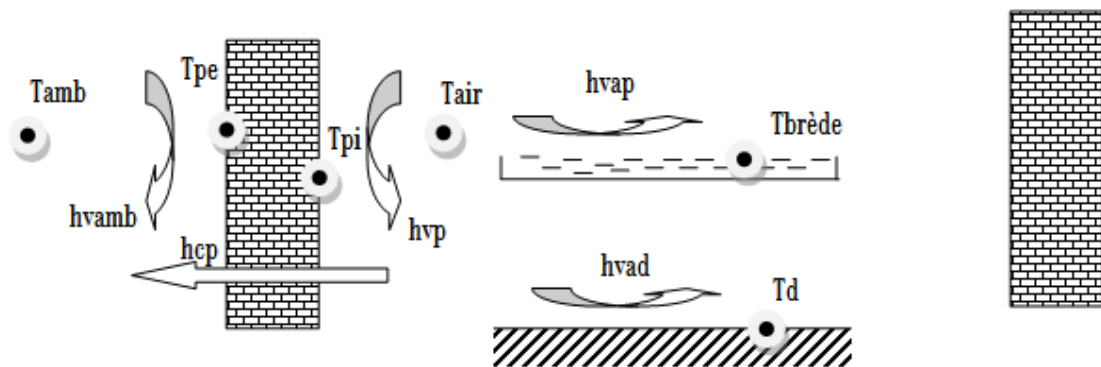

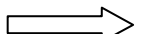


figure 20: Visualisation de l'échange thermique au niveau du séchoir

 : Convection
 : Conduction

2) Analogique électrique

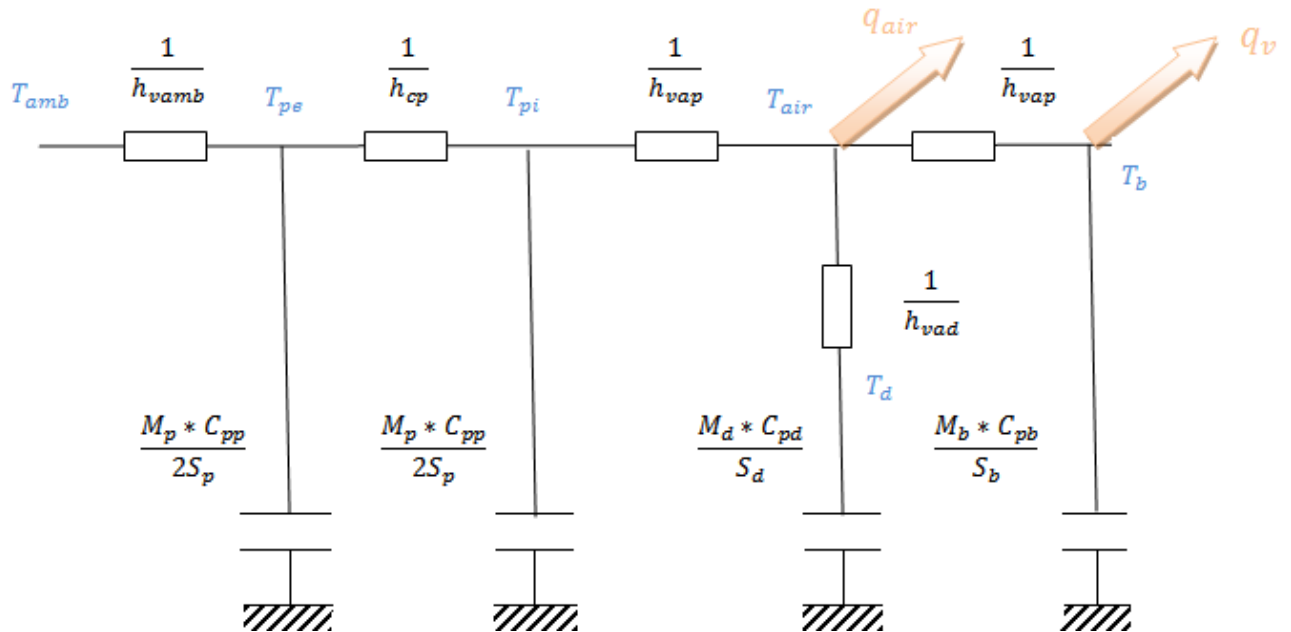


figure 21:schéma électrique relative à une tranche du séchoir

L'application de la loi d'Ohm au analogique électrique ci-dessus nous conduit au système d'équations de coefficients d'échanges thermiques et massiques

a) Coefficient d'échange thermique

- Echange par conduction

Dans la paroi en brique : $h_{cp} = \frac{\lambda_p}{e_p}$ [W/m K]

Avec λ_p : conductibilité thermique des parois

e_p : Épaisseur des parois

Dans la dalle : $h_{cd} = \frac{\lambda_d}{e_d}$ [W/m K]

Avec λ_d : conductibilité thermique de la dalle

Dans notre calcul, on prend : $\lambda_p = 0.93$ [W/mK] et $\lambda_d = 0.69$ [W/m K]

- Echange par convection

Entre la paroi externe et le milieu extérieur : $h_{vamb} = 5,67 + 3.86 V_{ext}$ [W/m K]

Entre l'air asséchant et la paroi interne du séchoir : $h_{vap} = \frac{\lambda_a}{D_x} * Nu$ [W/m K]

Avec $Nu = 0.036 Re^{4/5} Pr^{1/3}$ où $0.5 < Pr < 50$ et $Re > 3.10^5$ (écoulement laminaire)

λ_a : Conductibilité thermique de l'air

D_x : Largeur d'une tranche

Entre l'air asséchant et le brède : $h_{vabredes} = \frac{\lambda_a}{l_{brède}} * Nu_{brède}$

$l_{brède}$: Largeur de l'avivé

$Nu_{brède} = 0.057 Re^{2/3} Pr^{1/3} (T/T_b)$ où $2,5.10^5 < Re < 1,6.10^6$ et $1,4.10^{-2} < (T - T_b)/T_b < 0.17$

Entre l'air asséchant et la dalle : $h_{vad} = h_{vap}$

b) Coefficient d'échange massique [3]

On a la vitesse de séchage :

$$\dot{m} = h_m (P_{vs} \cdot X_{eq} - P_v)$$

Pour un transfert de chaleur on a :

$$h_m = \frac{Nu_m}{D_x}$$

Avec $Nu_m = 0.063 * Sc^{0,33} * Re^{0,66} * Pr^{1/3} * \left(\frac{T}{T_m}\right)^2$: nombre de NUSSELT pour

les transferts de masse, donné en fonction du nombre de REYNOLDS et du nombre de SCHMIDT. $Sc = \frac{\mu}{D_c}$ et $D_c = \frac{2,29}{101325} \left(\frac{T}{273}\right)^{1,81} [m^2/s]$: coefficient de vapeur d'eau dans l'air libre (formule de SCHIRMER).

En régime permanent, D_p est un coefficient de diffusion de l'humidité dans le

manioc. D'après BRAMHALL : $D_p = \frac{6,89.10^{-6}}{70,43 - 0,133 T_m} \exp\left(\frac{HB}{0,1792 - 2,553 HB} - 9,2\right)$

HB est l'humidité du brède

D'après BERTRAND, $P_{vs} = 101325 \times 10^{\left(\frac{17,443 - \frac{2795}{T_a} - 3,868 \cdot \log 10 T_a}\right)}$

3) Mise en équation

a. Face externe de la paroi

$$\frac{M_p C_{pp} (T_{ps}(j) - T_{ps}^*(j))}{2S_p \Delta t} = h_{vamb} (T_{amb} - T_{ps}(j)) + h_{cp} (T_{pi}(j) - T_{ps}(j))$$

b. Face interne de la paroi

$$\frac{M_p C_{pp} (T_{pi}(j) - T_{pi}^*(j))}{2S_p \Delta t} = h_{cp} (T_{ps} - T_{pi}(j)) + h_{vap} (T_{air}(j-1) - T_{pi}(j))$$

c. Dalle

$$\frac{M_d C_{pd} (T_d(j) - T_d^*(j))}{S_d \Delta t} = h_{vad} (T_{air}(j-1) - T_d(j))$$

d. Le produit brède

$$\frac{M_{brède} C_{pbrède} (T_{brède}(j) - T_{brède}^*(j))}{S_{brède} \Delta t} = h_{vabrède} (T_{air}(j-1) - T_{brède}(j)) - q_v$$

e. L'air asséchant

$$T_{air}(j+1) = T_{air}(j) + \frac{S_d h_{vad} (T_d(j) - T_{air}(j)) + S_p h_{vap} (T_{pi}(j) - T_{air}(j)) + S_{brède} h_{vabrède} (T_{brède}(j) - T_{air}(j))}{C_{pa} \text{ Débit}}$$

4) Résolution du système

a) Energie fournie pour l'évaporation dans le produit

$$q_v = \dot{m} * L_v \text{ [J/m}^2 \text{ s]}$$

L_v : chaleur latente massique de vaporisation, avec :

$$L_v = 4185 (597 - 0.56 (T_{brède} - 273) + 280 e^{-15 h_b})$$

m: vitesse de séchage

$$m = h_m (P_{vbrède} - P_{va})$$

h_b : teneur en humidité du brède

b) Energie perdue par l'air pour une tranche

$$q_{air} = \text{Débit} * C_{pa} (T_{air}(j+1) - T_{air}(j))$$

c) Energie utile

$$P_u = \text{Débit} * C_{pa} (T_{as} - T_{amb})$$

T_{as} : Température de l'air asséchant

IV Simulation informatique

1) Organigramme de simulation du séchoir

Pour la simulation du séchoir, on ne dimensionne pas le capteur solaire, on prend la valeur de température de sortie du capteur plan à air à simple vitrage qui a été déjà calculé.

