



UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO
ÉCOLE SUPÉRIEURE
POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO
Mention : GENIE ELECTRIQUE



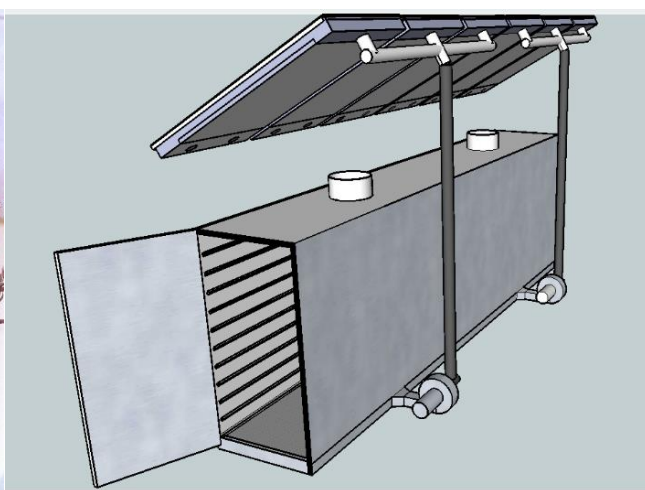
Parcours : Machines électriques, Energie renouvelables et Réseaux d'énergie

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme

MASTER 2 EN GÉNIE ELECTRIQUE

Grade Ingénieur

CONTRIBUTION A LA CONCÉPTION ET RÉALISATION
D'UN SÉCHOIR SOLAIRE POUR PLANTES MEDICINALES
DROSELA RAMANTACEA ET CENTELLA ASIATICA



Présenté par :

ANDRIATSITOHAINA Hervé Landry

Directeurs de mémoire :

Docteur RAKOTONIAINA Solofo Hery

Maitre de conférences à l'ESPA

Docteur RASOANAIVO Jean Luc

Maitre de recherche au CNRIT

Soutenu le 05 Décembre 2016

Promotion 2015



**UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO
ÉCOLE SUPÉRIEURE POLYTECHNIQUE
D'ANTANANARIVO
Mention : GENIE ELECTRIQUE**



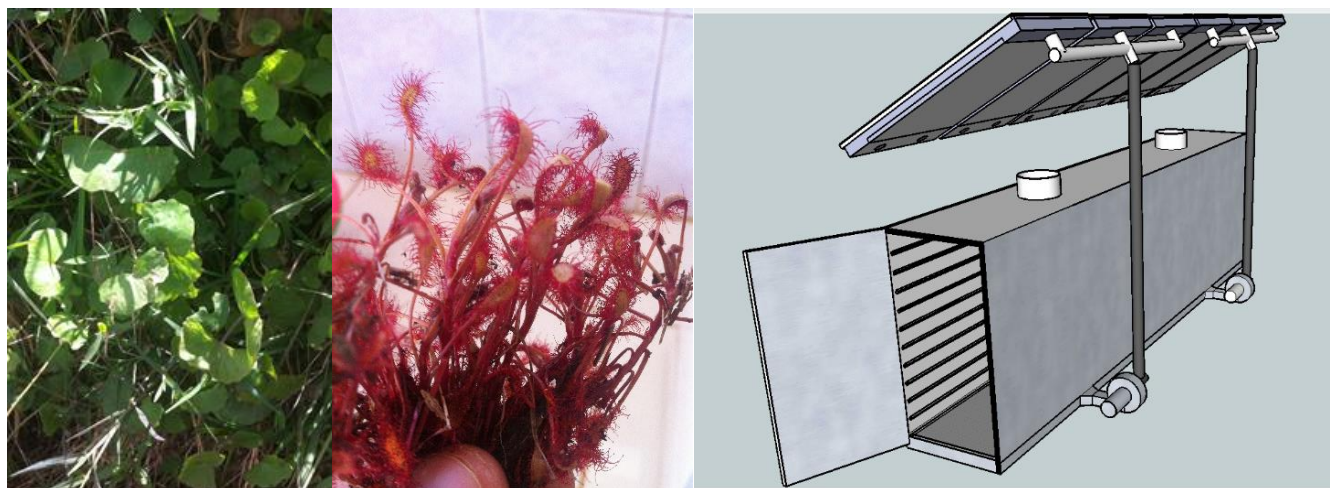
Parcours : Machines électriques, Energie renouvelables et Réseaux d'énergie

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme

MASTER 2 EN GÉNIE ELECTRIQUE

Grade Ingénieur

**CONTRIBUTION A LA CONCÉPTION ET RÉALISATION
D'UN SÉCHOIR SOLAIRE POUR PLANTES MEDICINALES
DROSELA RAMANTACEA ET CENTELLA ASIATICA**



Présenté par : ANDRIATSITOHAINA Hervé Landry

Devant les membres du jury :

Président du jury :

- ✓ Docteur RAMAROZATOVO Vonjy, Maitre de conférences à l'ESPA

Directeurs de mémoire :

- ✓ Docteur RAKOTONIAINA Solofo Hery, Maitre de conférences à l'ESPA
- ✓ Docteur RASOANAIVO Jean Luc, Maitre de recherche au CNRIT

Examineurs :

- ✓ Docteur RANARIJAONA Jean Désiré, Maitre de conférences à l'ESPA
- ✓ Docteur RANDRIANARIVAO Dannel, Maitre de conférences à l'ESPA
- ✓ RAKOTONINDRIANA Tahiry, Enseignant chercheur à l'ESPA

REMERCIEMENTS

Je rends grâce à Dieu tout puissant qui m'a accompagné durant la réalisation de ce projet. Et je Lui exprime mes remerciements et mes louanges.

J'adresse mes remerciements à Monsieur le Professeur **ANDRIANAHARISON Yvon**, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo de m'avoir accueilli dans son école pour effectuer mes études.

Je tiens à exprimer mes profondes gratitude à Monsieur **RAMAROZATOVO Vonjy**, Maître de conférences, chef de la Mention Génie Electrique de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, de m'avoir autorisé à soutenir ce mémoire et d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à :

Monsieur **RAKOTONIAINA Solofo Hery**, Maître de conférences, mon encadreur pédagogique, qui a dirigé mon mémoire avec rigueur et passion pour le sujet et m'a permis de réaliser ce travail.

Monsieur **RASOANAIVO Jean Luc**, Maître de recherche au CNRIT, mon encadreur professionnel, de m'avoir proposé ce sujet, pour sa disponibilité, sa patience et son assistance tout au long de ce travail.

Mes vifs remerciements s'adressent également à :

- ✓ Monsieur **RANARIJAONA Jean Désiré**, Maître de conférences à l'ESPA
- ✓ Monsieur **RANDRIANARIVAO Dannel**, Maître de conférences à l'ESPA
- ✓ Monsieur **RAKOTONINDRIANA Tahiry**, Enseignant chercheur à l'ESPA

Pour l'intérêt qu'ils ont accordé à ce mémoire et d'avoir accepté de me faire l'honneur d'examiner et de juger ce travail.

Je suis particulièrement redevable à tous les enseignants de l'ESPA, particulièrement, ceux de la mention Génie Electrique, pour toutes les connaissances qu'ils m'ont transmis durant mes années d'études à l'ESPA.

Je suis vivement reconnaissant à Monsieur **RAKOTOJAONA Andrianasolo Nirina**, Gérant de la société PRONAMA.

Toute ma reconnaissance à ma famille, pour l'encouragement et leur soutien moral et financier durant mon parcours à l'université.

Sans oublier les amis et toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin pour la réalisation ce travail.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
TABLE DES MATIERES	i
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES.....	viii
NOMENCLATURE.....	x
LISTES DES ABREVIATIONS	xiii
INTRODUCTION	1
Partie I : ETAT DE L'ART	3
CHAPITRE I. CONTEXTE GENERAL DU PROJET.....	4
1 HISTORIQUE	4
2 JUSTIFICATION.....	4
3 OBJECTIFS DE L'ETUDE ET RESULTATS ATTENDUS.....	5
3.1 Objectif général.....	5
3.2 Objectifs spécifiques.....	5
3.3 Résultats attendus.....	5
4 ENVIRONNEMENT DU PROJET	6
4.1 Le marché des plantes médicinales et aromatiques	6
4.2 Contexte politique	6
4.3 Contexte social.....	6
4.4 Les enjeux du séchage normalisé.....	7
CHAPITRE II. GENERALITES SUR LE SECHAGE.....	8
1 DEFINITION	8
1.1 Séchage naturel	8
1.2 Séchage artificiel.....	9
2 LES DIFFERENTS TYPES DES SECHOIRS SOLAIRES [6]	9
2.1 Les séchoirs naturels	9
2.2 Les séchoirs solaires directs.....	10
2.3 Les séchoirs solaires indirects.....	10
3 HUMIDITE DES SOLIDES	10
3.1 Type de liaison de l'eau	10
3.1.1 Eau combinée chimiquement.....	11
3.1.2 L'eau absorbée.....	11
3.1.3 L'eau osmotique	11

3.1.4	L'eau libre.....	11
3.2	Grandeurs physiques	11
3.2.1	L'humidité relative HR (ou humidité sur base humide ou titre en eau)	12
3.2.2	L'humidité absolue HA (ou humidité sur base sèche ou taux d'humidité)	12
3.2.3	Le taux de matière sèche : Tms est défini par le rapport	12
3.3	L'activité de l'eau	12
3.3.1	Définition.....	13
3.3.2	Mise en évidence de l'activité de l'eau.....	13
3.3.3	Importance de la détermination de l'activité de l'eau	14
3.4	Isothermes d'adsorption-désorption.....	15
3.5	Modèle numérique des courbes d'équilibre	16
3.6	Courbe de séchage	16
Partie II	METHODOLOGIE.....	18
	CHAPITRE III. MODELE MATHEMATIQUE DES PRINCIPAUX ELEMENTS DU SECHOIR	19
1	MODELE DE L'INSOLATEUR	19
1.1	Hypothèses de base du modèle	19
1.1.1	Hypothèses générales.....	19
1.1.2	Méthodologie	19
1.1.3	Hypothèses simplificatrices	21
1.2	Les échanges thermiques	21
1.2.1	Des échanges par convection avec les coefficients d'échanges suivant :.....	22
1.2.2	Des échanges par rayonnement avec les coefficients d'échanges suivant :	22
1.2.3	Des échanges par conduction avec les coefficients d'échanges suivant :	23
1.3	Les coefficients d'échanges thermiques	23
1.3.1	Convection.....	23
1.3.2	Conduction.....	25
1.3.3	Rayonnement	25
1.4	Equations de transfert.....	27
2	MODELISATION DE L'ARMOIRE DE SECHAGE	29
2.1	Hypothèses simplificatrices	29
2.2	Les échanges thermiques et massiques dans l'armoire de séchage	30
2.3	Echanges et coefficients d'échanges thermiques	31
2.3.1	Convection.....	31
2.3.2	Conduction.....	32
2.3.3	Rayonnement	33
2.4	Echanges massiques	33

2.5	Expression de la vitesse de séchage	33
2.6	Equations de fonctionnement.....	34
CHAPITRE IV. DESCRIPTION DU SECHOIR.....		37
1	VUE D'ENSEMBLE ET SCHEMA DE PRINCIPE DU SECHOIR CONSTRUIT	37
2	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	38
2.1	L'unité de production d'air chaud.....	39
2.1.1	Description.....	39
2.1.2	Fonctionnement	39
2.2	L'unité de séchage	40
2.2.1	Description.....	40
2.2.2	Fonctionnement	42
2.3	Le système de ventilation.....	42
CHAPITRE V. LES ETAPES DE LA REALISATION D U SECHOIR		43
1	LES MATERIAUX UTILISES ET LE MODE D'ASSEMBLAGE	43
1.1	Les Capteurs solaire	43
1.2	L'armoire de séchage	43
1.3	Les claies.....	43
1.4	Le système de ventilation.....	43
1.5	Mode d'assemblage.....	43
1.5.1	Capteur solaire	43
1.5.2	Armoire de séchage et claies	44
1.5.3	Système de ventilation.....	45
2	SYSTEME DE VENTILLATION :	46
2.1	Débit d'air nécessaire au séchage :	46
2.2	Perte de charge :.....	46
2.2.1	Perte de charge régulière :	46
2.2.2	Perte de charge singulière ou perte de charge dans les pièces de formes :	47
2.2.3	Les pertes de charges totales dans les conduites :	48
2.3	Choix de ventilateur :	48
2.3.1	Nombre d'aubes.....	49
2.3.2	Volute	50
2.4	Choix du moteur :	51
Outre les caractéristiques du ventilateur, le moteur a été choisi selon les critères suivants : .		52
2.4.1	Mode de fonctionnement :	52
2.4.2	Position du moteur	52
2.4.3	Indice de protection	52
3	INSTALLATIONS ET EQUIPEMENTS ELECTRIQUES	52

3.1	Commandes électriques [53].....	53
3.1.1	Les boutons	53
3.1.2	Bornier	53
3.1.3	Disjoncteur interrupteur	53
3.1.4	Disjoncteur de distribution	54
3.1.5	Disjoncteur moteur	54
3.1.6	Relais thermique	55
3.1.7	Lampes et voyants	55
3.1.8	Régulateur de température	56
3.2	Résistance électriques d'appoint	56
CHAPITRE VI. EXPERIMENTATION DU SECHOIR		57
1	CARACTERISTIQUES DES PRODUITS EXPERIMENTES	57
1.1	Le Drosera Ramentacea (Matanando).....	57
1.1.1	Caractères botaniques	57
1.1.2	Utilisation et vertu	58
1.2	Le Centella Asiatica(Talapetraka)	58
1.2.1	Caractères botaniques	58
1.2.2	Caractéristiques physico-chimiques [4].....	59
1.2.3	Utilisation et vertus.....	60
1.3	CHOIX ET PREPARATION DES PRODUITS	60
1.3.1	Prétraitements avant séchage	60
1.3.2	Conditionnement, emballage et stockage	61
1.4	LA CONDUITE DES MESURES	62
1.4.1	Mesure des températures et vitesse de l'air	62
1.4.2	Mesure des humidités	64
Partie III : RESULTAT ET DISCUSSION		66
CHAPITRE VII. RESULTATS DES ESSAIS DE SECHAGES ANALYSES ET COMMENTAIRES		67
1	TEMPERATURE DE L'AIR A LA SORTIE DU CAPTEUR.....	67
2	VARIATION DE LA MASSE ET HUMIDITÉ DES PRODUITS AU COURS DU SÉCHAGE.....	68
2.1	Drosera	68
2.1.1	Drosera Frais.....	68
2.2	Drosera pré séché	69
2.3	Centella Asiatica	71
2.3.1	Centella Asiatica frais.....	71
2.3.2	Centella Asiatica pré séché	73
2.4	Commentaires	74

2.5	Etablissement des courbes de séchage	75
CHAPITRE VIII. INGENIERIE ET TECHNOLOGIE		76
1	CHOIX DE L'EMPLACEMENT DE L'UNITE	76
2	LES MATERIELS ET EQUIPEMENT DE L'UNITE	76
2.1	Matériels et outillages	76
2.2	Organisation des activités de l'usine.....	77
2.2.1	La production.....	77
2.2.2	La collecte des matières premières	77
2.2.3	Estimation d'approvisionnement en matière première et de production	77
2.2.4	Ligne de production	77
3.1	Investissements d'immobilisation.....	79
3.2	Charges salariales (en Ariary).....	82
3.3	Les chiffres d'affaires prévisionnels	83
3.3.1	Tableau de production	83
3.3.2	Tableau des chiffres d'affaire	84
3.4	Charges d'exploitation	85
3.5	Le Fonds de Roulement Initial (FRI), Investissement (Io)	87
3.5.1	Fonds de roulement initial	87
3.5.3	Plan de financement.....	87
3.6	Remboursement d'emprunt.....	88
3.6.1	Calcul d'annuité.....	88
3.6.2	Remboursement d'emprunt	88
3.7	Compte des résultats	89
3.7.1	Compte de résultat par nature pendant 5 années d'exercice (en Ariary).....	89
3.7.2	Compte de résultat par fonction : (en Ariary).....	91
3.8	Budget de trésorerie	92
3.9	Evaluation de la rentabilité d'un projet d'investissement.....	93
3.10	Valeur actualisée nette (VAN).....	93
3.10.1	Le principe d'actualisation	93
3.10.2	Le flux net de trésorerie (FNT).....	94
3.10.3	calcul de la VAN	94
3.11	Taux de rentabilité interne (TRI)	95
3.12	Délai de récupération	96
CONCLUSION.....		97
BIBLIOGRAPHIE		99
ANNEXES A		
1	CARACTERISTIQUES DES APPAREILS UTILILSES :	B

1.1	Evaluation de la consommation énergétique journalière E_i	B
1.2	Evaluation de tension et de la puissance du système	C
1.3	Calcul du nombre de modules.....	D
1.4	Evaluation de la capacité réelle.....	E
1.5	Choix du régulateur.....	F
1.6	Inclinaison et orientation des modules photovoltaïques	G
1.7	Module by-pass	G
2	DESSIN DE L'ARMOIRE DE SECHAGE.....	H
RESUME		I
ABSTRACT		I

LISTE DES TABLEAUX

Tableau N°1:	Correspondances grandeur thermodynamiques et grandeur électriques [2]	20
Tableau N°2:	Caractéristique de la volute	51
Tableau N°3:	Caractéristique du moteur [5]	52
Tableau N°4:	Caractéristiques du résistance à ailettes	56
Tableau N°5:	Répartition annuelle des saisons de récoltes des produits expérimentés	60
Tableau N°6:	Variation de la température de l'air à la sortie du capteur (la journée)	67
Tableau N°7:	Variation de la masse et de l'humidité relative du drosera frais	68
Tableau N°8:	Variation de la masse et de l'humidité relative du drosera pré séché	69
Tableau N°9:	Comparaison variation humidité du drosera frais et drosera pré-séché	71
Tableau N°10:	Variation de la masse et de l'humidité relative du Centella Asiatica frais	71
Tableau N°11:	Variation de la masse et de l'humidité relative du Centella Asiatica pré séché	73
Tableau N°12:	Matériels et outillages	76
Tableau N°13:	Les matériels administratifs et financiers.....	76
Tableau N°14:	Quantité prévisionnelle de Drosera traités par an	77
Tableau N°15:	Quantité prévisionnelle de Centella traitées par an.....	77
Tableau N°16:	Tableau des investissements d'immobilisation : (en Ariary).....	80
Tableau N°17:	Renouvellement des matériels informatiques et du logiciel (en Ariary)	80
Tableau N°18:	Tableau d'amortissements des immobilisations (en Ariary).....	81
Tableau N°19:	Charges salariales.....	82
Tableau N°20:	Tableau de production du drosera	83
Tableau N°21:	Tableau de production du Centella	83
Tableau N°22:	Chiffre d'affaire réalisée avec le drosera	84
Tableau N°23:	Chiffre d'affaire réalisée avec le centella	84
Tableau N°24:	Charges d'exploitation (en Ariary)	85
Tableau N°25:	Plan de financement	87
Tableau N°26:	Remboursement d'emprunt.....	88
Tableau N°27:	Compte de résultat par nature pendant 5 années d'exercice (en Ariary)	89
Tableau N°28:	Compte de résultat par fonction : (en Ariary)	91
Tableau N°29:	Budget de trésorerie	92
Tableau N°30:	Tableau du flux net de trésorerie (en Ariary).....	94
Tableau N°31:	Tableau du flux net de trésorerie actualisé (en Ariary) avec $i=16\%$	94