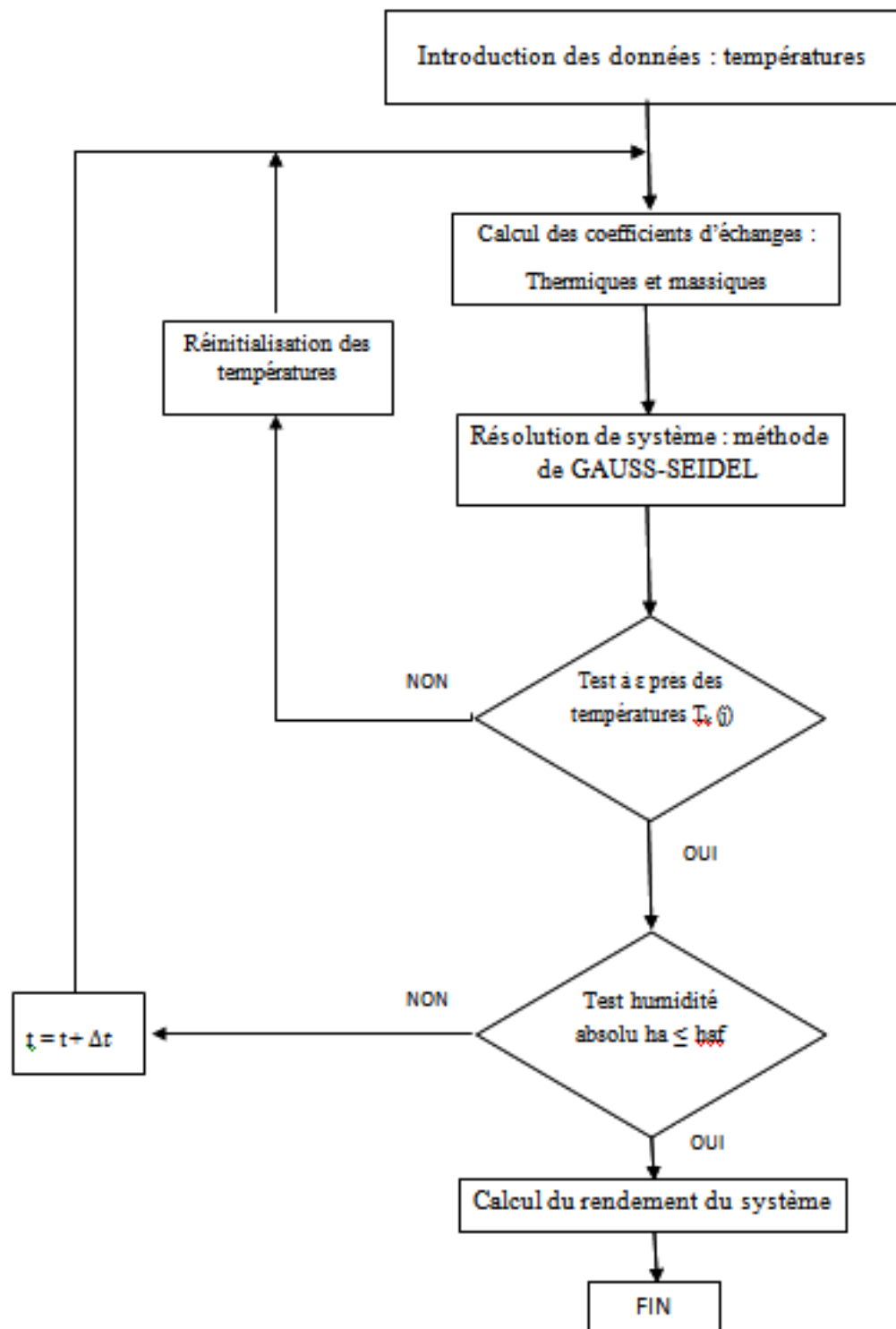


figure 22: Organigramme de résolution

2) Résultat de la simulation et discussion

a) Système solaire

Pour le système à chauffage solaire, le processus de séchage dépend de la puissance solaire et de la surface de l'insolateur qui joue le rôle de générateur d'air chaud.

La figure ci-dessous représente en fonction de l'heure de la journée, la variation des puissances solaires directe et diffuse reçues par une surface horizontale et des températures de l'air à la sortie de l'insolateur pour vitesse d'air ($V=0.5\text{m/s}$ et $V=1\text{m/s}$).

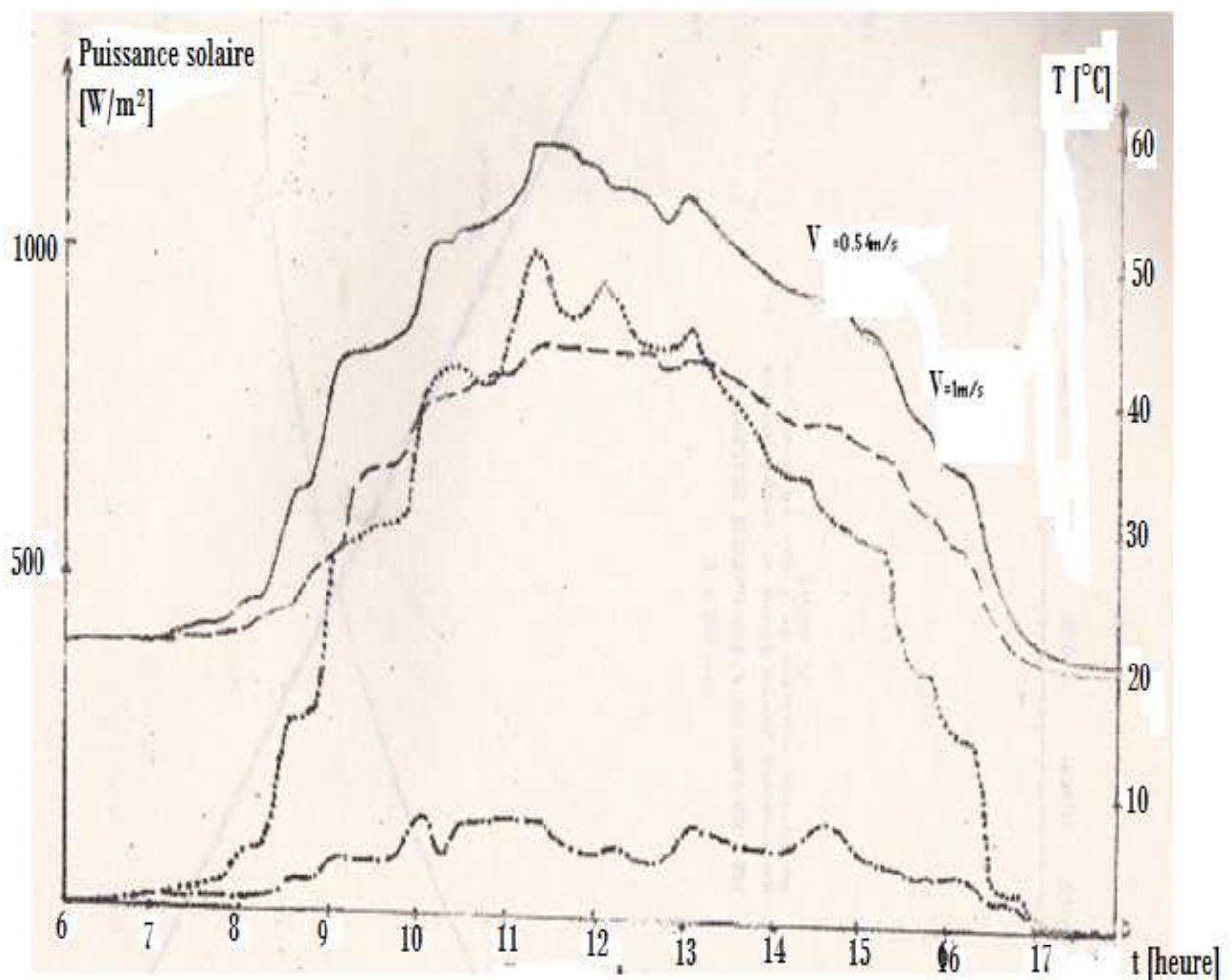


Figure 23: Variation des puissances solaire reçues sur une surface horizontale et variation de l'air à la sortie de l'insolateur par 2 vitesses d'air ^[10]

..... : diffus

_____ : direct

D'après cette courbe, nous observons que plus la vitesse est grande, plus la température de l'air est faible.

b) Capteur solaire

Rappelons que pour notre système, nous avons utilisé un capteur solaire à air simple passe, simple vitrage. A partir de cette journée type, voyons maintenant le résultat de la simulation du capteur modélisé. Ces résultats sont tracés sur des courbes afin de mieux visualiser la performance du capteur.

La courbe ci-dessous montre la variation de la température de sortie de l'air et de la température de l'absorbeur du capteur modélisé au cours de la journée à un débit donné (0.35 Kg/s).

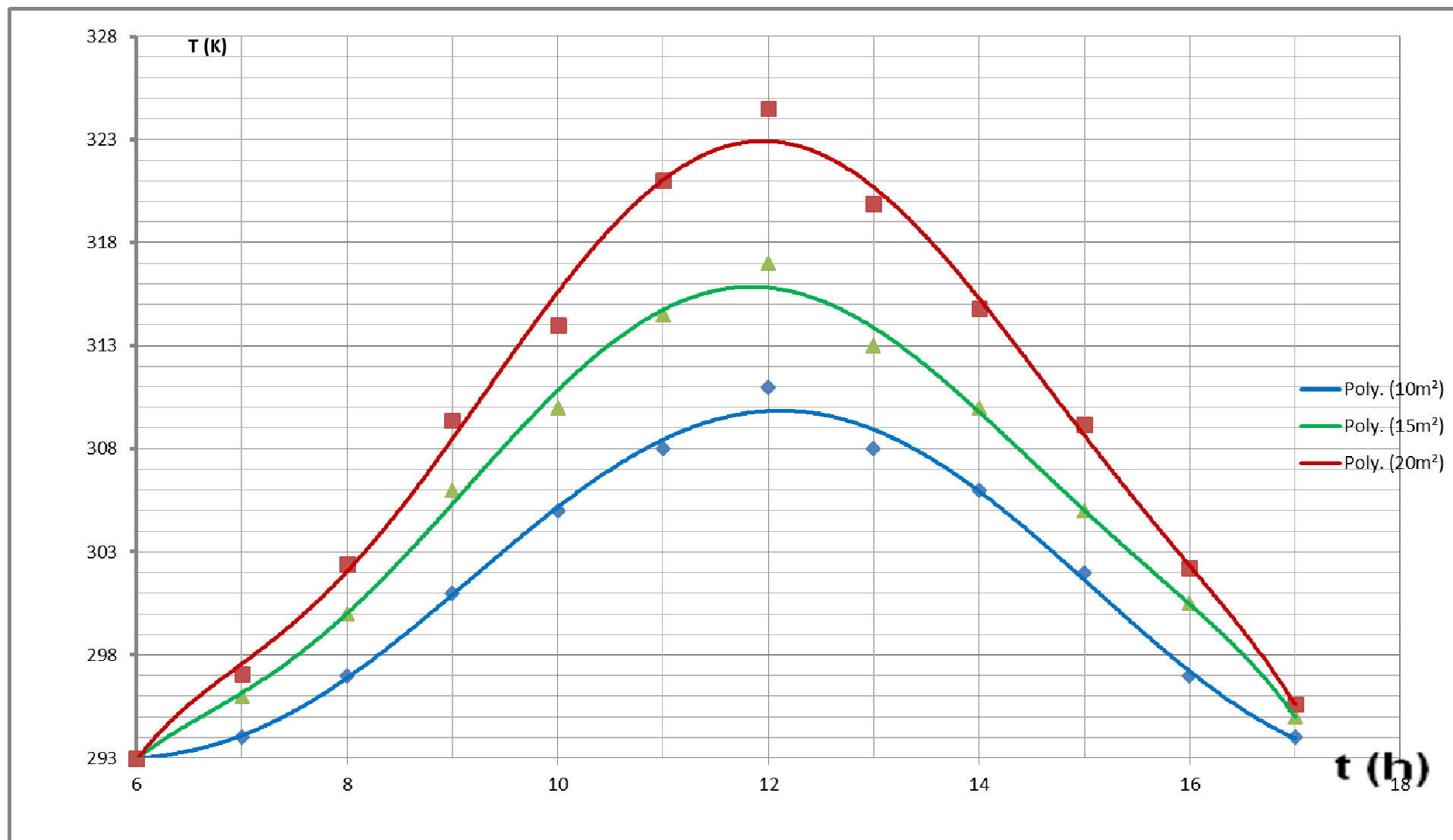


figure 24: Température de l'air à la sortie du capteur pour les surfaces de 10m², 15m² et 20m² (débit : 0.35Kg/s) ^[9]

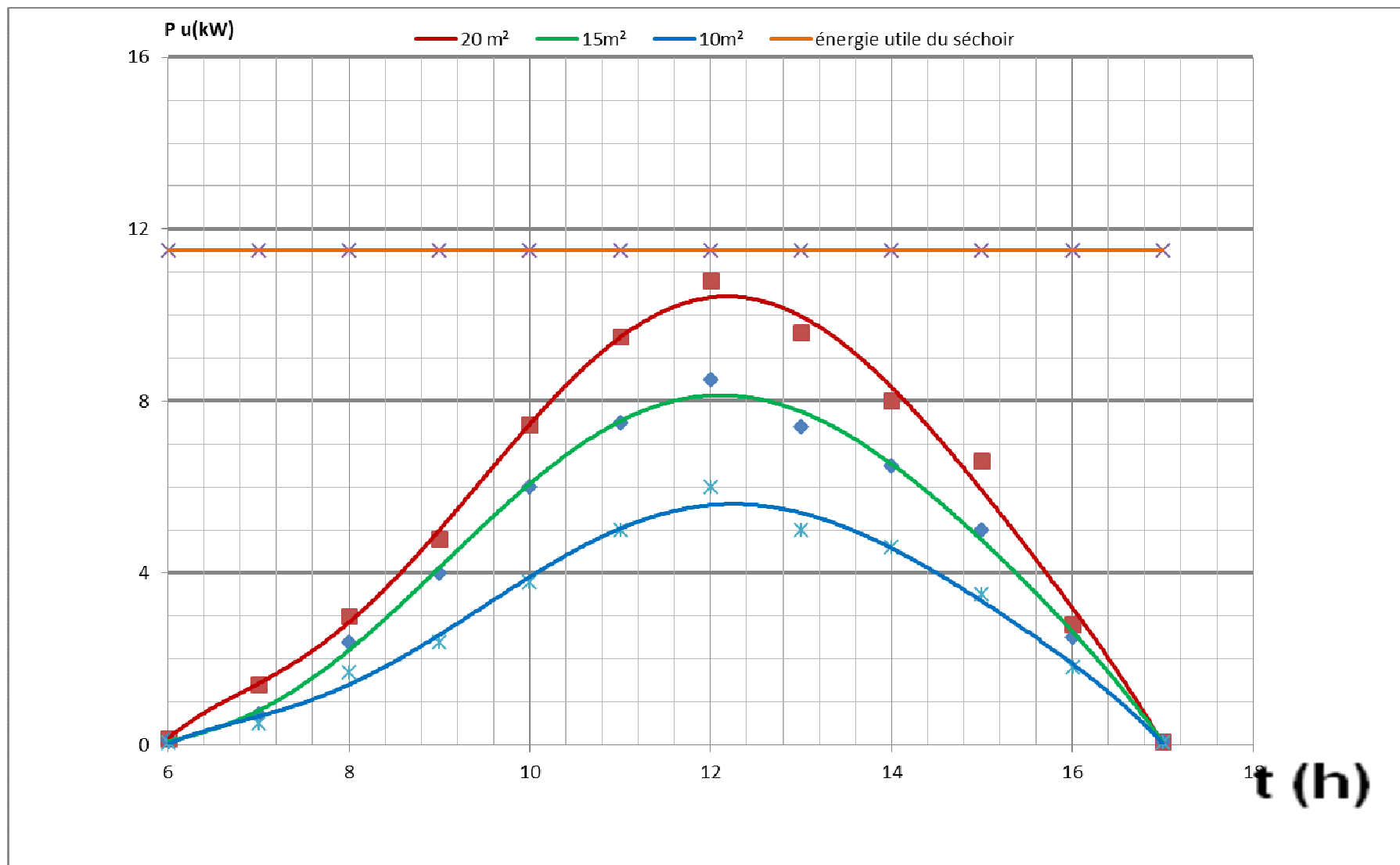


figure 25: Puissances utile pour les surfaces de 10m², 15m² et 20m² (débit : 0.35Kg/s) [9]

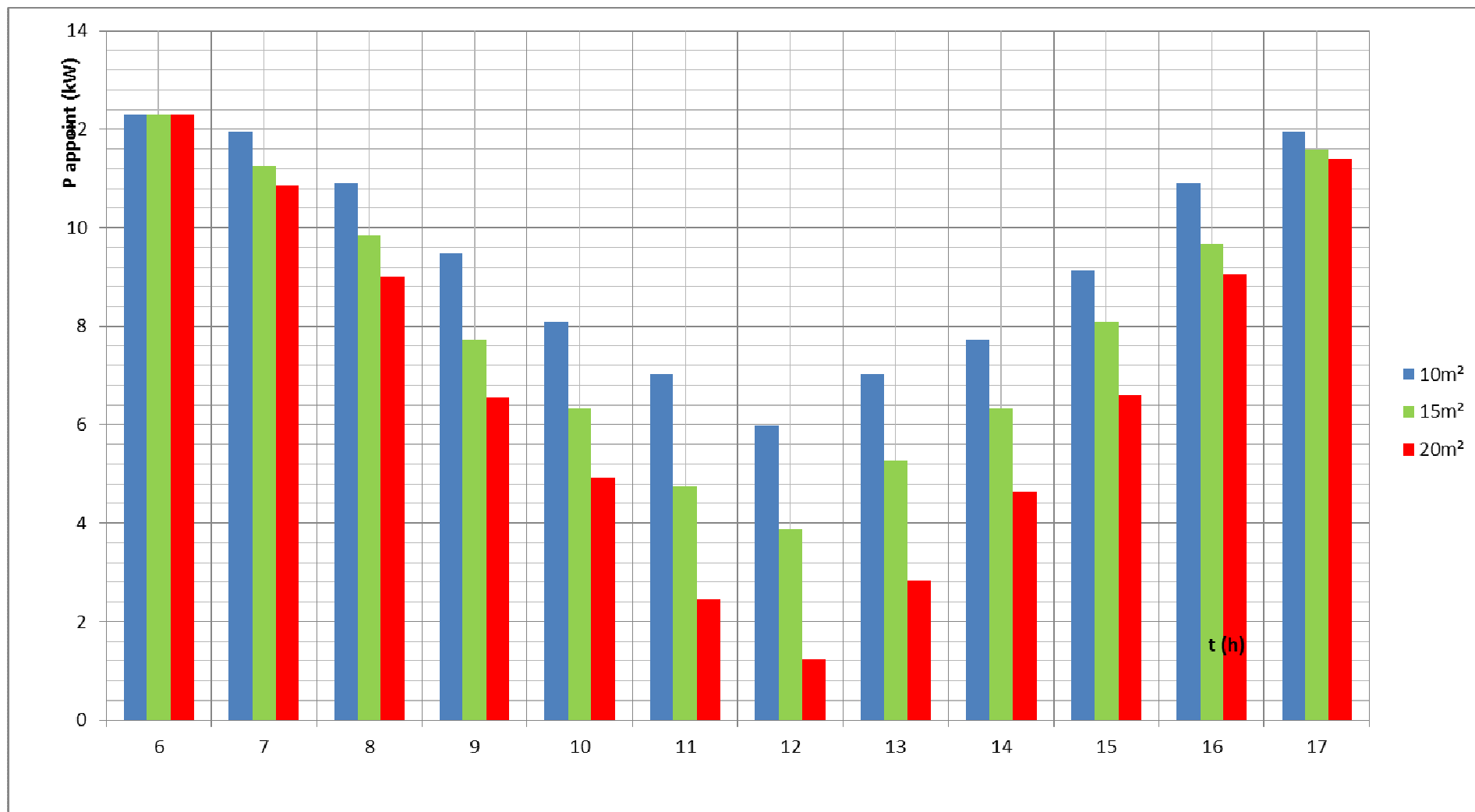


figure 26: Energie d'appoint à l'entrée de la chambre de séchage pour les surfaces 10m², 15m² et 20m² (T consigne: 55°C)

Dans notre cas, on prend le capteur simple vitrage de surface 20m^2 pour que le séchage puisse se faire en une journée.

c) Récapitulation des résultats données par la simulation

Condition initial :

- La température à l'entrée de la chambre de séchage est constante
- La vitesse de l'air à l'entrée de la chambre de séchage est de 1 [m/s]
- Le débit d'air à l'entrée de l'insolateur est de 0.35 [Kg/s]
- Température de séchage à l'entrée de la chambre de séchage : 40°C , 45°C et 50°C

Partie II : étude et conception d'un mini séchoir électrique pour la modélisation d'un séchoir solaire indirect