LISTE DES FIGURES

Figure N° 1: Représentation schématique du processus de séchage.....	8
Figure N° 2: Activité de l'eau	14
Figure N° 3: Isotherme de désorption	16
Figure N° 4: Allure générale des courbes de séchage.....	17
Figure N° 5: Représentation schématique des transferts thermiques dans une section de l'insolateur [21]	21
Figure N° 6: Schéma électrique équivalent relatif aux transferts thermiques dans une tranche de l'insolateur [2]	28
Figure N° 7: Les échanges thermiques dans une tranche de séchoir	30
Figure N° 8: Schéma électrique équivalent relatif aux transferts thermiques dans une tranche de séchoir	35
Figure N° 9: Vue d'ensemble du séchoir	38
Figure N° 10: Vue schématique de l'insolateur	40
Figure N° 11: Vue de profil de l'insolateur	40
Figure N° 12: Armoire de séchage.....	42
Figure N° 13: Les capteurs solaires chez PRONAMA	44
Figure N° 14: L'armoire de séchage et les claies chez PRONAMA	44
Figure N° 15: Le ventilateur centrifuge et moteur utilisés dans notre installation	45
.....	45
Figure N° 16: Les conduites de ventilati.....	45
Figure N° 17: Le collecteur d'air chaud à la sortie des capteurs	45
Figure N° 18: Valeurs du coefficient de perte de charge K [1].....	47
Figure N° 19: Perte de charge en fonction de la vitesse [1].....	48
Figure N° 20: Triangle de vitesse	49
Figure N° 21: Ventilateur centrifuge et ses aubes [Auteur].....	50
Figure N° 22: Volute.....	51
Figure N° 23: Unité de ventilation.....	52
Figure N° 24: Bouton marche-arrêt	53
Figure N° 25: Bornier	53
Figure N° 26: Disjoncteur différentiel	54
Figure N° 27: Disjoncteur de distribution.....	54
Figure N° 28: Disjoncteur moteur.....	55
Figure N° 29: Relais thermiques.....	55
Figure N° 30: Voyant lumineux.....	55
Figure N° 31: Régulateur de température	56

Figure N° 32: Résistance à ailettes	56
Figure N° 33: Drosera Ramentacea (Matanando).....	57
Figure N° 34: Centella Asiatica (Talapetraka).....	59
Figure N° 35: Moule en bois chez PRONAMA	61
Figure N° 36: Presse à vis sans fin chez PRONAMA	61
Figure N° 37: Thermohygromètre	62
Figure N° 38: Thermo-anémomètre	63
Figure N° 39: Thermomètre à cadran	64
Figure N° 40: Balance de précision à 1[g] près	64
Figure N° 41: Courbe de variation de la température de l'air à la sortie du capteur	67
Figure N° 42: Courbe de variation de la masse de l'échantillon de Drosera Frais	68
Figure N° 43: Courbe de variation de l'humidité relative de l'échantillon de Drosera Frais	69
Figure N° 44: Courbe de variation de la masse de l'échantillon de Drosera pré-séché.....	70
Figure N° 45: Courbe de variation de l'humidité relative de l'échantillon de Drosera pré-séché.....	70
Figure N° 46: Courbe de comparative de séchage de Drosera Frais et pré-séché en fonction de l'humidité relative	71
Figure N° 47: Courbe de variation de la masse de l'échantillon de Centella Frais	72
Figure N° 48: Courbe de variation de l'humidité relative de l'échantillon de Centella Frais	72
Figure N° 49: Courbe de variation de la masse de l'échantillon de Centella pré-séché.....	73
Figure N° 50: Courbe de variation de l'humidité relative de l'échantillon de Centella pré-séché	74

NOMENCLATURE

a	: Albédo du sol
Ac	: Surface de l'insolateur
CA	: Chiffres d'Affaires
Ci	: Capacité calorifique
Cij	: Coefficient de couplage conductif entre les nœuds i et j
Cs(Tf)	: Fraction massique de la vapeur saturante à la température T_f du produit
Cv	: Fraction massique de vapeur d'eau dans l'air asséchant à l'entrée de la claie considérée
D	: Diamètre hydraulique du conduit de séchage
dNs/dt	: Vitesse de séchage
DR	: Délai de Récupération
FNA	: Flux Net Actualisé
FNT	: Flux Net de Trésorerie
Fr	: Efficacité globale de l'insolateur
FRI	: Font de Roulement Initial
Gz	: Nombre de Graetz
HA	: Humidité absolue
h_1	: Coefficient d'échange thermique par convection entre la couverture et l'air caloporteur
h_2	: Coefficient d'échange thermique par convection entre l'absorbeur et l'air caloporteur
h_3	: Coefficient d'échange thermique par convection entre l'air caloporteur et l'isolant
h_{cdi}	: Coefficient d'échange thermique par conduction dans isolant
h_{cdv}	: Coefficient d'échange thermique par conduction dans la couverture transparente
h_{cvv}	: Coefficient d'échange thermique par convection entre l'isolant et l'air extérieur
he	: Coefficient d'échange massique externe entre le fluide asséchant et le produit à sécher
hi	: Coefficient d'échange massique interne entre le fluide asséchant et le produit à sécher
Hij	: Coefficient de couplage convectif entre les nœuds i et j

Hm	: Coefficient d'échange massique global exprimé
HR	: Humidité relative
hr	: Humidité relative de l'air asséchant en équilibre avec le produit
hre	: Humidité relative de l'air asséchant en équilibre avec le produit
h_{ris}	: Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre l'isolant et le sol
h_{rni}	: Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre l'absorbeur et l'isolant
h_{rmv}	: Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre l'absorbeur et la couverture
h_{rv}	: Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la voûte céleste et la couverture
h_{rvs}	: Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre le sol et la couverture transparente
Lo	: Largeur de l'insolateur
Lv	: Longueur de l'insolateur
Me	: Masse d'eau
Ms	: Masse de la matière sèche
Mt	: Masse totale
Nu	: Nombre de Nusselt
Pn	: Puissance absorbé par l'absorbeur
Pp	: Puissance perdu par m^2 du capteur
Pr	: Nombre de Prandtl
Pu	: Puissance utile reçue par le capteur solaire
Pu_1	: Puissance utile récupérée par la conduite utile supérieure
Pu_2	: Puissance utile récupérée par la conduite inférieure
Re	: Nombre de Reynolds
RF	: Rentabilité Financière
S	: Section droite de la conduite
Ta	: Température ambiante
Tf	: Température du fluide caloporteur
Tf_1	: Température du fluide dans le conduit supérieur
Tf_2	: Température du fluide dans le conduit inférieur
Tfb	: Température moyenne du fluide circulant entre l'absorbeur et l'isolant
Tfe	: Température d'entrée de l'air dans l'insolateur

T_{fm}	: Température moyenne de l'air dans l'insolateur
T_{fs}	: Température de l'air à la sortie de l'insolateur
T_{ft}	: Température moyenne du fluide circulant entre l'absorbeur et la couverture
T_i	: Température du nœud i à l'instant t (K)
T_{ise}	: Température de l'isolant (face externe)
T_{isi}	: Température de l'isolant (face interne)
T_n	: Température de l'absorbeur
TRI	: Taux de Rentabilité Interne
T_{ve}	: Température de la vitre (face externe)
T_{vi}	: Température de la vitre (face interne)
U_b	: Coefficient global de pertes.
U_L	: Coefficient de pertes thermiques à travers la face arrière de l'insolateur
U_t	: Coefficient de pertes thermiques à travers la face avant de l'insolateur
VAN	: Valeur actualisée Nette
λ_a	: Conductivité thermique du fluide [W/m/K]

LISTES DES ABREVIATIONS

ESPA	: Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo
FRI	: Fond de Roulement Initial
CNRIT	: Centre de National de Recherches Industriel et Technologique
PME	: Petite et Moyenne Entreprise
PMI	: Petite et Moyenne Industrie
PVC	: Polyvinylchloride
TPG	: Tôle Plane Galvanisée
TPI	: Tôle Plane Inoxydable
TPN	: Tôle Plane Noire
PRONAMA	: Produits Naturel Malagasy
Adm	: Administratif
Fin	: Financière

INTRODUCTION

De par ses conditions climatiques exceptionnelles, Madagascar dispose d'une biodiversité unique et des ressources naturelles renouvelables significatives, extrêmement riche, avec une abondance inégalée de plantes thérapeutiques et aromatiques telles que feuilles, écorces ou fleurs. Compte tenu de la qualité de ses ressources, Madagascar connaît depuis quelques années, un développement croissant de la filière de la transformation des plantes médicinales et aromatiques qui sont très prisées sur le marché international en tant qu'alternative aux médicaments dont certains commencent à avoir une résistance aux virus et bactéries, malgré une thérapie habituellement efficace. De plus, l'usage excessif des médicaments de synthèse et la prise de conscience de leur toxicité ont conduit à reconsidérer favorablement les pratiques médicinales "douces" ou "naturelles" dans lesquelles s'inscrivent l'homéopathie, la phytothérapie et l'aromathérapie. En conséquence, le marché des Plantes Médicinales et Aromatiques (PMA) est en pleine expansion.

Le développement des entreprises du type PMI/PME qui transforment ces plantes a été très rapide. Toutefois, beaucoup d'opérateurs économiques rencontrent des problèmes de conservation et de normalisation de leur qualité, notamment celles destinées à l'exportation.

Les techniques rudimentaires de transformation de ces plantes utilisées actuellement n'arrivent plus à soulever les dits problèmes.

Compte tenu de ces enjeux, la recherche de technologies appropriées visant la valorisation de ces plantes s'impose. La diffusion et le transfert de ces technologies auprès des opérateurs économiques potentiels doivent être à la fois souples, faciles à maîtriser et abordables financièrement pour pouvoir constituer un facteur de développement local.

En effet l'application directe des résultats de recherche en milieu réel est non seulement un appui à la recherche mais aussi un moteur pour le développement d'un pays.

Ainsi, à l'instar du prototype installé au CNRIT et les modèles mathématiques correspondants, l'objectif de notre travail consiste à réaliser un séchoir solaire répondant aux besoins de la société Produits Naturels Malagasy.

C'est dans cette optique que nous avons initié ce projet intitulé :

« Contribution à la conception et réalisation d'un séchoir solaire pour plantes médicinales et aromatiques .Ce séchoir solaire est destiné à la valorisation des plantes médicinales et aromatiques locaux.

Pour ce faire nous avons subdivisé notre travail en trois parties :

- la première partie présente le contexte du projet et l'état de l'art sur le séchage, les séchoirs solaires et le modèle mathématique adopté ;

- la seconde comporte les matériels et méthodes utilisé pour réaliser le séchoir ;
- la troisième a été consacrée aux résultats des expérimentations effectuées au sein du séchoir, suivis d'une étude de faisabilité financière du projet.

Partie I : ETAT DE L'ART

CHAPITRE I. CONTEXTE GENERAL DU PROJET

1 HISTORIQUE

A Madagascar, l'exploitation des plantes médicinales, aromatiques et à huiles essentielles ne date pas d'hier. C'était au 18^e siècle qu'on constatait l'existence d'un intense échange de ces plantes dans la région de l'océan Indien.

Les cultures expérimentales des variétés locales et exotiques commencèrent juste deux ans après la colonisation française.

Les plantes introduites provenaient principalement de Maurice, Réunion, Sri Lanka, Singapour, Java, Philippines, Congo, les Antilles.

Le programme de plantation a été orienté vers celles utilisées en parfumerie et en cosmétique, entre autres : l'Ylang-ylang, le Géranium rosat, le lemon-grass, le vétiver, et le patchouli.

Les huiles essentielles sont largement utilisées pour la formulation des produits issus des industries de :

- la cosmétique
- la parfumerie
- pharmaceutique
- agro-alimentaire
- l'aromathérapie

Ainsi pour valoriser les ressources locales et rentabiliser les activités de la filière plantes médicinales et aromatiques en général, nous avons opté pour la réalisation d'un outil capable de transformer ces plantes en vue de leur exportation sur le marché international et régional.

2 JUSTIFICATION

Actuellement la majeure partie des produits agricoles sont encore séchés en plein air au soleil sans aucune protection contre les polluants externes (insectes, poussières, etc.). Il en résulte une qualité mauvaise voir médiocre, une piètre conservation dans le temps et des pertes très importantes.

En effet, un séchage insuffisant et une exposition prolongée des produits aux agents atmosphériques et autres, donc à l'action de ravageurs (insectes, rongeurs, oiseaux) et de microorganismes (moisissures), peut entraîner des pertes de produits.

Pour les mêmes raisons, cette méthode de séchage naturel est déconseillée en région humide, ou pendant la saison des pluies.

Ce qui justifie l'importance des études sur le séchage solaire indirecte pour parvenir à proposer des séchoirs pouvant assurer une continuité de la disponibilité de produits de qualité.

3 OBJECTIFS DE L'ETUDE ET RESULTATS ATTENDUS

Les acteurs socio-économiques de développement doivent être conscients, voire soucieux de l'incontestable nécessité d'inventorier et de valoriser toutes les ressources agricoles et les potentialités naturelles propres à chaque région. La valorisation des espèces non-ligneuses issues des forêts des domaines classés ou protégés peut servir au renforcement des stratégies et actions de développement et de conservation.

Pour Madagascar, le développement de la filière plantes médicinales et aromatiques est particulièrement prometteur, d'où la nécessité de renforcer les complémentarités entre son agriculture et son industrie.

De plus, l'exportation est devenue une exigence par rapport à la stratégie de développement économique de notre pays. Il importe donc de trouver toutes les niches potentielles sur le marché mondial et de développer de nouveaux produits et des procédés de transformation porteurs pour les transformateurs et les PMI/PME de la filière plantes médicinales et aromatiques.

En conséquence et en vue de renforcer l'interface entre la recherche scientifique publique et les acteurs socio-économiques locaux, la mise à disposition à ces derniers des technologies appropriées répondant à leurs besoins s'avère indispensable.

3.1 Objectif général

L'objectif général de notre étude est de réaliser un outil industriel de valorisation des plantes médicinales (Drosera et Centella) par les technologies innovantes du séchage.

3.2 Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques qui en découlent sont :

- promouvoir et professionnaliser les acteurs de la filière plantes médicinales et aromatiques ;
- étudier les marchés des plantes médicinales et aromatiques transformées par le séchage normalisé et évaluer les possibilités de commercialisation de ces produits transformés.

3.3 Résultats attendus

- commercialisation de produits concurrentiels respectant les normes en vigueur ;
- économie d'énergie et contribution à la sauvegarde de l'environnement par l'utilisation de l'énergie solaire pour le chauffage de l'aire ;
- amélioration des revenus des producteurs intervenant dans la filière.

4 ENVIRONNEMENT DU PROJET

4.1 Le marché des plantes médicinales et aromatiques

Depuis quelques années, on assiste à une tendance croissante vers l'exploitation des systèmes traditionnels de la médecine et en particuliers les médicaments à base de plantes.

Les plantes médicinales et aromatiques occupent davantage de place sur le marché mondial, suite à l'émergence actuelle de l'aromathérapie. On constate ainsi une régression de l'usage des produits synthétiques au profit des produits naturels dont la demande des consommateurs ne cesse d'augmenter. Le développement du marché des Plantes Aromatiques et Médicinales biologiques est très marqué par la forte croissance des entreprises œuvrant dans cette filière.

Actuellement, plusieurs entreprises locales qui travaillent uniquement des produits biologiques et fabriquent des tisanes, des huiles essentielles, des épices, des produits cosmétiques ou encore des produits d'entretien, cherchent à s'approvisionner à proximité.

Il est donc possible de produire ces plantes pour ces entreprises mais à condition de le réaliser avec un certain professionnalisme. Cela suppose des surfaces suffisamment grandes pour amortir les investissements qui seront nécessaires et une organisation spécifique à ce type de culture.

Ce qui permet non seulement d'éviter l'épuisement des stocks biologiques dû à l'exploitation à outrance des ressources naturelles, mais également d'assurer la pérennité de la filière qui pourrait certainement générer des bénéfices conséquents.

4.2 Contexte politique

L'agriculture constitue l'une du secteur clé pour le développement de Madagascar. Dans cette optique, l'une des politiques actuelles du Gouvernement pour le secteur agricole, est axée sur l'augmentation de la production et l'amélioration des conditions de vie paysanne, de façon à alléger la pauvreté en milieu rural.

La culture des plantes médicinales et aromatiques s'adapte bien aux conditions climatiques et géographiques de notre île. Son exploitation pourrait, ainsi devenir une des sources de devise pour notre pays, tout comme la vanille, le girofle ou d'autres épices.

4.3 Contexte social

Ce projet aura une contribution effective dans la lutte contre le chômage. En effet, les agriculteurs intervenant dans cette filière seront encouragés à produire davantage ces plantes. De plus, c'est un projet facilement réalisable car toutes les matières premières et appareillages nécessaires pour l'unité de transformation sont disponibles sur le marché local.

4.4 Les enjeux du séchage normalisé

Le séchage est un procédé de conservation extrêmement ancien qui, privant les produits agricoles d'eau libre, interdit toute activité microbienne ou enzymatique. Les produits frais perdent de l'eau et sont conservés sans que les vitamines et les matières nutritives soient détruites. La conservation des produits bien séchés peut durer pendant plusieurs mois, voire même des années, à condition qu'ils soient gardés dans des endroits ou lieu de stockage appropriés.

Une meilleure maîtrise du séchage permet de réduire les pertes dues à des phénomènes se produisant lors du stockage des produits, à savoir:

- germination hâtive et intempestive des grains;
- développement de moisissures;
- prolifération d'insectes.

L'élimination d'eau permet ainsi de tamponner le caractère saisonnier de certaines activités agricoles ou industrielles. En dehors de la conservation, l'élimination d'eau permet aussi de réduire considérablement la masse et le volume des aliments, entraînant ainsi de substantielles économies d'encombrement et de transport.

Le séchage dans le domaine agroalimentaire concerne à la fois :

- les produits agricoles peu hydratés, mais demandant parfois (selon la météorologie) un séchage complémentaire pour les stabiliser et/ou les standardiser avant traitement industriel : maïs, riz, autres céréales, graines oléagineuses, etc. ;
- les produits agricoles, très hydratés exigeant le séchage pour être stabilisés et allégés : fruits, légumes et assimilés (pomme de terre, carottes, oignons) ;
- les produits de transformation industrielle, séchés pour raison de stabilité et de présentation : fruits, plantes médicinales, champignons comestibles, plantes à épices, amidon, etc. ;
- les sous-produits industriels, généralement destinés à l'alimentation animale.

Il est donc nécessaire de faire sécher les produits dans des délais relativement courts, quelles que soient les conditions ambiantes, en faisant recours au séchage artificiel.

CHAPITRE II. GENERALITES SUR LE SECHAGE

1 DEFINITION

Le séchage est une opération consistant à séparer partiellement ou totalement un liquide, généralement de l'eau, d'une matière solide.

Il existe deux grands types de procédés de séchage

- les procédés mécaniques suivant lesquels le matériau est soumis à une compression.
- les procédés thermodynamiques consistant à élever la température de l'eau contenue dans le matériau ou à diminuer sa pression de vapeur saturante pour aboutir à son évaporation.

Nous nous intéressons uniquement aux procédés thermodynamiques par évaporation d'eau.

Pour le cas des produits agricoles, la matière solide est une substance alimentaire contenant essentiellement, en proportions variables, des glucides, des protides et des sels minéraux.

Lors de l'opération de séchage, l'élimination des molécules d'eau s'effectue par entraînement, grâce à la différence de pressions partielles de vapeur d'eau à la surface du produit à sécher et dans son environnement. Le séchage correspond au transfert d'une partie de l'eau contenue dans le produit, dans l'air ambiant.

La condition nécessaire et suffisante pour que le processus de séchage ait lieu est que la pression partielle P_p de vapeur d'eau à la surface du produit soit supérieure à la pression partielle P_{ar} de vapeur d'eau dans l'air asséchant.

Ainsi, lorsque $P_p = P_{ar}$, il n'y a plus de séchage mais il y a un équilibre hygroscopique.