Durée [h]	Egie Solaire [W/m²]	T airs entrés du capteur [K]	T air entrée du séchoir [K] = 40°C			T air entrée du séchoir [K] = 45°C			T air entrée du séchoir [K] = 55°C		
			Tair S [K]	ha [%]	Masse [Kg]	Tair S [K]	ha [%]	Masse [Kg]	Tair S [K]	ha [%]	Masse [Kg]
6	380	293	310,6	511	100	315	511	100	323,6	511	100
7	400	295	310,66	509	99,88	315,08	509	99,88	323,89	509	99,87
8	450	296	310,7	507	99,43	315,14	506	99,42	323,98	506	99,5
9	850	299	310,72	500	98,39	315,15	500	98,34	323,99	499	98,25
10	1000	301	310,72	489	96,48	315,15	488	96,38	324	487	96,18
11	1150	303	310,72	470	93,45	315,15	469	93,27	324	467	92,89
12	1100	306	310,73	406	82,96	315,15	441	88,72	324	437	88,09
13	1020	302	310,73	357	74,97	315,15	403	82,47	324	397	81,49
14	940	300	310,73	295	64,79	315,16	353	74,26	324,01	344	72,81
15	870	298	310,74	218	52,18	315,16	289	63,79	324,02	277	61,76
16	670	296	310,75	125	36,87	315,17	210	50,86	324,03	193	48,06
17	380	294	310,75	37	25,32	315,19	114	35,08	324,06	92	31,45
17,75	250	293							324,09	34	21,97
18	0	293	310,77	18	18,65	315,21	30	21,32			

Tableau 4: Résultat de la simulation informatique

➤ Propriété physique de l'air

Te air	17 [°C]
Ts air	35, 45, 55 [°C]
Masse volumique de l'air	1.1 [Kg/m ³]
Chaleur spécifique de l'air	1031 [J/K.Kg]
Viscosité dynamique de l'air	1.8 10 ⁻⁵ [Kg/ms]
Conductivité thermique de l'air	0.027 [W/K m]
Débit d'air	0.35 [Kg/s]
Vitesse de l'air	1 [m/s]
Re	371 111
Pr	0,66
Nu	490

Tableau 5: Propriété physique de l'air

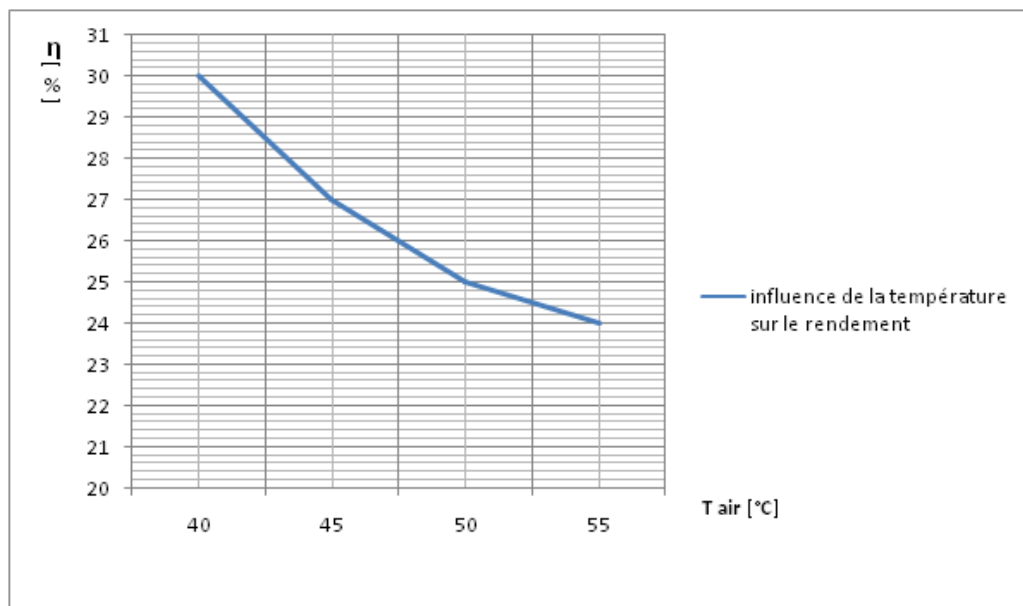


figure 27: influence de la température sur le rendement

La figure 27 nous montre la variation du rendement global du système de séchage en fonction de la température d'entrée de l'air asséchant pour un débit constant (0.35 Kg/s). D'après ce graphe que le rendement décroît progressivement si la température augmente.

Pour conclure, le tableau 4 montre la durée de séchage du produit en fonction de la température de l'entrée du séchoir et la variation de l'humidité du produit.

D'après cet tableau, on en déduit que le temps de séchage varie en fonction de la température de séchage. Pour séché 100 Kg de chou de chine en une journée, il nous faut une température de 55 [°C] constante à l'entrée du séchoir.

***PARTIE III : EVALUATION ECONOMIQUE ET
ETUDE D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX***

Chapitre VI: EVALUATION ECONOMIQUE

I Introduction

Une analyse économique est nécessaire pour trouver la meilleure compromise entre les performances thermiques et leur rentabilité économique. L'objet de cette étude économique est de savoir l'utilisation de l'énergie solaire, par l'intermédiaire des insolateurs est rentable ou non dans un système de séchage du chou de chine.

Ici on prend le cas du séchage en une journée.

II Coûts de l'investissement

1) Investissement unité (I)

Elle est donnée par la formule : $I = I_1 + I_2$

I_1 : Investissements en limites de fabrication

I_2 : Services généraux et stockage

a) Investissement en limite de fabrication

Désignation	Quantité	Prix unitaire [Ar]	Montant [Ar]
Prétraitements			
Balance potée max 120Kg	1	200 000	200 000
Cuvette	10	4 500	45 000
Couteaux	5	2 500	12 500
Planche	5	2 000	10 000
Insolateur			
20 m ²	1	300 000	300 000
Séchoir			
Chambre de séchage			293 000
Ventilateur	3	20 000	60 000
Imprévus : 10 [%] de la valeur des matières premières			
			270 150

Tableau 6: coût de l'installation du séchoir

Les investissements en limites des unités de fabrication sont estimés à $I_1 = 1\,170\,650$ [Ar]

b) Services généraux et stockages

Les services généraux et stockage sont estimés à 35 % des investissements en limites de fabrication :

$$I2 = 409\,727 \text{ [Ar]}$$

D'où le coût des investissements unités est de I : 1 580 377 [Ar]

2) Capital fixe (CF)

Le capital fixe ou CASH FLOW est donné par la formule :

$$CF = I1 + I2 + I3 + I5$$

I3: Engineering

I5: Frais de contraintes et redevances

$$I3 = 20[\%] I1 = 316\,075 \text{ [Ar]}$$

$$I5 = 10[\%] I1 = 117\,065 \text{ [Ar]}$$

D'où le capital fixe est CF = 2 013 518 [Ar]

3) Capital amortissable

Il est donné par la formule

$$CA = \text{Charge fixe} + \text{Charge initiales} + \text{Frais d'intérêts intercalaires} + \text{Frais de démarrage}$$

- Charge initiales

Les charges initiales sont évaluées au double de prix des matières premières pour une opération de production. Donc ici I6 = 1 801 000 [Ar]

- Frais d'intérêts intercalaires

$$I7 = 7 [\%] CF = 140\,946 \text{ [Ar]}$$

- Frais de démarrage

Il est la valeur du frais opératoire (charge variable + Main d'œuvre) pendant le temps de démarrage d'environ 1 à 4 mois

$$I8 = 1\,806\,520 \text{ [Ar]}$$

De ces calculs, on peut avoir enfin le capital amortissable :

$$CA = 5\,761\,994 \text{ [Ar]}$$

4) Fond de roulement

$$I9 = 2 * \text{Coût des frais de démarrage} = 3\,613\,060 \text{ [Ar]}$$

III Chiffres d'affaires prévisionnels (CAP)

L'usine de séchage fonctionne 6 mois dans l'année (Juillet-Décembre)

Pour le séchage de 100Kg de chou de chine, il nous faut 1Jour environs (5 foie par semaine), donc en un mois 20 séchages, ce qui donne pour une année 120 opérations.

En produisant 20 Kg de chou de chine séché par période, on a alors une production annuelle de 2400 [Kg] de chou de chine séché.

Désignation	Quantité [Kg]	Prix unitaire [Ar]	Montant [Ar]
Chou de chine	2 400	6 000	14 400 000

Tableau 7: Chiffres d'affaires prévisionnelles

IV Charge liée à la production

La charge liée à la production est égale à la somme des charges variables, coût de main d'œuvre et charge fixe

Désignation	Quantité	Durée de fonctionnement [h]	Puissance [KW]	Energie [KWh]	Prix ou coût unitaire [Ar]	Durée de travail/an [h]	Montant [Ar]
Matières premières : 5 [%] des matières premières durant le prétraitement du chou de chine (100 Kg)							
Chou de chine	105[Kg]				200		504 000
Utilité C							
Energie électrique		45	0.2	10	490		4 900
Eau	0.3 [m ³]				360		108
Total utilité C/an							120192
Frais divers : 30 [%] de la matière première							270 150
Charge Variable = Matières premières + utilité + Frais divers							894 342

Tableau 8: Charge Variable

Désignation	Montant [Ar]
Amortissement (Am) : 4% investissement unité	63 215
Frais financiers (FF): 12 % du fonds de roulement	433 567
Entretien (M) : 4% investissement unités	63 215
Taxes et assurances (TX) : 2% investissement en limite de fabrication	23 413
Frais généraux et sièges (FG) : 1% investissement en limite de fabrication	11 706
Charge fixe = Am + FF + M + TX + FG	595 116

Tableau 9: Charge fixe

Travail	Nombre d'ouvriers	Salaire/heures [Ar]	Durée de travail /an [h]	Montant [Ar]
Temporaire				
Chargement et déchargement chou de chine	1	450	192	86400
Lavage	2	300	192	230400
Découpage	4	300	192	576000
Permanent				
Responsable de l'usine	1	1000	960	960 000
gardiennage	1	500	1920	960 000
Total MO/an				2 065 152

Tableau 10: Les mains d'œuvres

D'où CP = 3 554 610 [Ar]

V Bénéfices

Le bénéfice brut est donné par la formule $B_{\text{brut}} = \text{CAP} - \text{CP}$

D'où $B_{\text{brut}} = 10\,845\,390$ [Ar]

Tenant compte des impôts sur les bénéfices des sociétés 30% du bénéfice brut, le bénéfice net est donc : un bénéfice net de **$B_{\text{net}} = 7\,591\,773$ [Ar] par ans**

VI Avantages de l'installation

Ce type d'installation de séchoir coûte moins cher par rapport aux autres qui viennent de l'étranger. En plus, il est capable d'atteindre la vitesse de séchage nécessaire pour sécher le brède ainsi que d'autres aliments afin d'obtenir des produits de qualités et de quantités.

L'objectif de l'étude est de proposer une démarche d'éco-conception simple et facilement applicable pour les producteurs.

De point de vue technologique, il est facile à manipuler et à maintenir avec un principe de fonctionnement simple à maîtriser

Les pièces de rechanges sont tous disponible chez nous. C'est une installation adaptée au besoin des producteurs Malagasy et des ressources disponible à Madagascar.

Chapitre VII: REGARD SUR L'ENVIRONNEMENT

L'étude d'impact est un instrument de planification qui aide les promoteurs à exécuter et à concevoir un projet plus respectueux sans remettre en jeu sa faisabilité technique et économique. La démarche à suivre pour une étude d'impact environnemental est la suivante :

- Mise en contexte et description du projet
- Identification de l'impact positif et négatif
- Mesures d'atténuations

I Mise en contexte du projet

La contribution de l'environnement au développement durable nous oblige à évaluer les impacts environnementaux liés à un projet selon la charte de l'Environnement (art 4 et 10 –Loi n° 90 033 du 21/12/90, modifiée la loi n° 97 012 du 06/06/97) mentionnées ci-après :

Art 4 : consacre l'obligation de protection de l'environnement, du principe du droit à l'information :

« La protection et le respect de l'environnement sont d'intérêt général, il est du devoir de chacun de veiller à la sauvegarde du cadre dans lequel il vit. A cet effet, toute personne physique ou morale doit être en mesure d'être informée sur les décisions susceptibles d'exercer quelque influence sur l'environnement et ce directement ou par l'intermédiaire de groupements ou d'associations. Elle a également la faculté de participer à des décisions. »

Art 10 : énonce le principe de réalisation des EIE pour les projets d'investissements atteinte ou privés : *« les projet d'investissements publics ou privés susceptibles de porter atteinte à l'environnement doivent faire l'objet d'une étude d'impact, compte tenu de la nature technique, de l'ampleur desdits projets ainsi que de la sensibilité du milieu d'implantation. Les projets d'investissements soumis à autorisation ou à approbation d'une autorité administrative font également l'objet d'une étude d'impact dans les mêmes conditions que les autres projets. Un décret précisera les modalités des études d'impact, la procédure applicable en la matière, et l'organe habilité à la mise en œuvre de ces études et procédures. »*

II Description du projet

Le projet consiste à l'étude de dimensionnement et réalisation d'un séchoir solaire indirect pour le brède (dans notre cas ici : chou de chine) afin d'assurer l'exportation du produit séché sur le marché international.

III Impact négatif

Les problèmes de l'industrie sont généralement dus à la pollution de l'eau, de l'air et du sol, au bruit et aux déchets.

- Consommation des produits transformés par rapport à la biologique
- Risque sur l'hygiène (bactérie, microbe, ...)
- Evolution du système peu aisé
- Coût d'investissement assez élevés

IV Impact positif

- Diminution des pertes du produit pour les producteurs
- Faciliter d'exportation vis-à-vis du transport
- Amélioration de la condition de vie des agriculteurs malagasy
- Réduction de la pauvreté

V Mesures d'atténuations

Après l'analyse des impacts sur l'environnement du projet, on est conduit à proposer des mesures de suppressions ou au moins de réductions de ces impacts dans le cas échéant.

On a les mesures suivantes :

- Respecter la norme sur la production des produits séchés ;
- Isoler les produits après le séchage et mettre dans un endroit sec pour bien conserver ;
- Toute personne travaillant dans l'usine devrait être propre tout en mettant du gant pendant le travail

CONCLUSION

CONCLUSION

L'ensemble de ce travail consiste à faire des études techniques et économiques préalablement nécessaire pour la réalisation d'un séchoir solaire indirect pour le brède (chou de chine).

Nous avons pu déterminer les isothermes de sorption du brède grâce aux résultats obtenues par l'expérience du séchoir électrique en se référant à la modélisation d'HENDERSON.

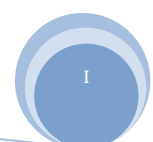
La simulation informatique du système de séchage nous a permis de faire une approche du dimensionnement du séchoir solaire pour le séchage de masse de 100Kg de chou de chine. Pour cette quantité de produit, on choisit d'installer un capteur solaire à simple vitrage de surface de 20m² avec un débit d'air fixe de 0.35 Kg/s et on met une énergie d'appoint électrique à l'entrée de la chambre de séchage pour que la température de séchage soit constante.

De plus, elle nous a permis aussi de suivre l'évolution du produit au cours du séchage (humidité absolue, masse du produit, durée de séchage ...).

Il serait possible d'apporter des améliorations aux résultats obtenus en effectuant plus d'expériences sur le séchage du brède à différent condition, afin de trouver de nouvelle modèle, ou relations pouvant s'adapter encore plus à ce produit

BIBLIOGRAPHIES ET WEBOGRAPHIES

- [1]: ADRIANIRINA Haja Ulrich : « Conception et construction d'un séchoir à vapeur pour plantes médicinales et légumes », Mémoire d'ingénieur, 1997, 67 pages
- [2]: Alexandre LAPIDO : « Conception et mis au point d'un séchoir polyvalent modulaire à vocation industrielle adapté au Bénin », Thèse de doctorat, 1988, 154 pages
- [3]: BOUMEDIENE Tonati : « Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte », Thèse de doctorat, 2008, 115 pages
- [4]: D. Semmar : « Etude et Réalisation d'un Capteur Solaire à Air », 1998, 38 pages
- [5]: GRET : « Sécher des produit alimentaires : techniques, procédés, équipements », 1995, 344 pages
- [6]: L. Bennamoun : « Contribution à l'étude de faisabilité de séchoirs solaires pour les produits agricoles », 207, 204 pages
- [7]: M. Kouhila : « Etude Expérimentale du Séchage Convectif de la SAUGE dans un Séchoir Solaire muni d'un Appoint Electrique », 200, 38 pages
- [8]: N. Chalal : « Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect », 2008, 126 pages
- [9]: RAKOTOVAO José Denis : « Modélisation informatique d'un système de séchage solaire indirect pour fruits et légumes », Thèse D.E.A, Déc 1983, 80 pages
- [10]: RANARIJAONA Jean Désiré : « Analyse technico-économique d'un système solaire de séchage pour le bois », Thèse de doctorat, 1986, 75 pages
- [11]: RASOANAIVO Jean Luc : « Contribution à l'étude, la conception et à la réalisation d'un séchoir solaire polyvalent : application à la valorisation des produits agroalimentaires », thèse de doctorat, 2010, 148 pages.
- [12]: Yves Jeannot : « isotherme de sorption : Modèles et détermination », juillet 2008, 16 pages
- [13]: Yves Jeannot : « Transfert Thermique », 2012, 161 pages
- [14]: <http://bioenergies.free.fr>
- [15]: <http://fr.wikipedia.org/séchoir> solaire
- [16]: <http://unesdoc.unesco.org>
- [17]: www.cdre.dz/sienr
- [18]: www.chalezeuse.org
- [19]: www.fao.org



ANNEXE 1 : LISTING DE LA PROGRAMMATION

=====FONCTIONS DES CALCULS UTILES =====

=====Fonction de calcul isotherme=====

```
Public Function calc_Isot(Tbrede As Double, Pvbrede As Double, T As Double)
Dim a As Double, b As Double, c As Double, Ps_brede As Double, HA As Double
a = 17.443
b = 2795 / Tbrede
c = 3.868 * ln(Tbrede) / 2.302585092994
    Ps_brede = 101325 * 10 ^ (a - b - c)
K = 0.0011207
n = 0.7
HAi= 5.11
    hreq = 1 - Exp(-K * T * (HA ^ n))
    Pvbrede = Ps_brede * hreq
End Function
```

=====Fonction calcul de la propriété de l'air=====

```
Public Function Prop_Air(Pr As Double, T As Double, HR As Double, Ro As Double,
Cond As Double, VD_ah As Double, HA_Air As Double, VC_ah As Double, Pv_Air As
Double, Cp As Double)
Dim a As Double, b As Double, c As Double, Ps_brede As Double, Ps_Air As
DoubleDim Ko As Double, VD_e As Double, VD_as As Double, Cv As Double
Patm = 101325
a = 17.443
b = 2795 / T
c = 3.868 * Log(T) / 2.302585092994
    Ps_Air = Patm * 10 ^ (a - b - c)
HR = HR / 100
    Pv_Air = HR * Ps_AirHA_Air = (0.622 * Pv_Air) / (Patm - Pv_Air)
    Cv = (0.622 * Pv_Air) / (Patm - (0.378 * Pv_Air))
    Cp = (0.24 * (1 - Cv) + (0.46 * Cv)) * 4185
    Ro = 0.0034 * ((Patm - 0.378 * Pv_Air) / T)
    VD_ah = 0.000018 * Patm / ((Pv_Air / VD_e) + ((Patm - Pv_Air) / VD_as))
    VC_ah = VD_ah / Ro
```

Cond= 0.00535 + (0.000069 * T) + (0.000000000245 * T * T) - (0.00000000000271 * T * T * T)

Pr = (VD_ah * Cp) / Cond

End Function

===== Calcul des coefficients thermiques=====

Public Function Calc_Coef_Therm(Ep_P As Double, Ep_D As Double, Tpe As Double, Vf As Double, Tbrede As Double, HA As Double, HR As Double, lbrede As Double, hcp As Double, hcd As Double, hrc As Double, hvatbrede As Double, hvap As Double, hvad As Double, hm As Double, Qm As Double, Qv As Double, hvamb As Double, Lv As Double, Nu As Double)

Dim Re As Double, Dp As Double, Sc As Double, Nu_m As Double

Dim Lm_D As Double, Em_P As Double, Lm_P As Double, Dx As Double, Cp As Double

Dim Nu_brede As Double

Dx = 0.7

Lm_D = 0.69

Lm_P = 0.93

Débit = 0.35

%% %% Echange par conduction

hcp = Lm_P / Ep_P

hcd = Lm_D / Ep_D

%% %% Echange par convection

hvamb = 5.67 + (3.86 * Vf)

Call Prop_Air(Pr, Tbrede, HR, Ro, Cond, VD_ah, HA_Air, VC_ah, Pv_Air, Cp)