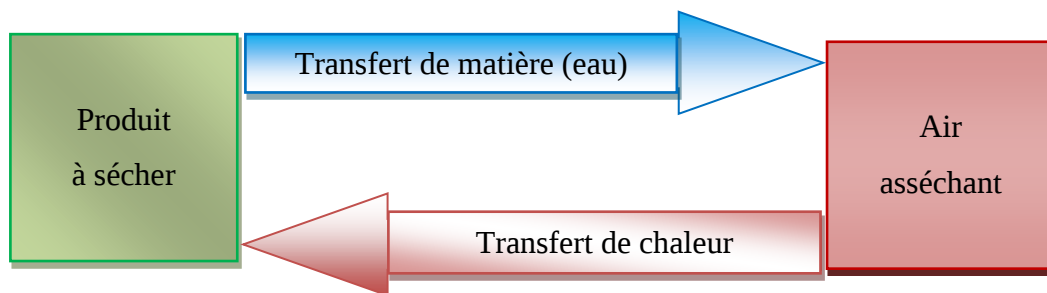


Figure N° 1: Représentation schématique du processus de séchage

En général, on distingue deux modes de séchage :

- le séchage naturel,
- le séchage artificiel.

1.1 Séchage naturel

Il s'effectue et s'obtient par exposition directe du produit humide à sécher au soleil ou par séjour dans une ambiance atmosphérique relativement sèche, permettant ainsi au produit de céder à l'air une

partie de l'eau en excès qu'il contient. C'est un séchage lent qui nécessite une immobilisation du produit pendant une période relativement longue (jours, mois).

Il ne permet de ramener les produits qu'à une humidité modérée, insuffisante (trop élevée) pour d'ultérieure conservation des produits.

1.2 Séchage artificiel

Dans ce cas, la matière humide à sécher est placée dans un séchoir pour être soumise à l'action d'un courant d'air chaud produit par un générateur d'énergie calorifique approprié.

En comparaison avec le séchage naturel, le séchage artificiel aboutit à un abaissement plus rapide de la teneur en eau du produit. Ce mode de séchage permet de conserver les produits agricoles fortement hydratés dans des conditions ambiantes de stockage afin d'éviter leurs altérations.

Dans les deux types de séchage, le processus de séchage se résume comme le résultat de transferts simultanés de chaleur et de matière. En effet :

- l'énergie thermique nécessaire à l'évaporation de l'eau est fournie par l'air asséchant : transfert de chaleur du fluide vers le produit.
- l'eau évaporée du produit humide est ensuite absorbée et évacuée par cet air : transfert de matière du produit vers le fluide de séchage.

L'air asséchant joue alors le double rôle de fluide caloporteur et de fluide vapotransporteur.

2 LES DIFFERENTS TYPES DES SECHOIRS SOLAIRES [6]

Les séchoirs solaires utilisés pour le séchage des produits agro-alimentaires peuvent être classés suivant le mode auquel ils utilisent le rayonnement solaire :

- Un séchoir est dit direct, si le rayonnement solaire atteint directement les produit, le séchoir est indirect lorsque les produits sont à l'abri du rayonnement.
- Un séchoir est dit à convection naturelle si la circulation d'air est assurée par thermosiphon et un séchoir en convection forcée si elle est assurée par une action mécanique.

2.1 Les séchoirs naturels

Ils utilisent directement le soleil et l'air, où les produits sont répartis sur des claies ou des nattes, ou disposé même au sol.

Ces séchoirs sont très bon marché, mais nécessite une intervention humaine régulière, protection ou ramassage du produit en cas de pluie, malaxage fréquent, pour éviter la surchauffe de la couche supérieure et homogénéiser le produit pour permettre à la couche inférieure de sécher.

Ce type de séchoir est souvent traditionnel dans les communautés paysannes, pour répondre aux problèmes de la conservation temporaire du produit, en attendant la vente ou la consommation.

Il présente cependant, des inconvénients, qui sont : pertes du produit mal séché ou gâchés lors de remuage, destruction de vitamines A et C, par l'exposition directe au soleil, dégradation par les intempéries et les nuisibles (insectes, rats, poussières).

2.2 Les séchoirs solaires directs

Le séchage solaire direct, de conception simple, utilise les rayons directs du soleil pour sécher les produits. Il est simple à réaliser. Se sont en général des constructions simples et robustes d'un châssis vitré où le vitrage sert à augmenter l'effet de serre.

La circulation d'air se fait à travers le séchoir par tirage naturel dû au réchauffement (effet cheminée) ou par action du vent sur les ouvertures, mais rarement à l'aide d'un ventilateur, du fait de la rusticité des modèles.

2.3 Les séchoirs solaires indirects

Les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont disposés sur des claies à l'intérieur d'une enceinte ou d'un local en rapport avec l'importance des quantités à sécher.

L'air neuf est admis dans l'enceinte de séchage après passage dans des capteurs à air ou autre préchauffeur, qui le réchauffent en fonction du débit utilisé.

3 HUMIDITE DES SOLIDES

- *L'humidité* contenue dans les corps solides ou liquides se présente soit sous la forme de liquide pur (de l'eau dans la plupart des cas), soit sous forme d'une solution dans laquelle l'eau constitue le solvant. Il s'agit alors d'une solution capable de cristalliser ou d'une solution colloïdale ; elle peut également se présenter sous forme de vapeur.

- *Les corps humides* sont généralement des corps capillo-poreux et leurs propriétés sont principalement fonction de la nature des liaisons avec l'eau qu'ils contiennent.

- *Un corps hydraté* est formé de la combinaison d'un corps avec l'eau par association moléculaire ou par insertion dans le réseau cristallin.

3.1 Type de liaison de l'eau

On classifie les différents types de liaisons de l'eau dans le corps humide selon leur énergie, qui est l'énergie libre du processus de déshydratation ou de déshumidification.

3.1.1 Eau combinée chimiquement

Une distinction doit être faite entre l'eau contenue sous forme d'ions hydroxyles et l'eau des composées moléculaires du type des hydratés cristallisées, cette dernière étant bien moins liée que la précédente.

3.1.2 L'eau absorbée

Principalement constituée d'une couche moléculaire répartie sur les surfaces externe et interne du corps capillo-poreux. L'absorption est ici considérée comme le déplacement d'une substance dans le film limite entre deux phases voisines, sans que la nature de l'énergie nécessaire au phénomène entre en compte. Elle est spontanée, exothermique et toujours accompagnée d'une diminution de l'énergie libre du système correspondant à la chaleur d'absorption.

3.1.3 L'eau osmotique

Le passage de l'absorption à l'osmose correspond à l'annulation de l'effet thermique de l'absorption. Pour un certain taux d'humidité, la chaleur d'absorption devient nulle ; l'eau est alors fixée par osmose et sa pression de saturation est égale à celle de l'eau libre. La quantité de cette eau osmotique peut être très importante. Par exemple, la gélatine, qui est le colloïde type, fixe par osmose 50 fois plus d'eau que par absorption.

3.1.4 L'eau libre

L'eau libre est l'eau maintenue dans les produits par les seules forces mécaniques. On regroupe ici l'eau retenue par capillarité, ainsi que celle se trouvant dans les pores ou à leur surface (humectation).

3.2 Grandeurs physiques

Généralement, la notion d'humidité d'un matériau se réfère seulement à l'eau susceptible d'être éliminée par un processus physique réversible, sans que cette élimination modifie la composition ou la structure fondamentale du corps.

Par le séchage, on élimine habituellement :

- l'eau fixée par absorption,
- l'eau fixée par osmose,
- l'eau fixée mécaniquement dans les pores et capillaires,
- l'eau d'humectation.

On définit les grandeurs suivantes : humidité relative et humidité absolue

3.2.1 L'humidité relative HR (ou humidité sur base humide ou titre en eau)

$$HR = \frac{Me}{Mt} = \frac{Me}{Me + Ms} \text{ en \%} \quad (II - 1)$$

Avec :

Me : masse d'eau contenue dans le corps

Ms : masse de la matière sèche

Mt : masse totale du corps humide

3.2.2 L'humidité absolue HA (ou humidité sur base sèche ou taux d'humidité)

$$HA = \frac{Me}{Ms} = \frac{Mt - Ms}{Ms} \text{ en KG d'eau par KG de matière sèche} \quad (II - 2)$$

3.2.3 Le taux de matière sèche : Tms est défini par le rapport

$$Tms = \frac{Ms}{Mt} = \frac{Mt - Me}{Mt} = 1 - HR \quad (II - 3)$$

Remarque : La valeur de la matière sèche (Ms) est obtenue par étuvage à 70°C, d'échantillons appropriés pendant 24 à 30 heures en procédant à plusieurs pesées jusqu'à constatation de la dessiccation complète de la matière considérée, tout en évitant la modification de sa composition ou sa structure fondamentale. La norme ISO 589 prescrit de sécher l'échantillon dans une étuve ventilée dont la température est réglée à 105 °C, jusqu'à masse constante.

Cette valeur étant utilisée pour déterminer les humidités initiale et finale des produits.

En général le taux de matières sèches est relativement faible (de l'ordre de 10 à 15%) pour les fruits et légumes.

Pour caractériser l'état d'humidité d'un produit donné, il suffit d'utiliser l'une de ces grandeurs.

En général le processus de séchage consiste à ramener l'état d'humidité d'un produit de

HR= 80 à 90%, à une teneur comprise entre 10 et 20 %, selon la durée de conservation et le mode de consommation souhaitée.

3.3 L'activité de l'eau

La plupart des produits sont hygroscopiques et ils contiennent de l'eau. Cette humidité a une grande influence sur leurs propriétés physiques, mécaniques et chimiques et elle a même une incidence sur le prix de vente de certains produits (par exemple, le prix du maïs payé au céréalier est pondéré en fonction de sa teneur en eau). Mais la teneur en eau ne suffit pas pour expliquer l'influence réelle de l'eau sur un produit. Par exemple, elle ne permet pas de connaître la stabilité ou la durée de conservation d'un aliment.

On utilise pour cela un deuxième paramètre : l'activité de l'eau. Ce paramètre permet de décrire l'état de l'eau dans son environnement.

Noté a_w (activity of water), l'activité de l'eau est aussi appelée « humidité relative d'équilibre » (HRE), ou “eau libre”, ou encore “eau disponible”.

Elle indique le “degré de liberté” de l'eau absorbée dans un matériau. Grâce à la connaissance de l'activité de l'eau, on peut prévoir les échanges d'eau entre un produit et l'environnement dans lequel il se trouve (air, emballage, autres produits, etc.).

L'activité des micro-organismes dans les aliments, les caractéristiques de cohésion ou d'agglomération d'un produit dépendent directement de l'activité de l'eau. On comprend dans ces conditions que dans bien des cas, ce paramètre revêt plus d'importance que la teneur en eau.

Les propriétés des aliments, leur durée de conservation, leur activité microbienne, etc. peuvent être contrôlés à l'aide de l'activité de l'eau (appelé aussi humidité relative en équilibre).

3.3.1 Définition

Par définition, l'activité de l'eau a_w (*Activity of water*) d'un corps est le rapport entre la pression de vapeur d'eau p au-dessus de la surface de celui-ci et la pression de vapeur p_0 de l'eau pure :

$$a_w = \frac{P}{P_0} \quad (II - 4)$$

Rappelons que la pression de vapeur est la pression sous laquelle le corps, placé seul à une température constante, est en équilibre avec sa vapeur. Autrement dit, c'est la pression sous laquelle le liquide bout (ou encore le solide se sublime), à la température considérée. La pression de vapeur dépend de la température. L'activité de l'eau a_w et l'humidité relative d'équilibre HRE sont liés par la relation :

$$HRE = 100 \cdot a_w \quad (II - 5)$$

Ainsi, une humidité relative de 80 % correspond à une activité de l'eau de 0,8.

3.3.2 Mise en évidence de l'activité de l'eau

Considérons l'enceinte représentée sur la figure ci-dessous où règnent une pression totale voisine de la normale, une température et une hygrométrie constante

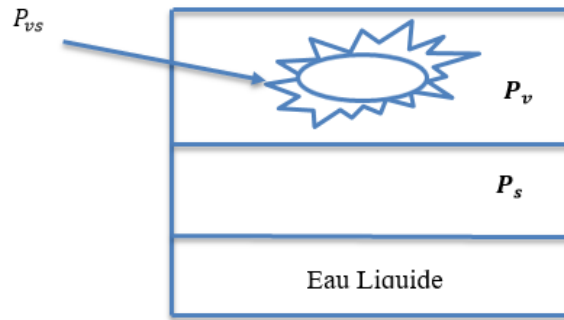


Figure N° 2: *Activité de l'eau*

En désignant par :

- P_s la pression de vapeur saturante au-dessus de l'eau liquide à la température du système.
- P_v la pression de vapeur dans l'enceinte.
- P_{vs} la pression de vapeur à la surface du corps humide

On définit l'activité a_w de l'eau dans le corps humide par :

$$a_w = \frac{P_{vs}}{P_s} \quad (II - 6)$$

Si le corps est en équilibre avec l'air, il n'y a plus d'échange d'eau et le gradient de pression partielle de vapeur entre le corps et l'air s'annule :

Dans ce cas, on a :

$$P_{vs} = P_v \quad a_w = \frac{P_{vs}}{P_s} = \frac{P_v}{P_s} = \text{humidité relative de l'air} \quad (II - 7)$$

Le séchage d'un corps humide s'arrête lorsque l'activité de l'eau est égale à l'humidité relative de l'air environnant. L'activité de l'eau dans le corps est égale à l'unité.

$$P_{vs} = P_v \text{ alors } a_w = \frac{P_s}{P_s} = 1 \quad (II - 8)$$

3.3.3 Importance de la détermination de l'activité de l'eau

Pourquoi mesurer l'activité de l'eau?

L'activité de l'eau détermine directement les propriétés physiques, mécaniques, chimiques et microbiologiques de nombreuses substances, telles que la fluidité, la formation de grumeaux, la coagulation ou encore la cohésion.

La capacité de conservation des aliments, la stabilité des couleurs, du goût, la teneur en vitamines, l'arôme et les conditions favorables à la formation de moisissures sont directement influencés par la valeur a_w . Il en est de même pour la croissance des microbes

L'activité de l'eau est un facteur critique qui détermine directement la conservation des aliments. La température, le pH et quelques autres facteurs ont une certaine influence sur la possibilité et le taux de croissance d'un organisme dans des denrées. L'activité de l'eau représente le plus important de ces facteurs.

En mesurant l'activité de l'eau dans des aliments, on peut directement prévoir quels microorganismes représentent une source potentielle d'altération. C'est l'activité de l'eau, donc l'eau libre, qui fixe la limite inférieure de la croissance microbiologie. Seule la détermination de la valeur a_w permet de fournir des renseignements sur la présence d'eau "libre", donc chimiquement non liée.

Par ailleurs, l'activité de l'eau influence de manière significative la durée de conservation des produits alimentaires. Ceci concerne entre autres les pâtisseries, les sucreries, les fromages, le café, les produits laitiers, les fruits lyophilisés, la farine, les céréales, la viande, les champignons, les noix, l'huile alimentaire, le riz, la charcuterie, les produits instantanés, les épices et le thé.

La mesure de la valeur a_w , c'est-à-dire de l'humidité d'équilibre dans le produit, permet d'optimiser un processus de séchage ou d'ajuster les conditions climatiques d'un entrepôt.

La mesure de l'activité de l'eau garantit ainsi une haute qualité constante des produits.

3.4 Isothermes d'adsorption-désorption

Le principal but du séchage est d'assurer la conservation d'un produit donné par l'élimination des bactéries qui se produisent dès que la teneur en eau dépasse une certaine valeur.

Il s'avère donc nécessaire de savoir pour un produit et une ambiance donnés, quelle est la teneur en eau d'équilibre. Pour cela, il faut faire recours au réseau de courbes d'équilibre appelé Isotherme de désorption, ci-dessous où HR représente l'humidité relative de l'air ambiant et Ma le pourcentage du rapport :

$$\mathbf{Ma} = \frac{a\mathbf{hr}}{b - \mathbf{hr}} \quad (\text{II} - 9)$$

Où a et b sont des constantes caractéristiques du produit.

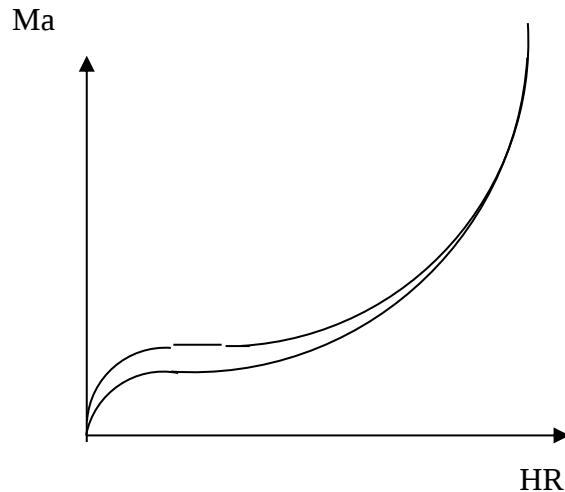


Figure N° 3: *Isotherme de désorption*

Ces courbes ne se superposent pas exactement suivant qu'il s'agit de sorption avec gain d'eau par le produit ou de désorption avec perte d'eau par le produit. On observe un phénomène d'hystérésis. Les isothermes de sorptions d'un produit donné permettent de déterminer la température et l'humidité d'équilibre de séchage de ce produit.

3.5 Modèle numérique des courbes d'équilibre

Les courbes précédentes peuvent être obtenues expérimentalement pour chaque produit. Toutefois, ce sont des opérations longues et délicates. Aussi beaucoup d'auteurs ont essayé de mettre au point des relations empiriques à partir de calculs théoriques simplifiés et de recalages expérimentaux. Nous rapportons ici deux modèles les plus utilisés et les plus simples.

- HENDERSON a proposé [17] :

$$1 - hr = e^{-kTMa^n} \quad (II - 10)$$

Où T est en degré Rankine

Ma en pourcentage

K et n sont des constantes caractéristiques du produit.

Ce modèle décrit l'ensemble du réseau de courbes.

- LUIKOV indique, pour certaine valeur de la température [10] :

$$Ma = \frac{ahr}{b-hr} \quad (II - 11)$$

Où a et b sont des constantes caractéristiques du produit.

3.6 Courbe de séchage

Le matériau humide quelconque est placé dans un écoulement d'air asséchant aux caractéristiques constantes.

L'allure générale des courbes donnant la vitesse de séchage en fonction du temps a la forme représentée par la figure suivante :

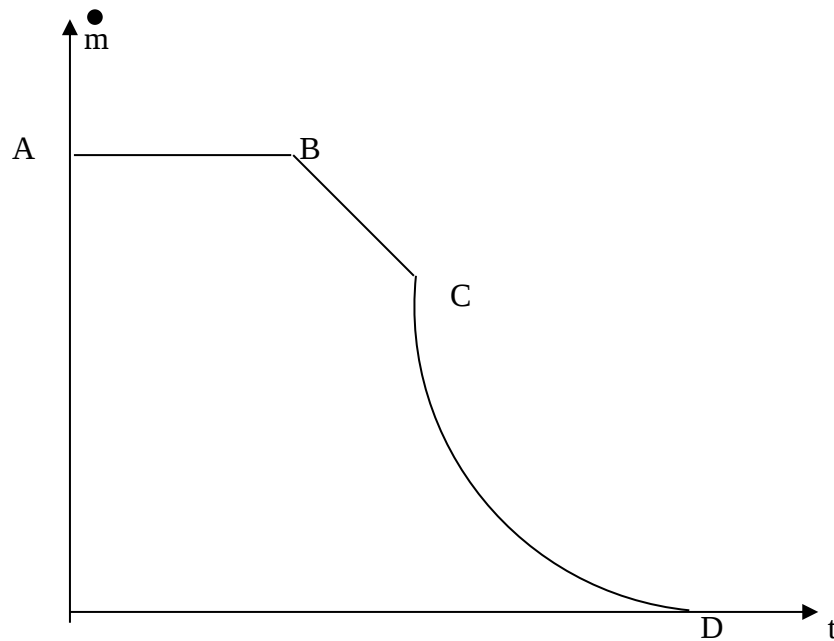


Figure N° 4: *Allure générale des courbes de séchage*

La portion AB correspond à l'évaporation de surface. Le point B apparaît au moment où en surface règne la teneur en eau d'équilibre M_e correspondant aux propriétés de l'air asséchant.

Dans la deuxième phase de séchage, portion BC, le front de séchage recule au cœur du produit.

Le point C apparaît au moment où l'ensemble du produit possède un comportement hygroscopique.

La vitesse de séchage ne cesse de diminuer jusqu'à s'annuler au point D où le produit tout entier possède l'humidité M_e .

Dans la pratique, en ce qui concerne les fruits et légumes, la portion AB n'existe pas et le séchage est régi par des phénomènes complexes de migration interne de l'humidité

Partie II : METHODOLOGIE

CHAPITRE III. MODELE MATHEMATIQUE DES PRINCIPAUX ELEMENTS DU SECHOIR

Plusieurs modèles mathématiques peuvent être utilisés pour décrire le comportement thermique de chaque élément du système. Le séchage est un processus très commun ; beaucoup de scientifiques travaillent dans sa modélisation. Sa physique est très complexe et il n'existe pas un seul modèle qui peut le décrire totalement.

Pour notre cas, nous avons opté pour les modèles classiques et simplifiés, excluant certains détails qui ont peu d'influence sur les performances. Ceci dans le but de faire apparaître les paramètres physiques pertinents intervenant dans le processus de séchage.

Le développement de ces modèles est basé sur l'établissement des équations traduisant les bilans thermiques dans une section du système, perpendiculaire à la direction de l'écoulement du fluide caloporteur.

1 MODELE DE L'INSOLATEUR

1.1 Hypothèses de base du modèle

1.1.1 Hypothèses générales

Pour l'établissement des équations traduisant les bilans thermiques dans une section de l'insolateur, nous avons fait les hypothèses suivantes [16] :

- l'écoulement du fluide caloporteur est unidirectionnel dans chaque partie du système ;
- les différents milieux ont chacun une température uniforme dans une section normale à l'écoulement ;
- l'écoulement du fluide caloporteur est identique à lui-même le long du conduit, c'est-à-dire qu'il ne change pas de régime mais reste soit laminaire, soit transitoire, soit turbulent ;
- les phénomènes d'inertie thermique relatifs à l'air sont négligeables ;
- l'air est parfaitement transparent au rayonnement infrarouge ;
- les pertes thermiques dans les conduits de liaison sont négligées ;
- la voûte céleste se comporte comme un corps noir ;
- la température du sol est prise égale à la température ambiante ;
- le rayonnement diffus atmosphérique est isotrope.

1.1.2 Méthodologie

En général, la densité de flux de chaleur échangé entre deux milieux de températures respectives T_1 et T_2 est de la forme.

$$\Phi = H_{12}(T_2 - T_1) \quad (III - 1)$$

L'identité formelle existant entre cette expression avec celle de la loi d'Ohm, permet d'utiliser la « méthode des analogies électriques » pour modéliser l'ensemble du système.

En effet lorsque deux phénomènes physiques sont décrits par des équations ayant la même forme mathématique et que l'un d'entre eux est facilement accessible par l'expérience, on peut profiter de l'utilisation des équations de l'un pour décrire l'autre.

Avec cette méthode :

- les températures sont représentées par des potentiels électriques ;
- les flux de chaleur par des intensités de courant ;
- les inverses des coefficients d'échange par des résistances électriques ;
- les capacités thermiques par des capacités électriques ou condensateurs.

Le tableau suivant résume les correspondances entre les grandeurs thermodynamiques et les grandeurs thermiques :

Tableau N°1: *Correspondances grandeur thermodynamiques et grandeur électriques [2]*

SYSTEME THERMIQUE			MODEL ELECTRIQUE		
Paramètre	Symbole usuelle	Unité	Paramètre	Symbole usuelle	Unité
Température	T°	°K	Potentiel	V	V
Flux de chaleur	Φ, Q, W	W	Intensité	I	A
Densité de flux de chaleur	Φ	W/m ²	Densité de courant	i	A/m ²
Conductivité thermique	λ	W/m.°K	Conductivité électrique	γ	A/m.V
Résistance thermique	R, R _t	°K/W	Résistance électrique	R, R _e	Ω=V/A
Capacité calorifique	C	J/°K	Capacité électrique	C	F

Une fois le circuit établi, on écrit la loi d'Ohm en chaque nœud, et on obtient autant d'équations que d'inconnues à déterminer.

Chaque élément d'une section du système (insolateur ou unité de séchage) à l'instant t peut être représenté par un nœud placé en son centre, de température égale à la température moyenne de l'élément.

Ainsi, en écrivant le bilan thermique pour chaque nœud, on aboutit à des équations de la forme :

$$\frac{C_i \delta T_i}{\delta t} = \sigma_i + \sum_{j=1}^n (R_{ij} + H_{ij} + C_{ij})(T_j - T_i) \quad (III - 2)$$

Avec

$C_i = M_i c_i$ étant la capacité calorifique (J/K)

T_i , la température du nœud i à l'instant t(K)

σ_i la source interne de chaleur (W)

R_{ij} , le coefficient de couplage radiatif entre les nœuds i et j (W/K)

H_{ij} , le coefficient de couplage convectif entre les nœuds i et j (W/K)

C_{ij} , le coefficient de couplage conductif entre les nœuds i et j (W/K)

Dans le calcul, il faut discrétiser l'équation aux dérivées partielles. Pour ce faire, nous avons choisi la méthode explicite des différences finies vers l'arrière ou "Back Ward difference" soit :

$$\frac{\delta T_i}{\delta t} = \frac{T_i(t) - T_i(t - dt)}{dt} \quad (III - 3)$$

L'équation (III-2) à discrétiser s'écrit :

$$M_i C p_i \frac{T_i(t) - T_i(t - dt)}{dt} = \sigma_i(t) + \sum_{j=1}^n (R_{ij} + H_{ij} + C_{ij}) (T_j(t) - T_i(t)) \quad (III - 4)$$

1.1.3 Hypothèses simplificatrices

Nous avons choisi, l'insolateur du type à double passe parallèle où l'air circule au-dessus et au-dessous de l'absorbeur. et nous avons adopté les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La conduction thermique dans le sens de l'écoulement de l'air est négligée ;
- Le vent est supposé souffler parallèlement aux faces de l'insolateur ;
- Les gradients transversaux de température dans l'absorbeur sont négligés, la conductivité thermique de l'absorbeur étant supposé infinie.

1.2 Les échanges thermiques

Les échanges thermiques au sein d'une section de l'insolateur sont schématisés selon la figure suivante

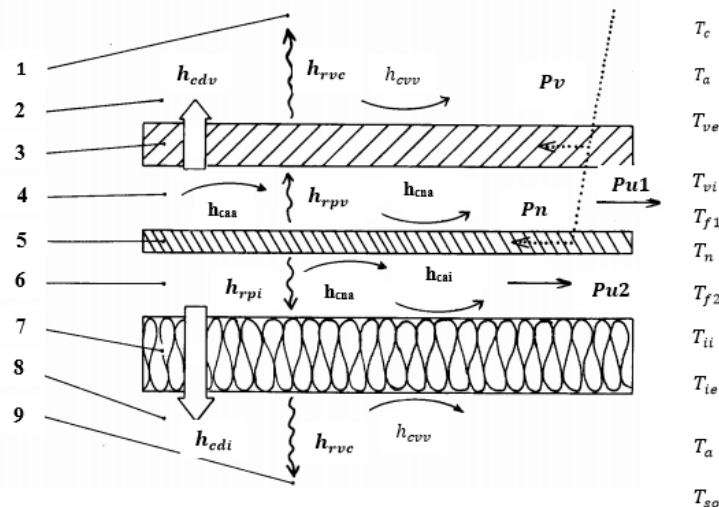


Figure N° 5: Représentation schématique des transferts thermiques dans une section de l'insolateur

[21]

Avec :

1. Voûte céleste à la température T_c
2. Milieu ambiant à la température T_a
3. Vitre qui a une température extérieure T_{ve} et une température intérieure T_{vi}
4. Conduit utiles N°1 de température T_{f1}
5. Absorbeur de température T_n
6. Conduite utile N°2 de température T_{f2}
7. Isolant à air à température interne T_{ii} et externe T_{ie}
8. Milieu ambiant arrière de température T_a
9. Le sol de température T_{so}

-  : Transfert par conduction
 : Transfert par convection
 : Transfert par rayonnement
 : Puissance utile
 : Radiation solaire

L'insolateur étant découpé en N sections fictives, dans une tranche d'indice i sur la figure 4, les phénomènes thermiques qui interviennent sont :

1.2.1 Des échanges par convection avec les coefficients d'échanges suivant :

- | | |
|---|-----------|
| - Entre l'air extérieur et la couverture transparente | h_{cvv} |
| - Entre la couverture transparente et l'air caloporteur | h_{cca} |
| - Entre l'absorbeur et l'air caloporteur | h_{cna} |
| - Entre l'air caloporteur et l'isolant | h_{cai} |
| - Entre l'isolant et l'air extérieur | h_{cvv} |

1.2.2 Des échanges par rayonnement avec les coefficients d'échanges suivant :

- | | |
|--|-----------|
| - Entre la voûte céleste et la couverture transparente | h_{rvc} |
| - Entre le sol et la couverture transparente | h_{rvs} |
| - Entre l'absorbeur et la couverture transparente | h_{rpv} |
| - Entre l'absorbeur et l'isolant | h_{rpi} |
| - Entre l'isolant et le sol | h_{ris} |

1.2.3 Des échanges par conduction avec les coefficients d'échanges suivant :

- Dans la couverture transparente h_{cdv}
- Dans l'isolant h_{cdi}

1.3 Les coefficients d'échanges thermiques

1.3.1 Convection

Pour l'effet du vent sur les faces avant et arrière de l'insolateur les coefficients d'échange convectif adoptés sont celui donné par Mc. ADAM [17]. Ainsi le coefficient de transfert h_{cvv} entre l'air extérieur et la couverture transparente s'écrit :

$$h_{cvv} = 5,67 + 3,86.V_v \quad (W/m^2/K) \quad (III - 5)$$

V_v étant la vitesse du vent (m/s). Pour l'écoulement forcé dans les conduites utiles, le coefficient d'échange est donné par

$$h_{cv} = \frac{\lambda_a \cdot Nu}{D} \quad (III - 6)$$

Avec :

$$D = \frac{4S}{P} \quad (III - 7)$$

λ_a , étant la conductivité thermique du fluide (W/m/K)

D, le diamètre hydraulique du conduit donné par la relation :

$$D = \frac{4S}{P} \quad (III - 8)$$

Si S est la section droite du conduit et P le périmètre de la section droite du conduit

Avec l'introduction des nombres dimensionnels suivants :

- Nombre de REYNOLDS défini par :

$$Re = \frac{VD}{\gamma} \quad (III - 9)$$

Où γ , est la viscosité cinématique du fluide

V, la vitesse du fluide caloporteur

- Nombre de PRANDTL d'expression :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (III - 10)$$

μ , étant la viscosité dynamique du fluide

c_p , la capacité calorifique du fluide

- Nombre de GRAETZ donné par :

$$Gz = Re * Pr * \frac{D}{L} \quad (III - 11)$$

Si L, est la longueur du conduit

Pour la détermination du Nusselt, Nu, On procède comme suit :

1.3.1.1 En régime laminaire, nous avons choisi les deux corrélations de HAUSSEN suivantes :

- Pour : $Re \leq 2\,100$ et $Gz \leq 100$

$$Nu = 3.66 + \frac{0.085 \cdot Gz}{1 + 0.0047 Gz^{2/3}} \left[\frac{\mu_a}{\mu_p} \right]^{0.14} \quad (III - 12)$$

- Pour : $Re \leq 2\,100$ et $Gz > 100$

$$Nu = 1.86 Gz^{1/3} + 0.87 (1 + 0.015^{1/3}) \quad (III - 13)$$

1.3.1.2 En régime transitoire, nous avons appliqué la corrélation de HAUSSEN :

- Pour : $2\,100 < Re < 10\,000$

$$Nu = 0.116 \left\{ Re^{\frac{2}{3}} - 125 Pr^{\frac{1}{3}} \left(1 + \left(\frac{D^2}{l} \right) \right) \right\} \left[\frac{\mu_a}{\mu_p} \right]^{0.14} \quad (III - 14)$$

1.3.1.3 En régime turbulent, les formules utilisées ont été celles de SIEDER et TATE :

- Pour : $Re \geq 10\,000$

$$Nu = 0.023 Re^{\frac{2}{3}} Pr^{\frac{1}{3}} \left[\frac{\mu_a}{\mu_p} \right]^{0.14} \text{ pour } L/D > 60 \quad (III - 15)$$

Pour les faibles valeurs de L/D, il faut tenir compte des effets de bord à l'entrée en appliquant les corrélations suivantes :

- Pour $L/D \leq 60$

$$Nu = No \left(1 + F \frac{L}{D} \right) \quad (III - 16)$$

No , étant le nombre de Nusselt calculé pour $L/D > 60$ de la formule (III-14)

F, le facteur correctif égal à 6 par exemple pour une entrée avec contraction brusque ou demi- tour

Le terme $\left(\frac{\mu_a}{\mu_p} \right)^{0.14} \approx 1$ est négligé dans toutes ces relations, en rappelant que

μ_a et μ_p sont respectivement les viscosités dynamiques du fluide à sa température moyenne et à la température de la paroi.

Toutes les corrélations suscitées concernent des conduits uniformes de section circulaire. Ce qui n'est pas le cas pour notre insolateur au sein duquel le chauffage de l'air s'effectue dans un conduit parallélépipédique. Pour tenir compte de cette configuration exacte de l'insolateur, certains auteurs préconisent, toujours en régime turbulent :

La corrélation de KAYS, avec $L/D > 10$

$$Nu = 0.00158 \quad (III - 17)$$

L étant la longueur du conduit

La corrélation proposée par TAN et CHARTER [11]

$$Nu = 0,018Re^{0,8} Pr^{0,4}$$

$$Nu = Nu_0 \left\{ 1 + \frac{D}{L} \left(14,3 \log \frac{L}{D} - 7,9 \right) \right\} \quad si \quad 0 < \frac{L}{D} < 60 \quad (III-18)$$

$$Nu = Nu_0 \left\{ 1 + 17,5 \frac{D}{L} \right\} \quad si \quad \frac{L}{D} > 60 \quad (III-19)$$

$$Re = \frac{VD}{\gamma}$$

Où : γ , est la viscosité cinématique du fluide

V , la vitesse du fluide caloporteur

$Pr = (\mu cp) / (\lambda)$, le nombre de Prandtl

μ , la viscosité dynamique du fluide

Cp , la capacité calorifique du fluide

1.3.2 Conduction

Les coefficients d'échange par conduction se calculent par la formule générale :

$$h_{cd} = \frac{\lambda}{e} \quad (III - 20)$$

λ étant la conductivité thermique de l'élément considéré

e , l'épaisseur de l'élément

Dans notre cas, l'application de cette formule a abouti à :

- h_{cdv} dans la couverture transparente

$$h_{cdv} = \frac{\lambda v}{ev} \quad (III - 21)$$

- h_{cdi} dans l'isolant

$$h_{cdi} = \frac{\lambda i}{ei} \quad (III - 22)$$

1.3.3 Rayonnement

La quantité d'énergie quittant un corps sous forme de chaleur rayonnée dépend de la nature de ce corps, de sa température et de sa surface.

La loi de STEFAN-BOLTZMANN, obtenue par l'intégration de la formule de PLANCK sur l'ensemble du spectre rayonné [12], donne l'émittance d'un corps noir par :

$$M = \sigma T^4$$

σ : Constante de STEFAN-BOLTZMANN égale à $5,67.10^{-8}$ USI

T , la température du corps noir

Le flux d'énergie échangé par rayonnement entre deux surfaces grises S_1 et S_2 en échange mutuel l'une vers l'autre, de températures respectives T_1 et T_2 , et de coefficients d'émissivités respectifs ε_1 et ε_2 , est donné par :

$$\Phi_{12} = S_1 F'_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4) = S_2 F'_{21} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (III - 23)$$

F'_{12} , F'_{21} étant les facteurs de forme gris entre S_1 et S_2 , qui dépend des propriétés radiatives des matériaux F_{12} , le facteur de forme d'un corps noir

$$F'_{12} = \left[\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} * \frac{S_1}{S_2} \right]^{-1} \quad (III - 24)$$

$$\Phi_{12} = S_1 h r_{12} (T_1 - T_2) \quad (III - 25)$$

$$h r_{12} = F'_{12} \sigma (T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2) \quad (III - 26)$$

On a pris $S_1 = S_2$ et $F_{12} = 1$, pour les échanges dans l'insolateur, constitué des deux surfaces parallèles séparées par des distances faibles vis à vis de leurs dimensions.

Ce qui a réduit le facteur de forme gris à la relation suivante :

$$F'_{12} = \left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right]^{-1} \quad (III - 27)$$

Pour notre cas, les coefficients d'échange par rayonnement s'écrivent :

- h_{rnv} , entre l'absorbeur et la couverture transparente

$$h_{rnv} = \sigma \left[\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1 \right]^{-1} (T_p^2 + T_v^2) (T_p + T_v) \quad (III - 28)$$

- h_{rni} , entre l'absorbeur et l'isolant:

$$h_{rni} = \sigma \left[\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_i} - 1 \right]^{-1} (T_p^2 + T_i^2) (T_p + T_i) \quad (III - 29)$$

- h_{rvc} entre la voûte céleste et la couverture transparente

La voûte céleste de température T_c est considérée comme un corps noir (hypothèse générale), donc $\varepsilon_c = 1$.

Cette température T_c étant impossible à mesurer et son estimation a fait l'objet de nombreuses études qui ont abouti à des relations simples.