Re = (Vf * Dx) / VC_ah

Nu = 0.0366 * Pr ^ (0.33) * (Re ^ 0.8) ^

hvap = (Nu * Cond) / Dx

hvac = hvap

Nu_brede = 0.057 * (Re ^ 0.66) * (Pr ^ 0.33) * ((Tair / Tbrede) ^ 1.5)

hvatbrede = (Nu_brede * Cond) / lbrede

%% %% Transfert de masse

Dp = (0.00000698 / (70.43 - 0.133 * Tbrede)) * Exp((HA / (0.1792 - 2.553 * HA)) - 9.2)

Dac = (2.29 / 101325) * (Tpe / 273) ^ 1.8

```

Sc = VC_ah / Dac
Nu_m = 0.063 * (Sc ^ 0.33) * (Re ^ 0.66) * (Tair / Tbrede) ^ 2
hm = (Nu_m * Dp) / lbrede
Qm = hm * (Pvbrede - Pv_Air)
Lv = 4185 * (597 - 0.56 * (Tbrede - 273) + 280 * Exp(-15 * HA))
Qv = Lv * Qm

```

End Function

===== Procédure de calcul=====

%%%%%%%%variable paroi

```

Dim Dx As Double, Cp_P As Double, Vext As Double, lbrede As Double, Ep_D As Double, Lm_D As Double, Ep_P As Double, Lm_P As Double, Em_P As Double, hvamb As Double, hrc As Double, hcp As Double, hcd As Double, hvatbrede As Double, hvap As Double, hvad As Double, hm As Double, Qm As Double, Qv As Double, Tpe As Double, Vf As Double

```

```

Dim Ro_P As Double, L_P As Double, IP As Double, S As Double

```

```

Dim RoB As Double, EpB As Double, L_B As Double, IB As Double, Lv As Double, Nu As Double

```

```

Dim RoD As Double, Ed As Double, CpD As Double, L_D As Double, ID As Double

```

```

Dim Ve As Double, HAI As Double, HAF As Double, dt As Double, MCSd As Double, Sect As Double, debit As Double, Tamb As Double, Tair As Double, Tpi As Double

```

```

Dim Qt As Double, Qair As Double, Mbrede As Double, Ms As Double, eps As Double, isok As Integer

```

%%%%%%%%calcul coefficient thermique

```

Dim Tbrede As Double, HA As Double, HR As Double, Tbrede1 As Double, ECPE As Double, ECDBREDE As Double, ECPI As Double, ECDAL As Double, AL As Double

```

```

Dim Tair_S As Double, SB As Double, Mevap As Double, dure As Double, dure_h As Double, energvap As Double, T As Double, Ro As Double

```

```

Dim Pvbrede As Double, Cond As Double, VD_ah As Double, HA_Air As Double, Pv_Air As Double, VC_ah As Double, Pr As Double

```

%%%%%%%%Variable de GAUSS-EIDEL

```

Dim Tpe00 As Double, Tbrede00 As Double, Tpe0 As Double, Tpi0 As Double, Tbrede0 As Double, Tpe1 As Double, Tpi1 As Double

```


Dim Td As Double, Tb As Double, Td00 As Double, Tb00 As Double, Td1 As Double,
Sd As Double, Tb1 As Double, Cp As Double

===== Données=====

%%%%%paroi

SP = L_P * IP

%%%%%%%%brede

SB = L_B * IB

%%%%%%%%dalle

Sd = L_d * ld

%%%%%%%% parameter

Sd = L_D * ID

dt = 900

Tair = T

Md = RoD * Ed * Sd

Mp = Ro_P * Ep_P * S

T = 1.8 * (T - 273) + 492

Tpe = Tamb

Tpi = Tamb

Td = Tamb

Tbrede = Tamb

HAi = HAI / 100

HAf = HAf / 100

HA = HAI

Mevap = 0

Durée = 0

Qt = 0

Qair = 0

Ms = (Mbrede * 0.01638) / 0.1

Call Prop_Air(Pr, Tbrede, HR, Ro, Cond, VD_ah, HA_Air, VC_ah, Pv_Air, Cp)

Call Calc_Coef_Therm(Ep_P, Ed, T, Vf, Tbrede, HA, HR, IB, hcp, hcd, hrc, hvatbrede,
hvap, hvad, hm, Qm, Qv, hvamb, Lv, Nu)

```

Tpe00 = Tpe
Tpi00 = Tpi
Tbrede00 = Tbrede
Td00 = Td
Tpe0 = Tpe
Tpi0 = Tpi
Tbrede0 = Tbrede
Td0 = Td

While HA > HAf
    duree = duree + 900

    Call Calc_Coef_Therm(Ep_P, Ed, Tpe0, Vf, Tbrede0, HA, HR, lB, hcp, hcd, hrc,
hvatbrede, hvap, hvad, hm, Qm, Qv, hvamb, Lv, Nu)

    Tpe1 = ((Mp * Cp_P * Tpe00) + (2 * S * dt * ((hvamb * Tamb) + (hcp * Tpi0))))
/ (Mp * Cp_P + (2 * S * dt * (hvamb + hcp)))

    Tpi1 = ((Mp * Cp_P * Tpi00) + (2 * S * dt * ((hcp * Tpe1) + (hvap * Tair)))) /
(Mp * Cp_P + (2 * S * dt * (hvap + hcp)))

    Td1 = ((Md * CpD * Td00) + (Sd * dt * hvad * Tair)) / (Md * CpD + (Sd * dt *
hvad))

    Tbrede1 = ((Mbrede * CpB * Tbrede00) + (SB * dt * ((hvatbrede * Tair) - Qv))) /
((Mbrede * CpB) + (SB * dt * hvatbrede))

    ECPE = Abs(Tpe1 - Tpe0)
    ECPI = Abs(Tpi1 - Tpi0)
    ECDAL = Abs(Td1 - Td0)
    ECDBREDE = Abs(Tbrede1 - Tbrede0)

    If ECPE < eps Then
        If ECPI < eps Then
            If ECDAL < eps Then
                If ECDBREDE < eps Then
                    Tpe00 = Tpe1
                    Tpi0 = Tpi1
                    Tpi00 = Tpi1
                    Td00 = Td1

```

$$T_{brede00} = T_{brede1}$$

Else

$$T_{pe00} = (AL * T_{pe1}) + ((1 - AL) * T_{pe0})$$

$$T_{pi00} = (AL * T_{pi1}) + ((1 - AL) * T_{pi0})$$

$$T_{d00} = (AL * T_{d1}) + ((1 - AL) * T_{d0})$$

$$T_{brede00} = (AL * T_{brede1}) + ((1 - AL) * T_{brede0})$$

End If

Else

$$T_{pe00} = (AL * T_{pe1}) + ((1 - AL) * T_{pe0})$$

$$T_{pi00} = (AL * T_{pi1}) + ((1 - AL) * T_{pi0})$$

$$T_{d00} = (AL * T_{d1}) + ((1 - AL) * T_{d0})$$

$$T_{brede00} = (AL * T_{brede1}) + ((1 - AL) * T_{brede0})$$

End If

Else

$$T_{pe00} = (AL * T_{pe1}) + ((1 - AL) * T_{pe0})$$

$$T_{pi00} = (AL * T_{pi1}) + ((1 - AL) * T_{pi0})$$

$$T_{d00} = (AL * T_{d1}) + ((1 - AL) * T_{d0})$$

$$T_{brede00} = (AL * T_{brede1}) + ((1 - AL) * T_{brede0})$$

End If

Else

$$T_{pe00} = (AL * T_{pe1}) + ((1 - AL) * T_{pe0})$$

$$T_{pi00} = (AL * T_{pi1}) + ((1 - AL) * T_{pi0})$$

$$T_{d00} = (AL * T_{d1}) + ((1 - AL) * T_{d0})$$

$$T_{brede00} = (AL * T_{brede1}) + ((1 - AL) * T_{brede0})$$

End If

$$T_{air_S} = T_{air} + ((S * h_{vap} * (T_{pi1} - T_{air})) + (S_d * h_{vad} * (T_{d1} - T_{air})) + (S_B * h_{vatbrede} * (T_{brede1} - T_{air}))) / (debit * C_{pa})$$

===== Calcul Masse Evaporée =====

$$M_{evap} = Q_m * duree * S_B$$

===== Calcul Humidité absolu du Brède =====

$$M_{brede} = M_{brede} - M_{evap}$$

$$HA = (M_{brede} / M_s) - 1$$

===== Calcul énergie utile pour l'évaporation=====

$$Q_t = Q_v * SB * 360 + Q_t$$

===== Calcul énergie perdue par l'air=====

$$Q_{air} = (- \text{débit} * C_p * (T_{air_S} - T_{air})) + Q_{air}$$

===== Calcul énergie utile pour l'évaporation =====

$$\text{energvap} = Q_t / \text{durée}$$

ANNEXE 2 : NOTION SUR L'AIR HUMIDE

On appelle AIR HUMIDE un mélange d'air sec et de vapeur d'eau (exemple : l'air atmosphérique dans lequel nous vivons).

Cet air humide et ses composants, au cours de ses évolutions se comportent très sensiblement comme un gaz parfait et comme tout mélange on a :

$$P = P_a + P_v \quad (P = \sum P_i) \text{ avec } P : \text{pression de l'air humide}$$

P_a : pression de l'air sec

P_v : pression de la vapeur d'eau.

I – Définition :

A une pression et une température données, il correspond une infinité de variétés d'air humide, définies chacune par sa teneur en vapeur d'eau. Ainsi une variété d'air humide se situe entre les deux cas extrêmes : l'air sec et l'air saturé qui renferme la quantité maximale de vapeur d'eau qu'il lui est possible de contenir dans les conditions de température et de pression où il se trouve.

Dans un air humide quelconque, la vapeur d'eau se trouve à l'état surchauffé et dans l'air saturé elle est à l'état de vapeur saturante.