Nous retenons la relation de SWIMBANK

$$T_c = 0.0552 T_a^{1.5} (K) \quad (III - 30)$$

$$h_{rvc} = \sigma \varepsilon_v F_{vc} (T_{ve}^2 + T_c^2) (T_{ve} + T_c) \quad (III - 31)$$

Avec : ξ_v l'émissivité de la couverture

T_c , la température de la voûte céleste

F_{vc} , le facteur de forme géométrique de la surface considérée par rapport à la voûte céleste

$$F_{vc} = \frac{1 + \cos(s)}{2} \quad (III - 32)$$

s , étant l'inclinaison du système par rapport au plan horizontal

h_{rvs} , entre le sol et la couverture transparente

$$h_{r_{vs}} = \sigma \epsilon_v F_{vs} (T_{ve}^2 + T_s^2) (T_{ve} + T_s) \quad (III - 33)$$

Avec : T_s , la température du sol (K) qui est égale à la température ambiante T_a

F_{vs} , le facteur de forme géométrique de la surface considérée par rapport au sol

$$F_{vc} = \frac{1 - \cos(s)}{2} \quad (III - 34)$$

- h_{ris} , entre l'isolant et le sol

$$h_{r_{is}} = \sigma \epsilon_i F_{is} (T_{ie}^2 + T_s^2) (T_{ie} + T_s) \quad (III - 35)$$

$$F_{is} = \frac{1 - \cos(\pi - s)}{2} = \frac{1 + \cos(s)}{2} \quad (III - 36)$$

1.4 Equations de transfert

Le schéma électrique équivalent est donné par la figure 6 nous permet d'établir les équations traduisant le bilan thermique dans une section de l'insolateur

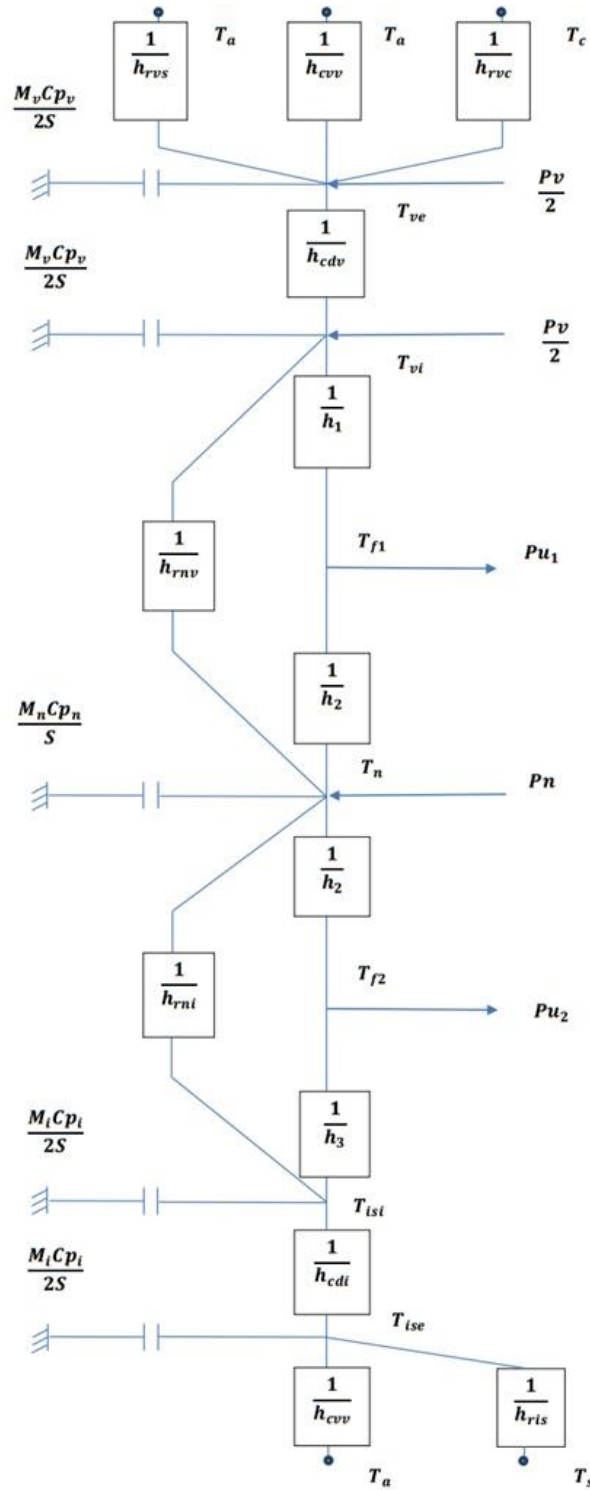


Figure N° 6: Schéma électrique équivalent relatif aux transferts thermiques dans une tranche de l'insolateur [2]

L'application de la loi des nœuds, exprimés par l'équation (III-2), aux différents nœuds du réseau électrique équivalent, donne pour la tranche d'indice i les équations suivantes :

- Nœud T_{ve} : vitre externe, si T^* est la température au temps $(t-\Delta t)$

$$\frac{M_v c p_v}{2\Delta S} \frac{T_{ve}^{(i)} - T_{ve}^{*(i)}}{\Delta t} = h_{rvv}(T_c - T_{ve}^{(i)}) + h_{cvv}(T_a - T_{ve}^{(i)}) + h_{rvs}(T_s - T_{ve}^{(i)}) + h_{cdv}(T_{vi}^{(i)} - T_{ve}^{(i)}) + \frac{Pv}{2} \quad (III - 37)$$

- Nœud T_{vi} : vitre interne

$$\frac{M_v c p_v}{2\Delta S} \frac{T_{vi}^{(i)} - T_{vi}^{*(i)}}{\Delta t} = h_{rvv}(T_n^{(i)} - T_{vi}^{(i)}) + h_1(T_{f1}^{(i-1)} - T_{vi}^{(i)}) + h_{rvs}(T_s - T_{ve}^{(i)}) + h_{cdv}(T_{ve}^{(i)} - T_{vi}^{(i)}) + \frac{Pv}{2} \quad (III - 38)$$

- Air dans le conduit supérieur :

$$\frac{m_a c p_a}{\Delta S} \frac{T_{f1}^{(i)} - T_{f1}^{(i-1)}}{\Delta t} = h_2(T_n^{(i)} - T_{f1}^{(i-1)}) + h_1(T_{vi}^{(i)} - T_{f1}^{(i-1)}) \quad (III - 39)$$

- Nœud T_n : Absorbeur

$$\frac{M_n c p_n}{\Delta S} \frac{T_n^{(i)} - T_p^{*(i)}}{\Delta t} = h_{rvv}(T_{vi}^{(i)} - T_n^{(i)}) + h_{rni}(T_{isi}^{(i)} - T_n^{(i)}) + h_2(T_{f1}^{(i-1)} - T_n^{(i)}) + h_2(T_{f2}^{(i-1)} - T_n^{(i)}) + Pn \quad (III - 40)$$

- Air dans le conduit inférieur :

$$\frac{m_a c p_a}{\Delta S} \frac{T_{f2}^{(i)} - T_{f2}^{(i-1)}}{\Delta t} = h_2(T_n^{(i)} - T_{f2}^{(i-1)}) + h_3(T_{isi}^{(i)} - T_{f2}^{(i-1)}) \quad (III - 41)$$

- Nœud T_{isi} : isolant interne

$$\frac{M_{is} c p_{is}}{2\Delta S} \frac{T_{isi}^{(i)} - T_{isi}^{*(i)}}{\Delta t} = h_{cdi}(T_{ise}^{(i)} - T_{isi}^{(i)}) + h_{rni}(T_n^{(i)} - T_{isi}^{(i)}) + h_3(T_{f2}^{(i-1)} - T_{isi}^{(i)}) \quad (III - 42)$$

- Nœud T_{ise} : isolant externe

$$\frac{M_{is} c p_{is}}{2\Delta S} \frac{T_{ise}^{(i)} - T_{ise}^{*(i)}}{\Delta t} = h_{cdi}(T_{isi}^{(i)} - T_{ise}^{(i)}) + h_{ris}(T_s - T_{ise}^{(i)}) + h_{cvv}(T_a - T_{ise}^{(i)}) \quad (III - 43)$$

2 MODELISATION DE L'ARMOIRE DE SECHAGE

2.1 Hypothèses simplificatrices

En plus des hypothèses générales mentionnées au paragraphe 1-1-1 du chapitre III nous avons posé les hypothèses simplificatrices suivantes pour l'armoire de séchage :

- les échanges radiatifs à l'intérieur du séchoir sont négligés ;

- les échanges thermiques relatifs aux claies sont négligés ;
- pour l'air asséchant, les échanges par convection sont prédominants par rapport à ceux par conduction ;
- la température et la teneur en eau sont supposées uniformes à l'intérieur du produit ;
- l'inertie thermique de l'air est négligeable ;
- les produits ne se déforment pas au cours du séchage ;
- les produits à sécher sont des sphères identiques ou des rondelles cylindriques.

En outre, nous avons traité directement le séchage en régime transitoire, puisqu'il est très rare de rencontrer une phase de séchage se produisant à vitesse constante.

2.2 Les échanges thermiques et massiques dans l'armoire de séchage

Le séchoir a été découpé en tranches fictives comprenant, chacune, une claie avec ses produits et les parois.

Les différents transferts thermiques et massiques intervenant dans la tranche du séchoir sont détaillés sur la figure suivante.

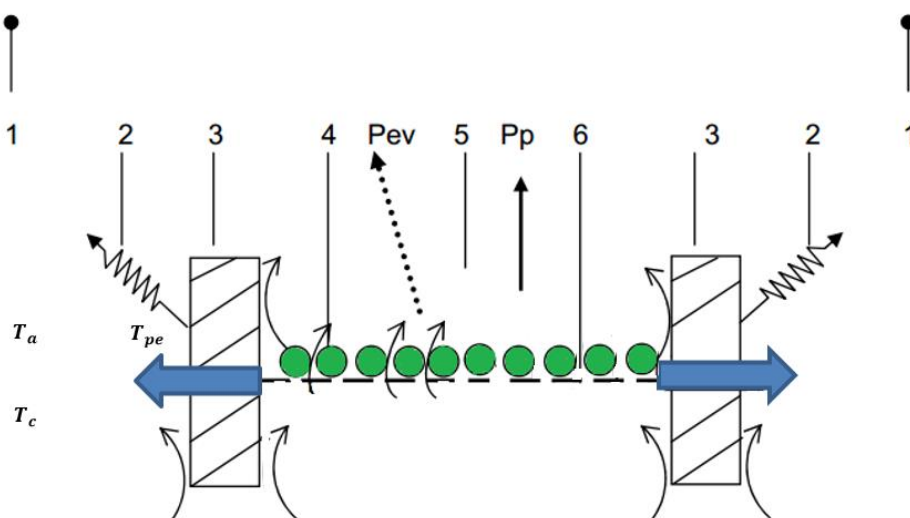


Figure N° 7: Les échanges thermiques dans une tranche de séchoir

- 1 : Voûte céleste
- 2 : Milieu ambiant
- 3 : Paroi
- 4 : Produit
- 5 : Milieu asséchant
- 6 : Claie

- ⚡— : transfert par rayonnement
- ▭ : transfert par conduction
- ⤵ : transfert par convection
- : Puissance cédée par l'air
- ⋯→ : Puissance perdue par évaporation

Les échanges décrits sur la figure précédente sont à la fois thermiques et massiques.

2.3 Echanges et coefficients d'échanges thermiques

2.3.1 Convection

- Entre l'extérieur et la paroi externe du séchoir : h_v

$$h_v = 5,67 + 3,86V_v \quad (W/m^2/K)$$

V_v étant la vitesse du vent (m/s)

- Entre l'air caloporteur et la paroi interne du séchoir : h_{cap}

$$h_{cap} = \frac{Nu * \lambda}{D} \quad (III - 44)$$

Où $D = H_s$ représente la hauteur du séchoir.

Il s'agit d'un écoulement forcé parallèle sur une plaque plane et nous avons pris les corrélations suivantes, pour calculer le nombre de Nusselt [12] :

En régime laminaire avec $Re < 10^5$

$$Nu = 0,66Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (III - 45)$$

En régime turbulent avec $Re > 10^5$

$$Nu = 0,66Re^{4/4} Pr^{1/3} \quad (III - 46)$$

- Entre l'air caloporteur et le produit: h_{caf}

$$h_{caf} = \frac{Nu * \lambda}{D_f} \quad (III - 47)$$

Où D_f : diamètre du produit

Pour notre cas, le produit à sécher a été assimilé à une sphère isolée dans un écoulement de vitesse V connue. Sa longueur caractéristique étant prise égale au diamètre moyen D_f , pour la détermination de h_{caf} , nous avons choisi la relation de CHARM [13] :

$$Nu = 0,37Re^{0,6} \quad (III - 48)$$

Avec

$$Re = \frac{V_{pf} * D_f}{\gamma_a} \quad (III - 49)$$

V_{pf} est la vitesse moyenne d'écoulement du fluide au niveau du produit

γ_a la viscosité cinématique de l'air

En réalité, le produit à sécher disposé sur la claie n'étant pas une sphère isolée car chaque claie était recouverte d'un nombre N_s de sphères. Ainsi, l'écoulement au niveau de chaque sphère

était influencé par les N_{s-1} autres. Par conséquent, la vitesse V_{pf} devait être définie en tenant compte de ces perturbations.

Pour une claie de volume défini par le parallélépipède de longueur L_c , de largeur l_c et de hauteur égale à D_f . Ce dernier étant le diamètre moyen du produit et son taux de remplissage est défini comme étant le rapport entre le volume occupé par le produit et celui du parallélépipédique précédant. Il s'ensuit que :

$$O_c = \frac{V_{tc} - V_f}{V_f} \quad (III - 50)$$

Avec O_c le taux de remplissage

$$V_{tc} = L_c \times l_c \times D_f$$

D_f : Le diamètre moyen du produit

V_f : Le volume occupé par les produits sur une claie de valeur égale à :

$$V_f = N_s \times V_{fi}$$

N_s : Le nombre de sphères disposées sur une claie

V_{fi} : Le volume de chaque sphère défini par :

$$V_{fi} = \frac{4}{3} \pi \frac{D_f^3}{2^3} \quad (III - 51)$$

V_{fi} : Le volume de chaque cylindre dans le cas où les produits sont des rondelles cylindriques

avec :

$$V_{fi} = \frac{\pi}{4} D^2 * e \quad (III - 51)$$

D : Le diamètre des rondelles

e : Épaisseur des rondelles

La vitesse de l'air au niveau du produit s'écrit :

$$V_{pf} = \frac{V}{O_c} \quad (III - 52)$$

Avec V , la vitesse du fluide à vide

La vitesse V_{pf} ainsi déterminée peut être considérée comme la vitesse moyenne au niveau du produit et est utilisée dans la relation de CHARM susmentionnée.

2.3.2 Conduction

Elle a lieu à travers les parois du séchoir et le coefficient d'échange correspondant s'écrit :

$$h_{cp} = \frac{\lambda p}{ep} \quad (III - 53)$$

λ_p , étant la conductibilité thermique de la paroi

e_p , l'épaisseur de la paroi

2.3.3 Rayonnement

Il se produit entre la paroi externe du séchoir et la voûte céleste.

Le coefficient d'échange a pour expression :

$$h_{rc} = \sigma \epsilon_p (T_{pe}^2 + T_c^2) (T_{pe} + T_c) \quad (III - 54)$$

ϵ_p étant l'émissivité de la paroi

T_{pe} , la température de la paroi sur sa face externe

2.4 Echanges massiques

Ces échanges ont eu lieu entre la surface du produit et l'air asséchant et se traduisent par une puissance évaporatrice notée par P_{ev} et égale au produit du taux de masse d'eau évaporée par la chaleur latente de vaporisation de l'eau. Il s'ensuit :

$$P_{ev} = m^* L_v \quad (III-55)$$

Avec m la vitesse de séchage du produit (Kg/s)

L_v : La chaleur latente massique de vaporisation de l'eau (J /Kg)

Pour la chaleur latente massique de vaporisation de l'eau L_v , nous avons adopté l'expression relative à l'évaporation de l'eau libre à la température T_f du produit

$$L_v = 4186,8(597 - 0,56T_f) \quad (J/Kg) \quad (III - 56)$$

T_f étant la température du produit

2.5 Expression de la vitesse de séchage

En général, la vitesse de séchage s'exprime sous la forme suivante :

$$\frac{dNs}{dt} = h_m [(h_r C_s(T_f) - C_v)] \quad (III - 57)$$

Avec h_m le coefficient d'échange massique global exprimé en kg d'eau/kg MS/s

$$h_m = \frac{h_i - h_e}{h_i + h_e} \quad (III - 58)$$

h_i : Le coefficient d'échange massique interne entre le fluide asséchant et le produit à sécher

h_e : Le coefficient d'échange massique externe entre le fluide asséchant et le produit à sécher

h_r : L'humidité relative de l'air asséchant en équilibre avec le produit

C_v : La fraction massique de vapeur d'eau dans l'air asséchant à l'entrée de la claie considéré

$Cs(T_f)$: fraction massique de la vapeur saturante à la température T_f du produit en Kg d'eau/Kg d'air humide, elle s'obtient :

Soit à partir de l'expression de la pression de vapeur saturante donnée par BERTRAND [14] :

$$P_{vs} = 10^{(17,443-2795/T_f-\log T_f)} \quad (III - 59)$$

D'où l'on en déduit :

$$Cs = \frac{0,622P_{vs}}{1 - 0,378P_{vs}}$$

Dans notre travail, en régime transitoire la fraction massique de vapeur au niveau de la surface est calculée à partir des isothermes de désorption-absorption.

Soit en l'exprimant par la formule, déduite de celle de BERTRAND qui provoque généralement une divergence rapide des calculs :

$$Cs(T_f) = A_0T_f^4 + A_1T_f^3 + A_2T_f^2 + A_3T_f + A_4 \quad (III - 60)$$

Avec T_f , exprimée en °C est entre 5°C et 65°C

$$A_0 = 9,10 * 10^{-9} K^{-1}$$

$$A_1 = -4,18 * 10^{-7} K^{-3}$$

$$A_2 = 2,75 * 10^{-5} K^{-2}$$

$$A_3 = 5,07 * 10^{-5} K^{-1}$$

$$A_4 = 4,54 * 10^{-3}$$

Pour la détermination de h_r , nous avons utilisé le modèle proposé par HENDERSON [17] suivant :

$$hr = 1 - e^{(-K*\overline{T}_f*Ns^n)} \quad (III - 61)$$

Avec:

Ns : humidité absolue du produit

$\overline{T}_f$ = température du produit exprimée en degré RANKIN

$$\overline{T}_f = 1,8T_f + 492$$

T_f étant en degré KELVIN

K et n des constantes, caractéristique, du produit, dépendant essentiellement de sa teneur en eau pour une température donnée.

2.6 Equations de fonctionnement

Le schéma électrique équivalent nous a permis d'établir les équations traduisant les bilans thermiques dans une section de l'unité de séchage.

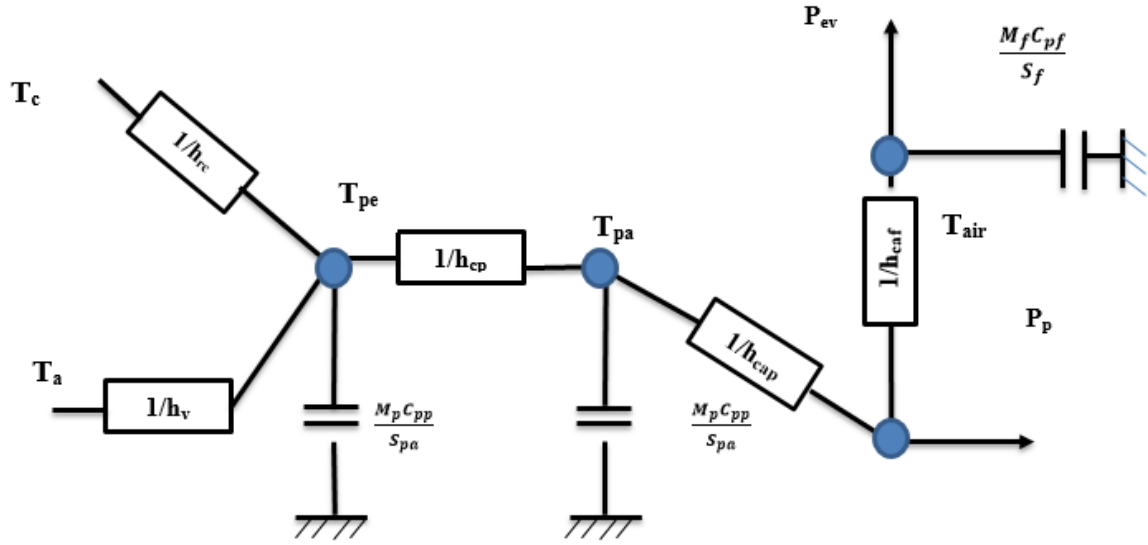


Figure N° 8: Schéma électrique équivalent relatif aux transferts thermiques dans une tranche de séchoir

Avec la mise en équation, nous avons abouti aux relations suivantes :

- Nœud T_f :

$$\frac{M_f c_{pf}}{S_f} \frac{T_f^{(i)} - T_f^{*(i)}}{\Delta t} = h_{caf} (T_{air}^{(i-1)} - T_f^{(i)}) - P_{ev} \quad (III - 62)$$

- Nœud T_{pi} :

$$\frac{M_p c_{pp}}{S_{pa}} \frac{T_{pi}^{(i)} - T_{pi}^{*(i)}}{\Delta t} = h_{cap} (T_{air}^{(i-1)} - T_{pi}^{(i)}) + h_{cp} (T_{pe}^{(i)} - T_{pi}^{(i)}) \quad (III - 63)$$

- Nœud T_{pe} :

$$\frac{M_p c_{pp}}{S_{pa}} \frac{T_{pe}^{(i)} - T_{pe}^{*(i)}}{\Delta t} = h_{rc} (T_c - T_{pe}^{(i)}) + h_{cp} (T_{pi}^{(i)} - T_{pe}^{(i)}) + h_v (T_a - T_{pe}^{(i)}) \quad (III - 64)$$

$P_{ev}^{(i)}$

$$= Lvm = Lv * hm * Sf(hr * Csat(Tf) - Cv) = Lv * \frac{h_l * h_e}{h_l + h_e} Sf(hr * Csat(Tf) - Cv) \quad (III - 65)$$

$$P_n^{(i)} = Sf * h_{caf} (T_{air}^{(i-1)} - T_f^{(i)}) + S_{pa} h_{cap} (T_{air}^{(i-1)} - T_{pi}^{(i)}) \quad (III - 66)$$

$$P_n^{(i)} = deb * C_{pa} (T_{air}^{(i)} - T_{pi}^{(i)}) \quad (III - 67)$$

Les modèles que nous avons présentés, seront destinés à évaluer les performances de notre système de séchage. La modélisation de l'enceinte de séchage, avec discrétisation de ses équations de fonctionnement, conduit à un système d'équations à nombre égale d'inconnues. Cela permettra de déterminer les paramètres comme : la variation des températures d'air et celle du produit à chaque instant et à chaque point de la chambre de séchage

CHAPITRE IV. DESCRIPTION DU SECHOIR

En exploitant les technologies utilisées pour la réalisation du prototype installé au CNRIT, notre but est de réaliser une unité de transformation de plantes médicinales et aromatiques, à vocation commerciale et industrielle. Nous avons choisi le séchoir solaire indirect qui permet de satisfaire des besoins très variables, tant quantitativement que qualitativement, répondant à la demande de la société PRONAMA (Produit Naturel Malagasy). Ainsi, différentes améliorations ont été apportées au sein de notre séchoir par rapport au prototype suscité, notamment au niveau de la capacité de production et des organes y afférents, telles que :

- Augmentation de volume utile de $1,2\text{m}^3$ à 6m^3 , permettant de traiter 40Kg de plante par cycle de séchage ;
- Diminution de la consommation électrique de l'installation par utilisation de deux ventilateurs centrifuges de $\frac{1}{2}$ Cv chacun, au lieu d'un ventilateur de 2 Cv ; et de deux résistances électriques de 1 600 Watt de puissance totale à la place de résistance de 2 000W

En effet le prototype du CNRIT ne possède que $1,2\text{m}^3$ de volume utile et se classe dans la catégorie de séchoir solaire artisanale tandis que le nôtre a un volume de 6m^3 .

1 VUE D'ENSEMBLE ET SCHEMA DE PRINCIPE DU SECHOIR CONSTRUIT

Notre but est de réaliser une unité de transformation de plantes médicinales et aromatiques, à vocation commerciale et industrielle. Ainsi nous avons choisi le séchoir solaire indirect qui permet de satisfaire des besoins très variables, tant quantitativement que qualitativement.

Le séchoir utilise l'énergie solaire comme source principale d'énergie. Il fait partie du groupe des séchoirs solaires à lumière indirecte et à ventilation forcée.

Ce choix réside par le fait que [CNRIT] :

- le séchage à l'abri du soleil donne des meilleurs résultats sur la qualité des produits agricoles par rapport à celui réalisé à la lumière directe. La couleur du produit obtenu reste plus brillante et plus proche de celle du produit frais et le contenu vitaminique reste quasi conservé.
- la ventilation forcée permet d'extraire une importante quantité d'humidité par rapport aux séchoirs solaires à convection naturelle de faible débit d'air asséchant.

L'unité de séchage est un ensemble comprenant les éléments essentiels suivants :

- un champ d'insolateurs ou capteurs solaires assurant la transformation des rayons solaires en chaleur ;
- une armoire de séchage dans laquelle sont disposés sur des claies les produits à sécher;

- un système de ventilation assurant la parfaite circulation de l'air asséchant ou le fluide caloporteur depuis le capteur vers l'armoire de séchage pour être refoulé à l'état d'air vicié vers l'extérieur ;

- un chauffage auxiliaire qui réchauffe l'air à la sortie des insolateurs lorsque leur température est inférieure à celle désirée.

Le séchoir est constitué par:

- six modules de capteurs,
- une armoire de séchage,
- deux résistances électriques,
- deux ventilateurs centrifuges

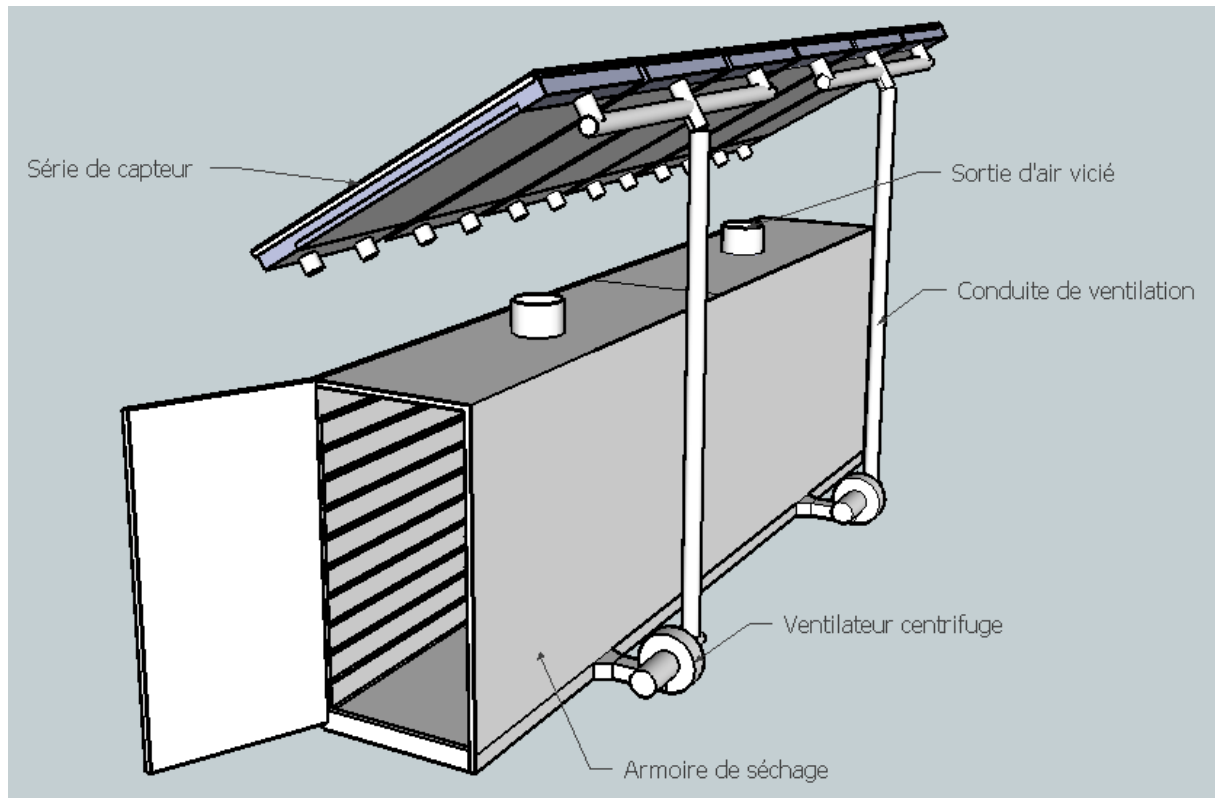


Figure N° 9: *Vue d'ensemble du séchoir*

2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

L'air atmosphérique chauffé par le groupe de capteurs est aspiré par deux ventilateurs centrifuges puis refoulé vers la partie basse du séchoir pour traverser ensuite les claies de l'armoire de séchage. Le flux de l'air est donc perpendiculaire à la surface des claies ce qui favorise les échanges thermiques entre les produits et l'air de séchage.

2.1 L'unité de production d'air chaud

2.1.1 Description

Elle est constituée de six capteurs du type simple vitrage et à double passe parallèle. L'air circulant au-dessus et en- dessous de l'absorbeur s'échauffe en contact de celui-ci.

En partant de la face exposée au soleil, chaque capteur comporte les éléments suivants :

- une couverture transparente en verre ordinaire de 4 mm d'épaisseur,
- un absorbeur opaque en tôle plane noire(TPN) peinte en noir mat,
- un support d'absorbeur en tôle galvanisée,
- un bac en tôle plane galvanisée (TPG) plié, contenant l'isolant en laine de verre de 5cm d'épaisseur, constituant ainsi l'isolation thermique des faces latérales et arrière du capteur du milieu extérieur.

Les dimensions d'un module de capteur sont de :

- longueur : 2,5m,
- largeur : 1m,
- épaisseur : 0.15m.

Soit au total, une surface de captation $S=15 \text{ m}^2$ pour les 6 capteurs.

2.1.2 Fonctionnement

L'insolateur orienté vers le nord et incliné 30° par rapport au plan horizontal, reçoit le rayonnement solaire qui traverse la couverture en verre. Cette dernière, ayant la faculté de laisser passer le rayonnement solaire et non pas l'infrarouge (IR), crée un effet de serre.

En effet, le rayonnement solaire frappant l'absorbeur est converti en chaleur qui est remis aux grandes longueurs d'onde dans le domaine IR.

L'air atmosphérique est chauffé par les six capteurs répartis en deux lots puis collecté à la sortie de ces derniers par un conduit cylindrique de 10 cm de diamètre. Deux ventilateurs centrifuges aspire l'air chaud et le propulse vers la partie inférieure de l'armoire de séchage, au niveau de l'emplacement de la source d'appoint.

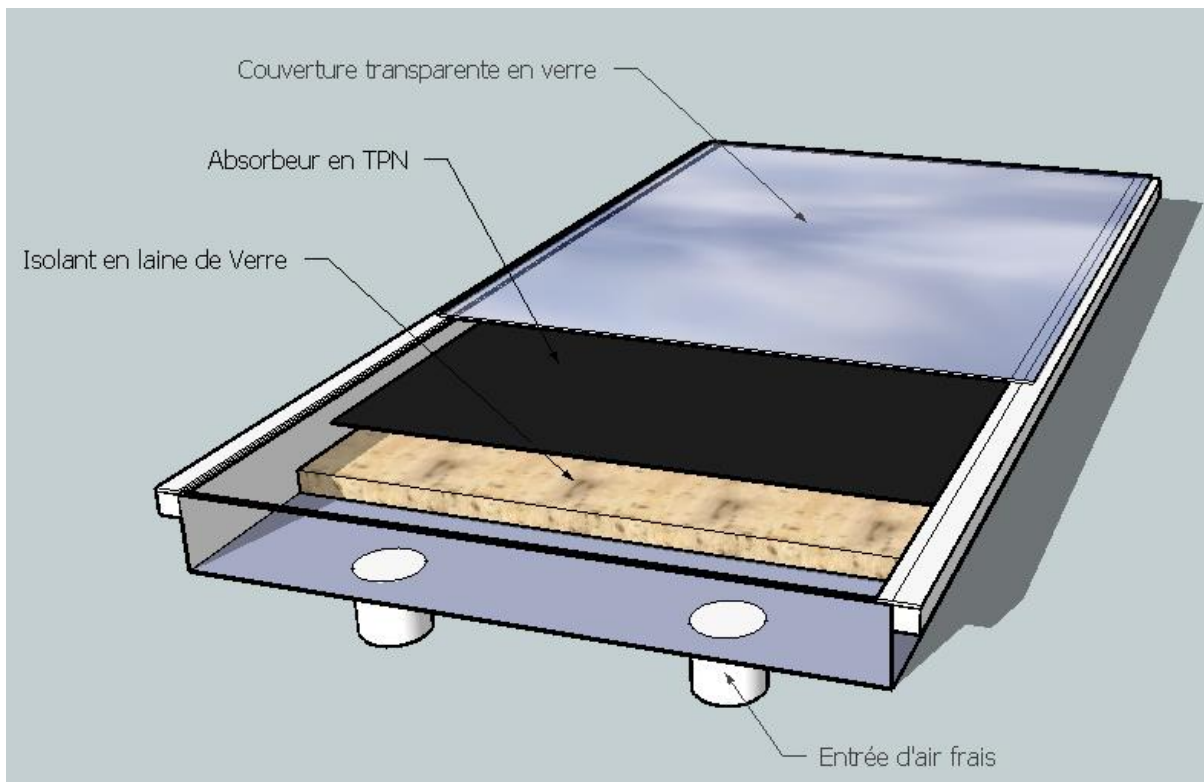


Figure N° 10: *Vue schématique de l'insolateur*

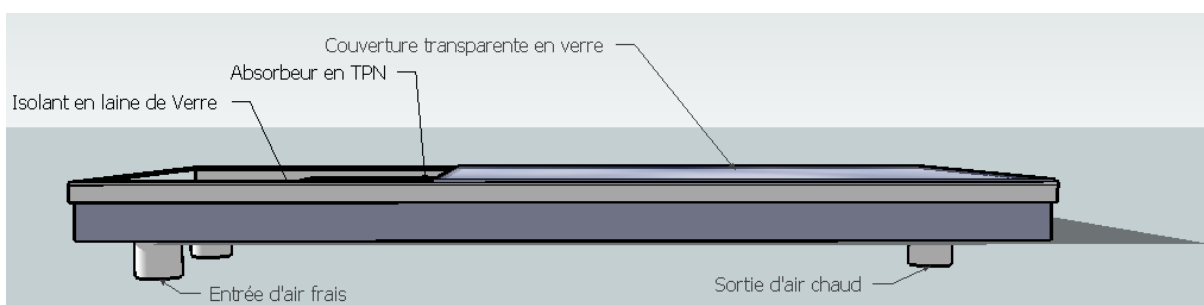


Figure N° 11: *Vue de profil de l'insolateur*

2.2 L'unité de séchage

2.2.1 Description

L'unité de séchage est composée de l'armoire de séchage de forme parallélépipédique vertical, dont les dimensions intérieures sont :

- hauteur $H= 2\text{m}$,
- longueur $L= 3\text{m}$,
- largeur $l=1\text{m}$,

L'armoire de séchage est confectionnée avec des panneaux composites d'ossature principale en tube carré de 30 mm. La partie externe de cette armoire est construite avec de la tôle plane galvanisée (TPG) tandis que la face interne, en contact avec les produits à sécher est en tôle plane aluminium

(TPA). Une épaisseur de 2.5cm de laine de verre prise en sandwich entre ces tôles, isole l'ensemble du milieu extérieur.

Une portière isolée ferme une face latérale de l'armoire servant ainsi au chargement et au déchargement des produits. La fermeture de la portière doit être étanche, pour que l'air de séchage ne puisse pas sortir par des fentes sans avoir traversé le produit. On utilisera des joints autocollants en caoutchouc sur les bords pour assurer cette étanchéité.

La partie haute de l'armoire sont aménagés deux trous assurant l'évacuation de l'air vicié vers l'extérieur du séchoir.

L'armoire a été conçue pour faciliter les opérations de chargement et déchargement des produits ainsi que les éventuels travaux de nettoyage.

Au niveau de deux faces opposées intérieures de l'armoire, des supports de claies en corniers d'aluminium ont été fixés pour offrir aux dix étages de contenance de 120 claies de 0,9x0, 5m, une aire d'épandage totale de 54 m².

Les claies servent à soutenir le produit tout en permettant le passage de l'air. Elles sont réalisées avec des profilés en bois assemblé entre eux pour former un rectangle.

Le fond de ce rectangle est constitué par un filet de mailles carrées, type moustiquaire, tendu aux profilés latéraux, sur lequel on étalera les produits à sécher. Le filet ne doit pas être trop fin, pour ne pas ralentir le flux d'air.

Afin d'assurer une bonne répartition de l'air dans l'armoire de séchage un espace a été aménagé à sa partie basse. Un diffuseur de flux est placé dans la partie basse de la chambre de séchage.

Cet important élément intercepte le flux d'air chaud après que celui-ci ait traversé les capteurs solaires et les conduites de ventilations. Le diffuseur a pour rôle de distribuer uniformément l'air dans la cabine de séchage. En effet l'air arrive du capteur solaire par l'intermédiaire d'une conduite cylindrique en PVC, à une vitesse d'environ 2 mètres par seconde en direction presque horizontale.

Pour obtenir un séchage convenable et uniforme il faut que ce flux circulaire devienne carré, large comme la cabine de séchage et vertical.

Le diffuseur est composé par une surface trouée, à travers laquelle l'air provenant du capteur solaire passe et devient un flux uniforme et également distribué. Il doit bien adhérer à la paroi externe de la cabine pour éviter que de l'air ne s'échappe sur les côtés.

Pour l'hygiène, le plateau diffuseur confectionné avec de la tôle plane inoxydable, doit être amovible afin de faciliter son extraction du séchoir pour le nettoyage.

La source de chaleur d'appoint est assurée par deux résistances électriques à ailettes de 800W chacun, pilotée par un régulateur de température (plage de température 20-120°C).

Ce dispositif permet de régler la température réelle de l'air entrant dans l'armoire de séchage, où les produits à sécher sont disposés en couches minces de 2,5 à 3,5 cm sur les claies.

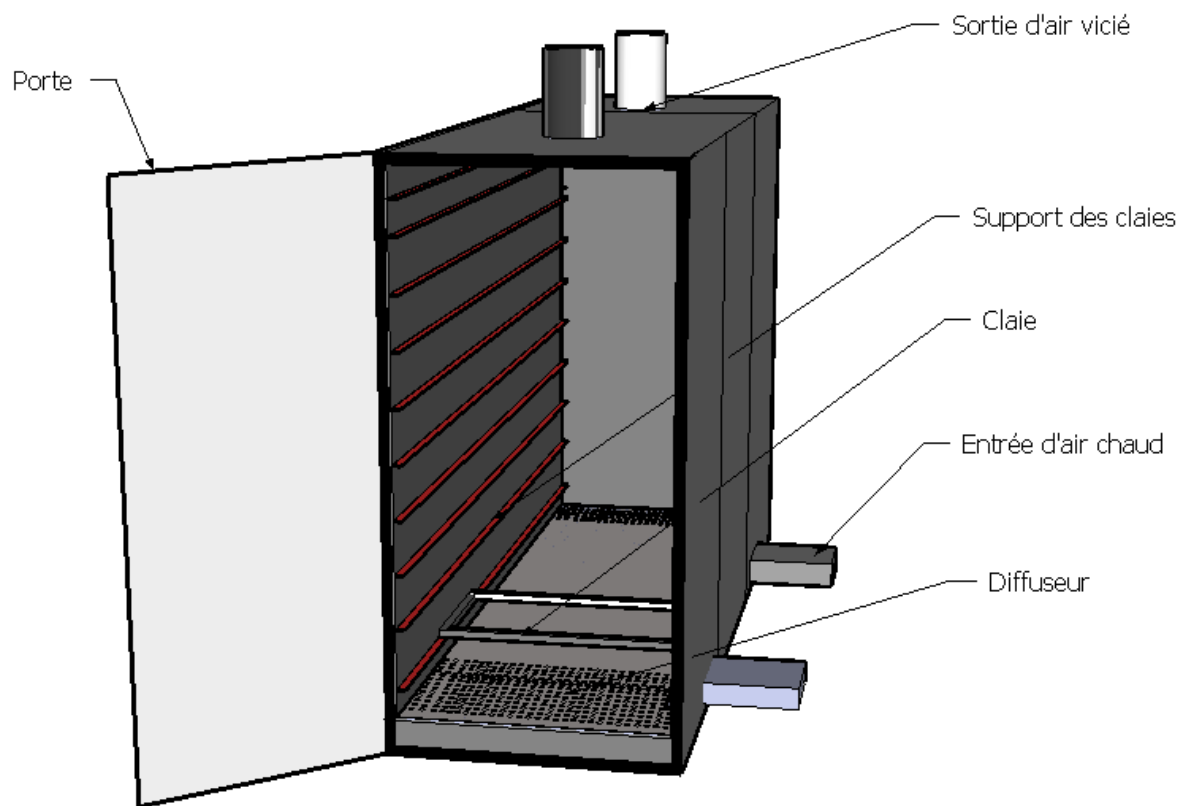


Figure N° 12: Armoire de séchage

2.2.2 Fonctionnement

L'air refoulé par le ventilateur pénètre dans le séchoir par sa partie basse. La batterie de résistance assure un appoint calorifique éventuel suivant le réglage de la température de consigne et l'ensoleillement. L'air ascendant traverse les produits et sort par les trous d'évacuation d'air vicié. Les ventilateurs ont été conçus pour assurer une vitesse de l'air dans la chambre de séchage de l'ordre de 1,5 à 2m/s, selon l'encombrement des claies.