- Humidité relative ou degré hygrométrique :

L'**humidité relative** ϕ est le rapport : $\phi = \frac{m_v}{m_{vs}}$

où m_v : la masse de vapeur d'eau contenue dans l'air humide de volume V

m_{vs} : la masse de vapeur d'eau que peut contenir ce même volume V à la même température s'il est saturé.

$$\text{On a : } \left. \begin{array}{l} P_v \cdot V = m_v \cdot r_v \cdot T \\ P_{vs} \cdot V = m_{vs} \cdot r_{vs} \cdot T \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{P_v}{P_{vs}} = \frac{m_v}{m_{vs}} \cdot \frac{r_v}{r_{vs}} \quad \text{comme } r = \frac{R}{M} \Rightarrow \frac{r_v}{r_{vs}} = \frac{M_{vs}}{M_v} \text{ or}$$

$$M_v \approx M_{vs}$$

$$\text{Donc } \phi = \frac{m_v}{m_{vs}} = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad \text{où } P_{vs} : \text{la pression de la vapeur d'eau à l'état saturé.}$$

$$\text{Pour l'air saturé } P_v = P_{vs} \Rightarrow \phi = 1$$

Pour l'air sec $P_v = 0 \Rightarrow \phi = 0$, alors
 $0 \leq \phi \leq 1$ où $0 \% \leq \phi \leq 100 \%$

- **Humidité absolue ou teneur en vapeur d'eau :**

On appelle **humidité absolue** le rapport : $\omega = \frac{m_v}{m_a}$

Où : m_v : la masse de vapeur d'eau contenue dans l'air humide

m_a : La masse d'air sec contenue dans le même air humide.

Généralement, dans la pratique, on considère l'humidité absolue relativement à $m_a = 1$ kg d'air sec.

- **Taux de saturation :**

C'est le rapport $\psi = \frac{\omega}{\omega_s}$ où

ω : l'humidité absolue de l'air humide considérée,

ω_s : L'humidité absolue de l'air saturé à la même température.

De même pour l'air sec : $\omega = 0$ et pour l'air saturé $\omega = 1$.

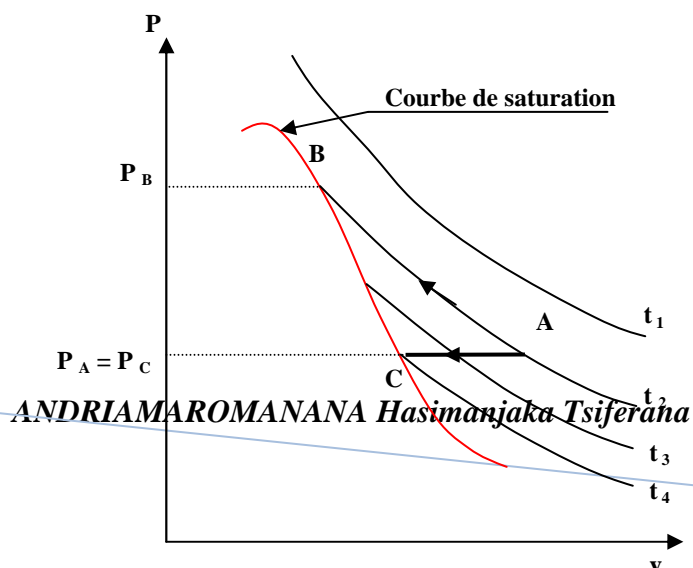
II. Influence de la température et de la pression.

Lorsqu'on fait varier, à température constante, la pression P d'un air humide, les pressions partielles P_a et P_v des deux constituants varient dans la même proportion que la pression totale P , mais alors que la pression P_a de l'air peut prendre toutes les valeurs possibles, la pression P_v de la vapeur d'eau ne peut dépasser la valeur P_{vs} (pression de saturation) à la température considérée. [On suppose bien entendu que la température est supérieure à la température critique de l'air ($\sim 140^\circ\text{C}$) au dessus de laquelle aucune liquéfaction n'est possible pour l'air quelque soit sa pression].

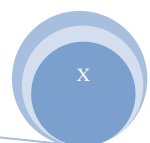
Une augmentation continue de la pression, à température constante, amènera donc à

un moment donné la condensation d'une partie de la vapeur d'eau ($\phi = 1$) correspondant à l'état saturé.

La conclusion est la même si on fait varier la température à pression constante.



ANDRIAMAROMANANA Hasimanjaka Tsiferana



AB : Augmentation de pression à température constante t_2 :

$$\text{En A : } \phi_A = \frac{P_v}{P_{vs}} = \frac{P_A}{P_B}$$

$$\text{En B : } \phi_B = 1 \quad \text{car } P_{vs} = P_B \text{ à } t_2.$$

AC : Refroidissement à pression constante P_A :

En diminuant la température de l'air humide de t_2 à t_4 , à pression constante $P_A = P_C$, on atteint la courbe de saturation et l'air est saturé ($\phi_C = 1$ à t_4).

La température à laquelle un air humide arrive à la saturation porte le nom de **point de rosée** (température de rosée) où il y a début de condensation. Ainsi l'humidité absolue reste constante tant qu'il n'y a pas de condensation.

III. Relations entre ϕ , ω et ψ :

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad \text{et} \Rightarrow \quad \omega = 0,622 \frac{P_v}{P_a} = 0,622 \frac{P_v}{P - P_v}$$

$$\left. \begin{array}{l} P_v \cdot V = m_v \cdot r_v \cdot T \\ P_a \cdot V = m_a \cdot r_a \cdot T \end{array} \right\} \Rightarrow \omega = \frac{P_v}{P_a} \cdot \frac{r_a}{r_v} \quad \text{or} \quad \frac{r_a}{r_v} = \frac{M_v}{M_a} = \frac{18,02}{28,97} = 0,622$$

► Si ϕ donnée :

$$\phi = \frac{P_v}{P_{vs}} \Rightarrow P_v = \phi P_{vs} \Rightarrow \omega = 0,622 \frac{\phi P_{vs}}{P - \phi P_{vs}} \quad \text{et} \quad \omega_s = 0,622 \frac{P_{vs}}{P - P_{vs}} \quad (\phi = 1)$$

$$\psi = \frac{\omega}{\omega_s} \Rightarrow \psi = \phi \frac{P - P_{vs}}{P - \phi P_{vs}}$$

► Si ω donnée :

$$\phi = \frac{\omega P}{(\omega + 0,622) P_{vs}} \quad \text{et} \quad \psi = \omega \frac{P - P_{vs}}{0,622 P_{vs}}$$

► Si ψ donnée :

$$\phi = \frac{\psi P}{P - (1 - \psi) P_{vs}} \quad \text{et} \quad \omega = \psi \frac{0,622 P_{vs}}{P - P_{vs}}$$

IV. Enthalpie de l'air humide :

L'enthalpie totale H de l'unité d'air humide à t °C est : $H = H_a + H_v$ avec :

H_a : enthalpie du kilogramme d'air sec

et H_v : enthalpie de la masse ω ($m_v = \omega$ si $m_a = 1$ kg).

$$H_a = C_{p_a} \cdot t \quad \text{avec} \quad C_{p_a} = 0,24 \text{ kcal / kg} \cdot \text{degré} = \text{Constante}$$

$$H_v = (L_v + C_{p_v} \cdot t) \omega \quad \text{avec } L_v = 595 \text{ kcal/kg} \text{ et } C_{p_v} = 0,46 \text{ kcal / kg} \cdot \text{degré}$$

L_v : chaleur latente de vaporisation $C_{p_v} \cdot t$: chaleur de surchauffe

$$\text{D'où} \quad \mathbf{H = 595 \omega + (0,24 + 0,46 \omega) t}$$

Il existe des diagrammes donnant les valeurs de H en fonction de ω et t (diagramme de l'air humide). On les trace généralement avec $P = 1 \text{ atm}$.

ANNEXE 3 : CARACTERISTIQUE GENERALE DU RAYONNEMENT SOLAIRE

I. DETERMINATION DE LA POSITION DU SOLEIL :

Pour repérer la position du soleil dans le ciel, on utilise fréquemment deux systèmes de coordonnées :

- système de coordonnées azimutales (ou locales)
- système de coordonnées horaires.

I-1 Système de coordonnées azimutales :

Ce système est défini par le trièdre inverse $((O\bar{x}, O\bar{y}, O\bar{z}))$

O : un point de la surface de la terre,

$O\bar{x}$: Axe orienté vers le sud,

$O\bar{y}$: Axe orienté vers l'ouest,

$O\bar{z}$: Axe orienté vers le haut (la verticale du lieu)

La sphère de centre O, de rayon arbitraire, appelé sphère céleste, est coupé par l'axe $O\bar{z}$ en 2 points : le Zénith (positif) et le Nadir (négatif). On repère la direction $O\bar{s}$ du soleil par 2 angles :

- h : hauteur du soleil au dessus de l'horizon, mesurée à partir du plan de l'horizon vers le centre du soleil,
- α : l'azimut : angle entre la projection $O\bar{s}^{\perp}$ de $O\bar{s}$ sur le plan de l'horizon et $O\bar{x}$ la direction Sud.

α est compté positivement vers l'Ouest et négativement vers l'Est (figure 1)

On peut aussi utiliser l'angle z appelé distance zénithale définie par $z = \frac{\pi}{2} - h$

I-2 Système de coordonnées horaires :

De même, ce système est défini par le trièdre inverse (Ox', Oy', Oz') avec :

Oz' : orienté vers le pôle Nord

Oy' : orienté vers l'Ouest

Ox' : perpendiculaire à Oz' et dans le plan (Ox, Oz)

Dans ce système, on repère le soleil par :

- δ : déclinaison : angle entre la direction terre-soleil et le plan équatoriale. Elle varie de $-23^{\circ}27'$ (le 22 décembre) à $23^{\circ}27'$ (le 22 juin) et nulles aux

équinoxes. En première approximation, on a : $\sin \delta = 23,45 \sin (360(284 + J)/365)$ J : n° du jour dans l'année

Ou $\delta = 23,45 \sin JD$ avec $JD = (n - 81) \frac{360}{365}$ et n : numéro du jour dans l'année

ou $\delta = 23,45 \cos(30m - n - 202)$

m : numéro du mois dans l'année

n : numéro du jour dans l'année.