2.3 Le système de ventilation

Cet ensemble reliant l'unité de production d'air chaud avec l'unité de séchage comprend les deux ventilateurs et les conduites :

- les ventilateurs sont du type centrifuge, actionnés chacun par un moteur monophasé de : 220V, N=1500t/mn, P=370W. Ces ventilateurs jouent un rôle très important pour le fonctionnement du séchoir. Ils assurent la circulation et le brassage de l'air par convection forcée de l'insolateur à l'armoire de séchage. Ils sont liés à la chambre de séchage au niveau de l'antichambre, sous le plateau diffuseur ;
- les conduites sont des éléments constitués des tuyaux PVC de 100 mm de diamètre, des genres T et des coudes, assurant les fonctionnements couplés des ventilateurs et des deux groupes de capteurs solaires.

CHAPITRE V. LES ETAPES DE LA REALISATION DU SECHOIR

1 LES MATERIAUX UTILISES ET LE MODE D'ASSEMBLAGE

Pour la confection des principaux éléments constitutifs du séchoir nous avons utilisé les matériaux suivants :

1.1 Les Capteurs solaire

- ossature principale : tube carré de 30mm,
- couverture transparente : verre ordinaire de 6 mm d'épaisseur,
- absorbeur : tôle plane noire(TPN) de 8/10 de mm,
- support d'absorbeur : tôle plane galvanisée (TPG) 8/10 de mm,
- faces latérales et arrière du capteur : tôle plane galvanisée de 8/10 de mm,
- Isolant thermique : laine de verre.

1.2 L'armoire de séchage

- ossature principale : tube carré de 30mm,
- revêtement extérieur : tôle plane galvanisée (TPG) de 8/10 de mm,
- revêtement intérieur : tôle plane aluminium (TPA) de 8/10 de mm,
- Isolant thermique : laine de verre.

1.3 Les claies

- ossature : cadre en profilés en bois
- fond : filet de mailles carrées, type moustiquaire,
- support des claies : cornière aluminium de 30.

1.4 Le système de ventilation

- ventilateur : type centrifuge,
- moteur : marque Leroy Somer, 220V, N=1500t/mn., P=370W,
- conduites aérauliques : Tuyau PVC de 100mm, coude, Té.

1.5 Mode d'assemblage

1.5.1 Capteur solaire

- débitage et soudure de l'ossature en tube carré de 30mm,
- découpage, pliage et rivetage de la TPG (faces latérales et arrière du capteur) avec l'ossature,
- fixation de l'absorbeur et son support avec l'ensemble,

- pose de la couverture transparente à l'aide des joints plastiques autocollants surmontés de joint métallique,
- mise en place de la couche d'isolant entre le support d'absorbeur et le bac en (TPG) constituant les faces latérales et arrière du capteur du milieu extérieur.



Figure N° 13: *Les capteurs solaires chez PRONAMA*

1.5.2 Armoire de séchage et claies

- débitage et soudure de l'ossature parallélépipédique en tube carré de 30mm,
- découpage, pliage et rivetage de la TPG (face externe de l'armoire) avec l'ossature,
- découpage, pliage et rivetage de la TPA (face interne de l'armoire) avec l'ossature,
- débitage et assemblage des profilés en bois servant de claies,
- débitage fixation des supports des claies au niveau de deux faces opposées intérieures de l'armoire.



Figure N° 14: *L'armoire de séchage et les claies chez PRONAMA*

1.5.3 Système de ventilation

- confection du ventilateur centrifuge (volute, pales, moteur),
- assemblage du ventilateur avec l'armoire de séchage (éléments boulonnés),
- mise en place et fixation des conduites en PVC reliant l'ensemble Capteur-Ventilateur-Armoire.



Figure N° 15: *Le ventilateur centrifuge et moteur utilisés dans notre installation*



Figure N° 16: *Les conduites de ventilation*



Figure N° 17: *Le collecteur d'air chaud à la sortie des capteurs*

2 SYSTEME DE VENTILLATION :

La conception d'une installation de ventilation est une opération délicate, dans laquelle interviennent des nombreux facteurs techniques et énergétiques. Elle nécessite de la part du concepteur une connaissance parfaite du local à traiter ainsi que la maîtrise des différentes techniques mise à sa disposition pour bien mener à bout l'installation. Cela nécessite la prise en considération du captage, les réseaux de transport, les ventilateurs.

2.1 Débit d'air nécessaire au séchage :

Le débit d'air à introduire dans l'armoire de séchage dépend fortement de l'utilisation de ce local. Nombreux sont les formules que nous pourrions utiliser selon les différents critères de sélection. Mais nous allons nous baser sur le débit d'air nécessaire pour l'évacuation des vapeurs d'eau, par la formule suivante [3] :

$$Q = \frac{G}{(x_1 - x_2) \cdot \rho} \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad (V - 1)$$

Avec :

G : quantité de vapeur d'eau en [g/kg] d'air

X₁ : teneur en eau de l'air extrait en [g/kg] d'air

X₂ : teneur en eau de l'air insufflé en [g/kg] d'air

ρ : densité de l'air en [kg/m³]

2.2 Perte de charge :

Comme notre installation comporte des ventilateurs, des conduites lisses et des coudes. Tous ces éléments pourraient présenter des pertes de charges qui sont un facteur déterminant dans la sélection du ventilateur adéquat à l'installation.

2.2.1 Perte de charge régulière :

La perte linéique se traduit par la formule suivante [3] :

$$P_{lin} = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{\rho V^2}{2} \cdot L [Pa] \quad (V - 2)$$

Avec :

λ : Viscosité de l'air [kg/m³] = 1.61.10⁻⁵

D : diamètre de la conduite en [mm]

ρ : densité de l'air

V : vitesse de l'air circulant dans la conduite [m/s]

En prenant $V = \frac{Q}{S}$ et $S = \left(\frac{D}{2}\right) \times \pi$ On aboutit à une autre forme de la formule :

$$P_{lin} = \frac{8\lambda}{\pi^2} \cdot \frac{Q^2}{D^5} [Pa] \quad (V - 3)$$

Avec :

Q : débit d'air en [m³/h]

S : section de la conduite [m²]

2.2.2 Perte de charge singulière ou perte de charge dans les pièces de formes :

Les pertes de charges [Pa] dans les coudes se traduisent par la formule suivante [1] :

$$P_f = K \cdot \frac{\rho}{2} V^2 \quad (V - 4)$$

Et l'expression : $P_d = \frac{\rho}{2} V^2$ est appelée pression dynamique des conduites.

Avec :

K : coefficient de perte de charge singulière. K= 1

La figure ci-dessous nous aide à faire le choix de K.

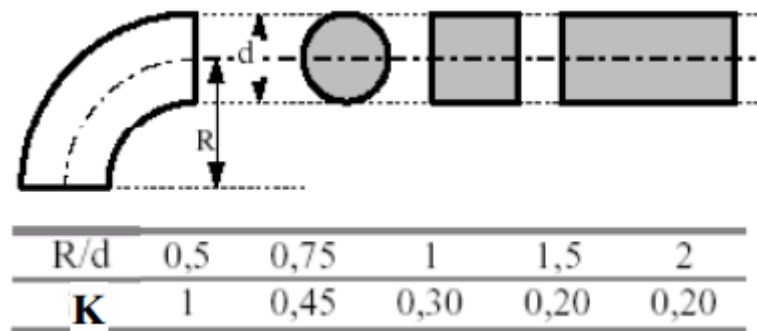


Figure N° 18: Valeurs du coefficient de perte de charge K [1]

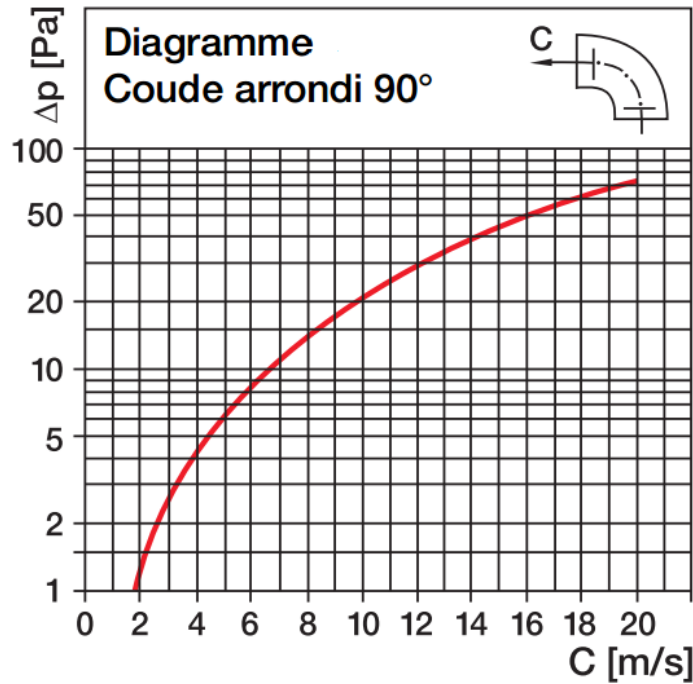


Figure N° 19: Perte de charge en fonction de la vitesse [1]

2.2.3 Les pertes de charges totales dans les conduites :

La perte de charge totale est la somme des pertes dans les conduites et celles des pertes dans les coudes ou conduite de formes. Elle est donnée par la formule suivante :

$$P_{tot} = P_{sin} + P_f + P_d \quad (V - 5)$$

En connaissant les différentes pertes dans le réseau, nous pouvons maintenant en-déduire la puissance de l'arbre qu'il nous faut, pour faire tourner le ventilateur à la vitesse pouvant assurer le débit que nous voulons avoir. Elle s'exprime par la formule :

$$P_w = \frac{Q \cdot P_{tot}}{1000 \cdot \eta} [kW] \quad (V - 6)$$

2.3 Choix de ventilateur :

Pour notre installation nous avons opté pour l'utilisation d'un ventilateur centrifuge, dont les aubes sont inclinées vers l'avant. Le passage de l'air caloporteur à travers les produits à sécher est uniforme et perpendiculaire grâce à l'antichambre sous le plateau diffuseur. L'aspiration de l'air se fait axialement et refoulement radiale. Ce choix de ventilateur réside en ses critères suivants :

- facilité de montage,
- faible coût d'investissement,
- moins de bruit,
- bon rendement

2.3.1 Nombre d'aubes

Pour un ventilateur centrifuge, il est important de connaître le nombre des aubes qu'on devrait monter avec la roue. Pour se faire, nous avons utilisé la formule suivante pour son calcul :

$$z = 6.5 \left(\frac{D_2 + D_1}{D_2 - D_1} \right) \sin \left(\frac{\beta_{b2} + \beta_{b1}}{2} \right) \quad (V - 7)$$

Avec :

D_1 : diamètre interne de la roue,

D_2 ; diamètre externe de la roue,

β_{b1} : L'angle entre la tangente au cercle à l'intérieur par rapport au vecteur vitesse relative,

U : vitesse d'entraînement,

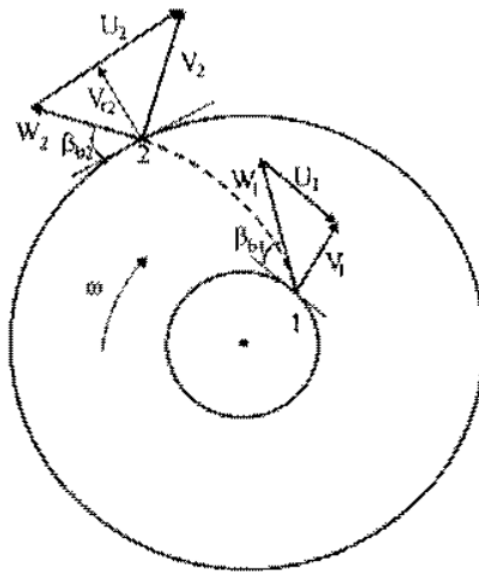
V : vitesse absolu.

W : vitesse relative

Ce sont les trois vecteurs, qui forment le triangle de vitesse à la base et à chaque bout d'aube.

Dans notre cas, nous avons pris $D_1=180$, $D_2=180$, $\beta_{b1} = 14^\circ$ et $\beta_{b2} = 20^\circ$

Après calcul, nous avons trouvé le nombre des aubes à **Z= 36** Aubes



Source : Les ventilateurs en Génie Climatique
Figure N° 20: Triangle de vitesse

Pour notre cas, l'unité de séchage requiert une vitesse de ventilation de 2 à 2,5 [m/s] et un débit d'air de 500 à 700 [m³/h].

Ce qui nous conduit à choisir un ventilateur à action de 20[cm] de diamètre, fixé à l'arbre du moteur et munie de 36 aubages incliné vers l'avant.



Figure N° 21: Ventilateur centrifuge et ses aubes [Auteur]

2.3.2 Volute

Avant de dimensionner la volute, il est nécessaire de connaître la vitesse absolue au bout de l'aube. Nous avons alors la formule :

$$Vu_2 = \frac{r_1 \cdot Vu_1}{r_2} = 2.22[m/s] \quad (V - 8)$$

Pour notre installation, la volute joue un rôle important, au niveau de la circulation d'air chaud. Non seulement, elle sert pour protéger le ventilateur, mais participe aussi à la conduite et à la circulation de l'air.

En supposant que le Moment angulaire d'écoulement est constant. On a alors :

$$r_c \cdot V_\theta = Cr_2 Vu_2 = CL \quad (V - 9)$$

La valeur théorique de la surface A_θ s'exprime par la formule suivante :

$$\frac{A_\theta}{r_c} = \frac{Q\theta}{2\pi CL} \quad (V - 10)$$

Avec :

Q : débit du diffuseur,

r_c : Rayon de la volute et $r_c = r_3 + x_c$

L : Moment angulaire à la sortie de la roue

Et que : $L = R_2 Vu_2$

Comme la section de notre volute est trapézoïdale, alors la surface A_θ peut s'exprimer :

$$A_{\theta} = \frac{h(a+b)}{2} \quad (V-11)$$

Alors :

$$A_{\theta} = h \frac{(a+b)}{2} = \frac{(r_3 + x_c)Q\theta}{2\pi Cr_2 V u_2} \quad (V-12)$$

D'après cette équation, nous pouvons tirer la valeur de h .

D'où

$$h = \frac{(r_3 + x_c)Q\theta}{\pi Cr_2 V u_2 (a+b)} \quad (V-13)$$

Pour avoir les rayons de notre volute, nous avons fait le calcul, en changeant l'angle Θ . Et nous avons eu comme résultat, ce tableau.

Tableau N°2: *Caractéristique de la volute*

Angle de la volute	0	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
Rayon de la volute	105	112	118	125	132	139	145	152	159

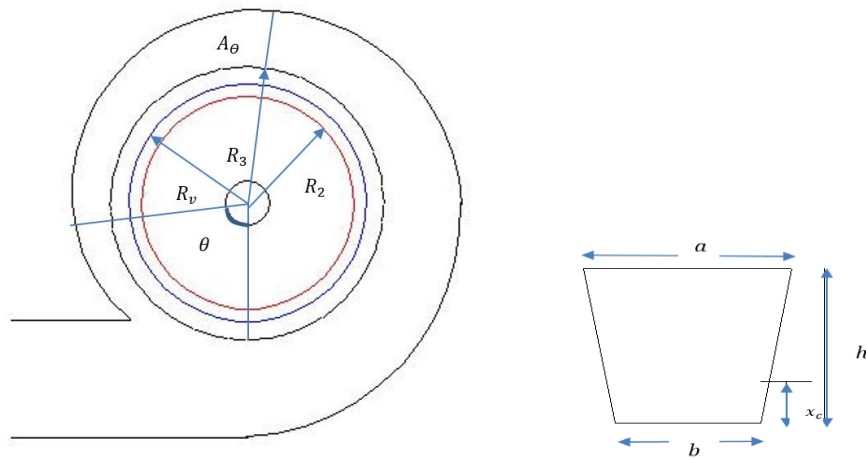


Figure N° 22: Volute

2.4 Choix du moteur :

Le moteur joue un rôle très important pour notre unité de séchage. En effet, c'est le moteur couplé avec le ventilateur centrifuge qui assure la circulation de l'air asséchant durant le processus de séchage. Le site d'implantation de notre séchoir étant au siège de la société PRONAMA sise à Ambohimamory Itaosy. Actuellement le réseau alternatif monophasé de la JIRAMA est le seul disponible. Ainsi notre choix s'est porté sur un moteur asynchrone à courant alternatif monophasé, dont les caractéristiques sont les suivantes :

Tableau N°3: *Caractéristique du moteur [5]*

Nombre de pôles	Puissance [W]	Vitesse en [tr/min]	Couple nominal [Nm]	Intensité nominale en [A]	Facteur de puissance $\cos \varphi$	Rendement en %	Masse en [kg]
4 Pôles	370	1350	2.66	2.90	0.85	63	8



Figure N° 23: *Unité de ventilation*

Outre les caractéristiques du ventilateur, le moteur a été choisi selon les critères suivants :

2.4.1 Mode de fonctionnement :

Le processus de séchage exige un fonctionnement continu du moteur. Ce dernier travail à charge constante nominal par cycle de séchage qui dure 4 heures environ. Ce qui nous conduit à opter pour un moteur à service continu de type S1 (Nombre de démarrage équivalent par heure ≤ 6).

2.4.2 Position du moteur

Le moteur de type IM 1001 est disposé d'une façon horizontale et fixé par boulons avec la volute au niveau de ses pattes de fixation selon la norme EN 60034-7.

2.4.3 Indice de protection

L'indice de protection du moteur selon la norme CEI 34-5 est IP 55. Le moteur est protégé contre les poussières et toute sorte de dépôt nuisible qui pourra nuire à son bon fonctionnement.

3 INSTALLATIONS ET EQUIPEMENTS ELECTRIQUES

Le choix des équipements et installations électriques s'est basé sur les caractéristiques du moteur et ses accessoires prédéfinis.

3.1 Commandes électriques [53]

3.1.1 Les boutons

Les boutons poussoirs sont installés sur le tableau de commande pour envoyer les ordres de démarrage et arrêt du séchoir. Nous avons utilisé 2 boutons poussoir à impulsion de marque Télémécanique pour commander la marche et l'arrêt du moteur.