- ω : angle horaire : mesuré entre le plan (Oz', Os) et le plan (Oz', Ox) (figure 2)

$\omega < 0$ le matin (de l'Est vers le Zénith)

$\omega > 0$ l'après-midi (du Zénith vers l'Ouest)

On peut exprimer ω en heure, à midi $\omega = 0$ et chaque heure correspond à une variation de 15° étant donné que la terre fait un tour complet (360°) en 24 heures, d'où

$$\omega = (TSV - 12) \cdot 15$$

TSV : le temps solaire vrai. Donc, on peut déterminer la position du soleil en un lieu donné de la terre et à un instant donné par les formules suivantes :

$$\begin{aligned} \delta &= 23,45 \sin (360(284 + J) / 365) \\ \text{ou } \delta &= 23,45 \sin JD \quad \text{avec } JD = (n - 81) \frac{360}{365} \\ \omega &= (TSV - 12) \cdot 15 \\ \sin h &= \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta \\ \sin \alpha &= \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos h} \quad \varphi : \text{latitude du lieu : } \varphi > 0 \text{ pour l'hémisphère Nord} \\ &\quad \varphi < 0 \text{ pour l'hémisphère Sud} \end{aligned}$$

I-3 Problème du temps :

Dans la pratique, on connaît généralement le temps légal TL en un lieu donné, au lieu du temps solaire vrai TSV. Alors, pour pouvoir calculer la hauteur du soleil h ou l'azimut α , on doit trouver une relation liant l'angle horaire (ou le temps solaire vrai et le temps légal).

a) Temps solaire vrai :

$$\omega = (TSV - 12) \cdot 15 \quad \text{d'où} \quad TSV = 12 + \frac{\omega}{15}$$

b) Temps solaire moyen et la correction du temps :

La durée du jour n'est pas uniforme au cours de l'année. Ces irrégularités se cumulent et perturbent l'échelle du temps. Elles sont dues d'une part à la rotation de la terre sur elle-même et d'autre part du fait que l'orbite de la terre est elliptique autour du soleil. Ainsi, on définit un temps solaire moyen TSM qui est uniforme, tel que :

$$TSV = TSM + ET$$

ET est la correction du temps. Cette correction varie au cours de l'année de - 14 mn à 16 mn, elle peut être calculée par la formule approchée :

$$ET = 2.10^{-4} + 7,3509 \sin(\varpi. JD) - 0.4197 \cos(\varpi. JD) + 9,3912 \sin(2. \varpi. JD) + 3,2265 \cos(2. \varpi. JD) + 0,3361 \sin(3. \varpi. JD) + 0,0903 \cos(3. \varpi. JD) \quad (\text{en mn})$$

JD : n° du jour dans l'année et $\varpi = 2 \pi / 366$

c) Temps universel et la correction du longitude :

Le temps universel TU est le temps solaire moyen du méridien de Greenwich. Et comme deux points de la surface terrestre est séparée par 1° de longitude, voient passer le soleil à leur méridien avec 4 mn de différence, le temps solaire moyen d'un lieu de longitude L est donc :

$$TSM = TU + 4.L \quad (\text{en mn})$$

d) Temps du fuseau horaire :

Un fuseau horaire est une zone comprise à l'intérieur de deux méridiens distants de 15° de longitude. Donc, le fuseau horaire s'étend de part et d'autre d'un méridien, appelé méridien de référence le longitude L_{St} , entre $(L_{St} + 7,5^\circ)$ de longitude Ouest et $(L_{St} - 7,5^\circ)$ de longitude Est.

Le temps du fuseau horaire TFH est le temps solaire moyen du méridien de référence situé au centre du fuseau :

$$TFH = TU + 4. L_{St} \quad (\text{en mn})$$

e) Temps légal :

Le temps légal TL est en général le temps du fuseau horaire mais il peut en différer pour des raisons de commodités, alors on introduit un facteur de correction de temps Δ .

$$TL = TFH + \Delta$$

En France $\Delta = 1 \text{ h}$ en hiver et $\Delta = 2 \text{ h}$ en été. A Madagascar on prend $\Delta = 0$

Ainsi, avec toutes ces relations, on peut exprimer le temps solaire vrai en fonction du temps légal :

$$TSV = TL - \Delta + 4 (L - L_{St})/60 + ET/60 \quad (\text{en heure})$$

f) Lever et Coucher du soleil :

Les heures du lever et du coucher du soleil sont obtenues en faisant $h = 0$ dans l'équation donnant la hauteur du soleil :

$$\begin{aligned}\sin h &= \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta \\ \Rightarrow 0 &= \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega_s + \sin \varphi \cdot \sin \delta \\ \cos \omega_s &= -\frac{\sin \varphi \cdot \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta} = -\tan \varphi \cdot \tan \delta \\ \Rightarrow \omega_s &= \text{Arc cos} (-\tan \varphi \cdot \tan \delta)\end{aligned}$$

II. RAYONNEMENT SOLAIRE :

II.1 Rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère :

Une surface unité placée normalement aux rayons du soleil reçoit en moyenne une puissance :

$I_0 = 1350 \text{ [W/m}^2\text{]}$: la constante solaire

II.2 Rayonnement solaire reçu au sol :

Au cours de la traversée de la masse atmosphérique, le rayonnement solaire subit des atténuations (absorption et diffusion).

Le rayonnement solaire qui atteint le sol, peut se décomposer en deux parties :

- le rayonnement direct : provenant directement du soleil, on appellera I la puissance reçue par unité de surface normale aux rayons
- Le rayonnement diffus : diffusé par les molécules, les poussières, ... Il provient de toute la voûte céleste. On appellera D le rayon reçu par unité de surface horizontale.

Donc, le rayonnement global reçu par une surface horizontale est :

$$\mathbf{G = I \sin h + D}$$

Pour une surface inclinée d'angle β et d'azimut α (angle entre la normale du plan incliné et le plan méridien), l'angle d'incidence θ du rayonnement solaire (sur la surface inclinée) est donné par la relation :

$$\begin{aligned}\cos \theta &= \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \beta - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha \\ &+ \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \omega \cdot \cos \alpha \\ &+ \cos \delta \cdot \sin \alpha \cdot \sin \omega \cdot \sin \beta\end{aligned}$$

Au cours d'une journée, θ est minimum à midi solaire vrai ($\omega = 0$). Donc le rayonnement direct sur le plan incliné est :

$$I_\beta = I \cos \theta = I_h \frac{\cos \theta}{\sin h} \quad \text{Où } I_h = I \cdot \sin h : \text{ le rayonnement direct sur un plan horizontal.}$$

On note R_b le rapport $\frac{\cos \theta}{\sin h}$ d'où $I_\beta = R_b \cdot I_h$

De la même façon que pour le rayonnement direct, le rayonnement diffus peut s'écrire sous la forme :

$$D_\beta = R_{DC} \cdot D$$

Avec D_β : le rayonnement diffus sur un plan incliné d'angle β

R_{DC} : Facteur d'inclinaison

- si le rayonnement diffus est isotrope, on prendra :

$$R_{DC} = \frac{(1 + \cos \beta)}{2}$$

- si le rayonnement diffus est très anisotrope, on prendra :

$$R_{DC} = R_b$$

Un plan incliné reçoit aussi une partie du rayonnement réfléchi du sol, noté $D_{S\beta}$

$$D_{S\beta} = R_{DS} \cdot G$$

Avec R_{DS} : facteur d'inclinaison

- si le ciel est clair : $R_{DS} = 0$
- si le ciel est couvert : $R_{DS} = a \frac{1 - \cos \beta}{2}$, a : albédo du sol. ($a \approx$

0,35)

Finalement le rayonnement total reçu sur plan incliné est :

$$G_\beta = R_b \cdot I_h + R_{DC} \cdot D + R_{DS} \cdot G$$

ANNEXE 4 : METHODE ITERATIVE DE GAUSS SEIDEL

La méthode itérative de GAUSS SEIDEL est parmi l'un des méthodes implicites existantes dans le calcul numérique.

Lorsque nous devons résoudre un système d'équation représenté sous la forme :

$$A * T = Y$$

A : Matrice diagonale strictement dominante : $a(i, j)$; $i=j= 1 \dots M$

T : une sorte de tableau qui contiendra à chaque pas de temps les composantes des vecteurs de la méthode itérative, et donc après convergence les valeurs de l'approximation de la solution.

Y : regroupe tous les constantes relatives à chaque $T_i = y(i)$

m : rang de la matrice

La méthode de Gauss SEIDEL consiste à prendre T_0 quelconque puis définir une suite de valeur $T(k)$ par la formule suivante :

$$T_i(k+1) = -\sum_{j=1}^{i-1} a(i,j) * \frac{T_j(k+1)}{a(i,j)} - \sum_{j=i+1}^m a(i,j) * \frac{T_j(k)}{a(i,j)} + \frac{Y(i)}{a(i,i)}$$

Tels que :

- Dans le premier terme $j = 1$ à $(i-1)$
- Dans le deuxième terme $j = (i+1)$ à m

Nous arrêtons les itérations lorsque

$$\sum |T_i(k+1) - T_i(k)| \leq \epsilon$$

Remarque : on prend comme valeur initiale de chaque processus itératif à la résolution du système, les valeurs obtenues précédentes.

ANDRIAMAROMANANA Hasimanjaka Tsiferana

Lot I 7 bis Sabotsy Namehana Tana 103

Tel: 032 47 464 56 / 034 46 511 03

***« ETUDE ET CONCEPTION D'UN MINI SECHOIR ELECTRIQUE "POUR LA MODELISATION D'UN SECHOIR SOLAIRE
INDIRECT POUR LE BREDE »***

RESUME

Le séchage est une des opérations de transformation d'un produit. Cette opération dépend de l'humidité et de la température de l'air, et de l'activité de l'eau dans le produit.

Il existe plusieurs types et modes de séchage et- beaucoup de produits peuvent y être séchés. Mais le présent mémoire s'agit d'une modélisation d'un séchoir solaire indirect pour le chou de chine. Ce travail est établi grâce à la maîtrise et à la détermination de la courbe de l'isotherme de sorption et de la simulation informatique. Cependant, il faut mettre en valeur l'analyse économique pour une bonne nécessité à l'accomplissement du travail. Ce dernier et en même temps une étude et aussi un projet consistant à la réalisation d'un séchoir solaire indirect et comme tout autres projets, l'étude d'impacts environnementaux est une étape importante afin de rendre ledit projet plus respectueux et rigoureux.

Mots clés : séchoir électrique ; séchoir solaire, isotherme de sorption, humidité relatif, humidité absolue

ABSTRACT

Drying is one operation which transforms product. This process depends on the wetness and temperature of the air, and work's action in the product as well.

There are many drying's modes and types and lot of products can be dried. But the purpose of this project is the modeling of an indirect solar drier for green vegetables. This work is done by the mastering and determining the curve of isotherm of sorption and the informatics simulation.

However, we should emphasize the economic analysis in order to improve the quality of the work. That analysis is at the sometime a study and the project which consist to realize an indirect solar drier, and like for the other projects, the study of environmental issues is an important step in order to accomplish a rigorous and respectful project.

Key words: electrical drier, solar drier, isotherm of sorption, relative and absolute wetness.

Directeur de mémoire: Monsieur RANARIJAONA Jean Désiré