Figure N° 24: Bouton marche-arrêt

3.1.2 Bornier

Il assure le raccordement des différentes connexions qui se présente au tableau de commande. On l'utilise pour la liaison des fils d'alimentation du moteur et tous ce qui concerne le câblage. La fixation de ce bornier sur le rail est par clipsage. Sa tension assignée est de $U_i = 500 \text{ VCA}$



Figure N° 25: Bornier

3.1.3 Disjoncteur interrupteur

Ces appareils assurent la fermeture et l'ouverture des circuits. Ils protègent en même temps l'utilisateur contre d'éventuel court-circuit.



Figure N° 26: Disjoncteur différentiel

3.1.4 Disjoncteur de distribution

Pour les circuits d'alimentation de notre installation, nous avons utilisé un disjoncteur magnétothermique capable de supporter un courant de 25A.



Figure N° 27: Disjoncteur de distribution

3.1.5 Disjoncteur moteur

Pour notre moteur, nous prévoyons d'utiliser un disjoncteur GV2 ME pouvant supporter un courant d'utilisation de 17 à 32 A. Car la puissance de notre moteur est de 370 W et alimenté par un courant de 2.5 A.

Un disjoncteur est utilisé pour :

- protéger contre le court-circuit,
- protéger contre les surcharges qui peuvent endommager les enroulements du moteur et les circuits,
- interrompre l'alimentation en électricité, dans le cas d'un arrêt d'urgence,
- isoler les circuits de leurs sources d'énergie de manière sûre, afin d'assurer la protection des personnes et des autres matériels.



Figure N° 28: *Disjoncteur moteur*

3.1.6 Relais thermique

Le relais thermique protège l'appareil monté en aval contre les surcharges et la coupure de phase. C'est pour cela qu'il surveille en permanence l'état du courant qui circule dans le récepteur.



Figure N° 29: *Relais thermiques*

3.1.7 Lampes et voyants

Les lampes sont utilisées pour la signalisation de la marche ou l'arrêt de la machine. Elles nous indiqueront aussi le système d'alimentation utilisé : photovoltaïque ou celui du réseau de la JIRAMA.

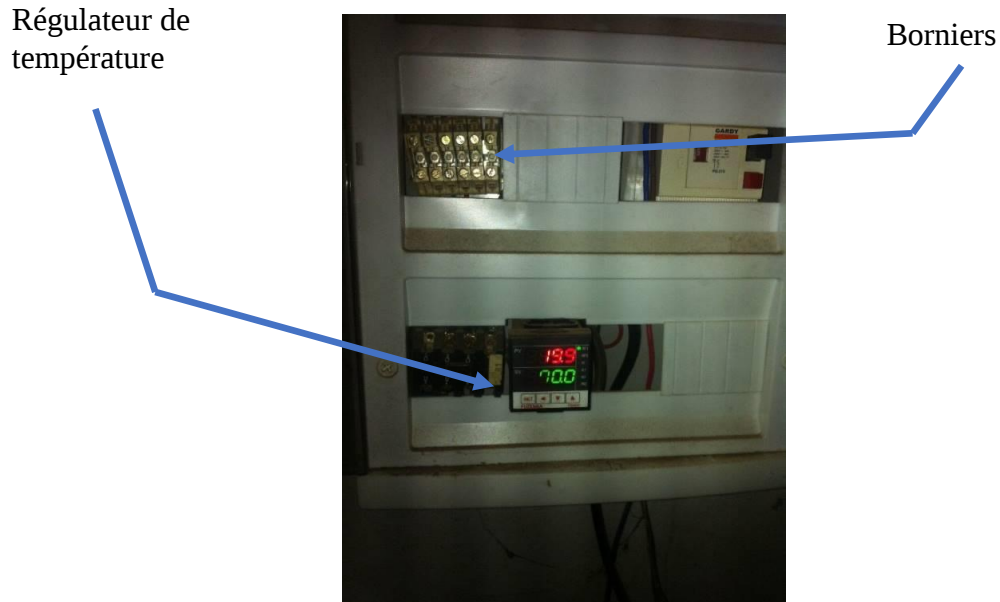


Figure N° 30: *Voyant lumineux*

3.1.8 Régulateur de température

C'est un dispositif qui permet de contrôler automatiquement la température dans l'armoire de séchage

Figure N° 31: Régulateur de température



3.2 Résistance électriques d'appoint

Des résistances à ailettes commandées par un régulateur de température permettent de garder en permanence la température de consigne de séchage au cas où la température dans l'armoire de séchage n'est pas suffisante.

Tableau N°4: Caractéristiques du résistance à ailettes

Puissance utile	800W
Courant utile	3.6A
Poids	3.3kg



Figure N° 32: Résistance à ailettes

CHAPITRE VI. EXPERIMENTATION DU SECHOIR

Dans ce chapitre, nous allons essayer de rechercher les conditions optimales d'utilisation et d'exploitation du séchoir solaire par des essais de séchages deux variétés de plantes médicinales.

1 CARACTERISTIQUES DES PRODUITS EXPERIMENTES

1.1 Le *Drosera Ramentacea* (Matanando)

En prenant le sens étymologique de la plante, le nom *Drosera* vient du mot Grec « drosos », qui signifie la rosée. Cette appellation est due à la présence des petites gouttelettes secrétées par les poils de la plante, brillant au soleil. Et la seconde partie de son nom vient du mot Latin « racemosa », signifiant une plate à queue.

1.1.1 *Caractères botaniques*

Le *Drosera Ramentacea* est une petite plante carnivore assez commune à Madagascar dans les dépressions tourbeuses des vallées de montagne, sur les roches suintant, parmi les mousses, les fougères et les orchidées. Les feuilles sont disposées en rosettes à la base dans la hampe florale. Elles sont bordées de plusieurs rangées de poils sécréteurs mobiles, qui se replient au moindre attouchement, emprisonnant ainsi tout insecte qui se pose. L'insecte en se débattant entraîne une sécrétion d'enzymes protéolytiques qui entraîne sa décomposition, donnant ainsi un surcroît d'aliment à la plante qui pousse dans le milieu pauvres en élément nutritif. Ces plantes sont colorées en rouge par de anthocyanes.



Source : Auteur

Figure N° 33: *Drosera Ramentacea* (Matanando)

1.1.2 Utilisation et vertu

La plante offre des propriétés antiseptiques, antispasmodique, un béchique (calmer la toux) et un fébrifuge comme usage interne. Son usage est recommandé en cas des toux sèches ou irritatives, d'asthme, de coqueluche ou d'enrouement.

Elle est aussi utilisée pour traiter la tuberculose pulmonaire ainsi que pour guérir les maux de gorge.

1.2 Le Centella Asiatica(Talapetraka)

La plante *Centella Asiatica* est une plante vivace grimpante de petite dimension, qui va de 10 à 50[cm]. Cette plante semble être connue depuis très longtemps, mais c'était en 1936 que Pierre Boiteau l'avait identifié comme étant parmi les six plantes utilisées à la léproserie de Manakavaly par le docteur Grimes.

1.2.1 Caractères botaniques

La plante *Centella Asiatica* fait partie de la famille d'Apiaceae et possède des nombreux noms vernaculaires comme : l'herbe Boileau, herbe du tigre, et de l'éléphant, Anamanitra, Talapetraka ou Loviantsahontanety.

Certaines conditions climatiques sont à souligner pour son développement. La végétation de la plante est favorable de 10 à 20°C° et un excès de température ($T > 25^{\circ}\text{C}$) ramollit la plante et l'empêche de se développer normalement. De plus l'eau est un facteur limitant sa culture. Elle exige plus de 4mm d'eau par jour tout au long de son cycle végétatif : donc besoin en eau élevée, c'est-à-dire plus de 1 000mm de pluies pendant les 6 mois de végétation, soit plus de 2 000mm de pluie durant une année en considérant la culture hivernale. Par contre, le *Centella* craint une trop forte pluviosité $P > 2\,500\text{mm}$, provoquerai une pourriture à la base du collet entraînant la mort de la plante.

Les feuilles ont une forme de rein et sont insérées en rosette sur une tige plus ou moins courte. Elles sont à pétiole long verticale de 2 à 4cm sur les rameaux florifères, atteignant 10 à 12cm sur les rameaux stériles, d'où le pétiole, qui en générale est 5 à 8 fois plus long que la feuille.

Les racines du *Centella Asiatica* sont très nombreuses et adventives. Elles sont longues et fines.

Le *Centella* est une plante hermaphrodite et ses fleurs sont de couleur jaune. Elle présente de bourgeons axillaires, développés en bouquet de feuilles dressées qui se terminent par une petite inflorescence.

Ces fruits sont secs et larges de 3 à 4mm, orbiculaire, disciforme, glabre et indéhiscent. Tandis que, les graines sont presque arrondies de 2 à 3 mm de diamètre et possède un dur péricarpe.



Source : Auteur

Figure N° 34: *Centella Asiatica (Talapetraka)*

1.2.2 Caractéristiques physico-chimiques [4]

PRINCIPAUX GROUPES	COMPOSANTS CHIMIQUE
L'huile essentielle (0.1% de la plante)	Acétate de terpène Germacrène Caryophyllée p-Cimol Pinène
Dérivés de flavones	Quercétine glycoside Camphérol Astragaline sous forme libre
Sesquiterpènes	Caryophyllène Elemen et bicycloelemen Pharnesnène Germacrene D
Stéroïdes triterpéniques	Acide asiatique Acide 6-hydroxy asiatique Acide madécassique Acide bétulinique Acide tannique Acide isotannique
Esters de saccharides d'acides triterpéniques (Saponines ou pseudosaponines de 1à 8% selon le pays d'origine)	Asiaticoside (constituant principal) Asiaticoside A Asiaticoside B Madécassoside Braminoside Tancuniside Isontancuniside

1.2.3 Utilisation et vertus

Nombreux sont les usages cosmétiques que l'on peut en tirer du *Centella Asiatica*, de même à Madagascar. Ses feuilles vertes ou feuilles sèches pilées sont utilisées pour la régénération du derme. De plus, elle est également utilisée comme un remède contre la lèpre.

Les chinois l'utilisent pour le traitement de la leucorrhée et des infections, tandis qu'en Inde, dans le système de médecine ayurvédique, elle était nommée « Mandukaparni » [18] et elle était utilisée dans le traitement de divers maladies : l'asthme, la bronchite, la catarrhe gastrique, les maladies rénales, divers maladies de la peau et l'urétrite. La médecine populaire l'utilise aussi comme un antipyrétique, analgésique, médicament anti-inflammatoire et « tonique du cerveau ».

Les différents travaux récents montrent que le *Centella Asiatica* a des propriétés antitumorale et qu'elle pourrait-être une plante intéressante dans la thérapeutique anticancéreuse. En effet, elle induit la mort des cellules cancéreuse par apoptose, qui est un mécanisme provoquant un afflux d'histiocytes qui se transforme en macrophages et résorbent les débris cellulaires.

1.3 CHOIX ET PREPARATION DES PRODUITS

Nous avons effectué des essais de séchage sur:

Le *Drosera Ramentacea* (Matanando)

Le *Centella Asiatica*

Ces plantes ont été sélectionnées du fait de la complémentarité de leur disponibilité tout au long de l'année. Ce qui facilite l'approvisionnement en matière première de notre unité toute l'année.

Tableau N°5: Répartition annuelle des saisons de récoltes des produits expérimentés

mois Produits	Janv	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
Drosera												
Centella												

1.3.1 Prétraitements avant séchage

On appelle prétraitements, toutes les opérations préliminaires à effectuer sur les produits à sécher avant de les disposer dans l'armoire de séchage. Avant le séchage, un certain nombre d'opérations visant à préparer le produit à sécher est indispensable :

- triage,
- lavage,
- le découpage.

Le triage permet d'enlever les déchets et les produits de mauvaises qualités.

Le lavage permet d'enlever les souillures et une grande partie des microorganismes superficiels. L'eau doit être propre et assainie sans quoi le résultat sera inverse de celui escompté.

Le découpage en tranches facilite le séchage pour les produits épais, cette opération est indispensable sinon le séchage se fait lentement.

1.3.2 Conditionnement, emballage et stockage

Après le séchage les produits secs seront compressés dans une moule en bois renforcée à l'aide d'une presse métallique manuelle à vis sans fin. Ensuite ils seront stocké dans des sacs en plastique de contenance moyenne de 100 Kg chacun.



Figure N° 35: Moule en bois chez PRONAMA



Figure N° 36: Presse à vis sans fin chez PRONAMA

Le conditionnement et l’emballage permettent de :

- préserver aux produits leur couleur et leurs arômes;
- les conserver à l’abri de l’humidité (pour inhiber la prolifération microbienne) et protéger les produits de toute contamination extérieure ;
- faciliter leur manutention et stockage.

1.4 LA CONDUITE DES MESURES

Notre travail consiste à tester le séchoir en fonctionnement normal, en effectuant des essais de séchage. Pour cela, des appareils, des outils de mesures et de contrôles ont été montés, leurs caractéristiques et utilisations étant bien déterminées.

1.4.1 *Mesure des températures et vitesse de l’air*

Dans l’armoire de séchage, l’humidité et la température de l’air, aux niveaux des claies sont mesurées à l’aide d’un thermohygromètre standard portatif à affichage numérique.



Figure N° 37: *Thermohygromètre*

Dont :

- les plages de mesures :

RH : 10 à 95% (humidité)

°C : 0 à 60

°F : 32 à 140 (température)

- la résolution :

RH : 0,1%

°C : 0,1

°F : 0,1

– la précision

RH : +/- 2 %

°C : +/- 0,4

°F : +/- 0,8

Pour la vitesse de l'air asséchant dans l'armoire de séchage, nous avons utilisé un thermo-anémomètre portatif à affichage numérique.



Figure N° 38: *Thermo-anémomètre*

Dont :

– les plages de mesures :

°C : 0 à 60

V : 0 à 20 m /s

– la résolution :

°C : 0,1

V : 0,1

Au niveau de l'insolateur

Pour connaître la température de sortie des capteurs solaires au niveau du conduit collecteur, nous avons installé un thermomètre à cadran (plage : 0 à 400°C).



Figure N° 39: *Thermomètre à cadran*

1.4.2 *Mesure des humidités*

Humidité des produits

Tout au long du séchage, les échantillons ont été pesés. Ces contrôles de poids ont permis non seulement de suivre l'évolution du séchage mais également l'homogénéité des produits à sécher durant le cycle de séchage.

La perte de masse du produit est déterminée par la méthode de pesée, en effectuant des pesées toutes les heures à l'aide d'une balance de précision.

Pour cela, nous avons eu à notre disposition une balance électronique de marque Ohaus, de modèle CS-2000, de charge maximale de 2000g et de précision 0,1g.



Figure N° 40: *Balance de précision à 1[g] près*

Le temps de pesée relativement court n'a pas affecté le processus de séchage.

Nous pouvons ainsi définir pour les produits deux formes d'humidités :

Humidité relative Hr :

$$HR = \frac{M_e}{M_e + M_s} \quad (VI - 1)$$

Humidité absolue H_a :

$$H_a = \frac{M_e}{M_s} \quad (VI - 2)$$

Où M_e et M_s sont respectivement, la masse d'eau contenue dans le produit et sa masse sèche.

Pour déterminer la masse de matières sèches contenues dans un échantillon de produit frais de masse initiale connue, nous avons procédé à son étuvage à une température maintenue constante d'environ 105°C. En ayant effectué des pesées périodiques, on a déterminé la masse de produit sec correspondant à celle de l'échantillon après stabilisation quasi totale de sa masse.

1.4.2.1 Humidité de l'air asséchant

Nous avons effectué les mesures de l'humidité de l'air à l'entrée et à la sortie du séchoir ainsi que celle de l'air ambiant, à l'aide du thermohygromètre susmentionné.

1.4.2.2 Mesure de la consommation électrique

Les connaissances de la durée de fonctionnement du séchoir et de la puissance nominale du moteur ont permis de calculer la consommation électrique. Pour l'appoint électrique, un compteur d'heures a donné le temps de fonctionnement des résistances électriques. Ainsi, le produit du temps obtenu avec la puissance des résistances donnerait la consommation de ces dernières

Partie III : RESULTAT ET DISCUSSION

CHAPITRE VII. RESULTATS DES ESSAIS DE SECHAGES ANALYSES ET COMMENTAIRES

Nous avons synthétisé les résultats relatifs aux variations des principaux paramètres influençant le processus de séchage durant tous les essais que nous avons effectués.

1 TEMPERATURE DE L'AIR A LA SORTIE DU CAPTEUR

Tableau N°6: *Variation de la température de l'air à la sortie du capteur (la journée)*

Ts capteur en °C	35	50	65	69	69	69	65	62	60	55	35	34	24
Moment de la journée	8	9	10	11	12	13	13,5	14	14,5	15	16	16,5	17,5

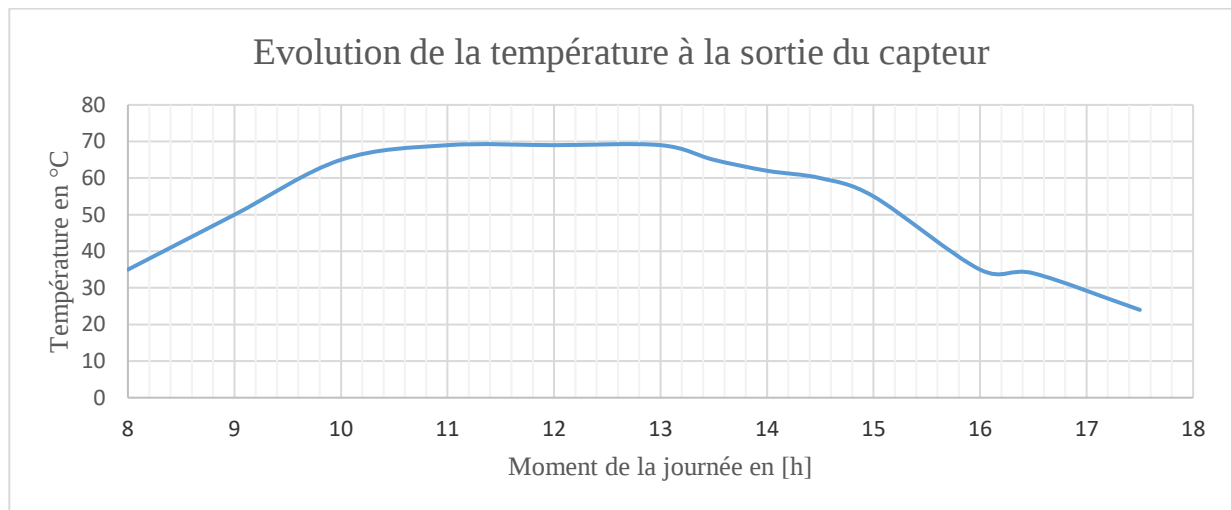


Figure N° 41: *Courbe de variation de la température de l'air à la sortie du capteur*

Les données qui se trouvent dans cette courbe ci-dessus ont été récoltés par la mesure de la température de l'air à la sortie du capteur, en tenant compte la température la plus élevée mesurée. A la sortie du capteur, la température de l'air est élevée pendant le jour et en absence du soleil, elle reste pratiquement égale à la température ambiante.

Durant le cycle des essais de séchage que nous avons effectué, notre installation ne demandait presque pas d'appoint électrique la journée. Ce qui a confirmé et justifie notre choix d'avoir utilisé des capteurs à double passe parallèle suivant les conditions avancées par LADIPO [7].

En effet, l'air entre dans l'insolateur à la température ambiante avec un débit relativement faible car les capteurs sont montés en parallèle. Les résultats obtenus avec un insolateur à double passe parallèle s'avèrent meilleurs par rapport à ceux obtenus avec un insolateur à simple passe.

Toutefois, nous tenons à souligner que pour les débits élevés des études ont montré que les résultats sont moins bons avec l'insolateur à double passe parallèle qu'avec celui à simple passe.

2 VARIATION DE LA MASSE ET HUMIDITÉ DES PRODUITS AU COURS DU SÉCHAGE

2.1 Drosera

2.1.1 Drosera Frais

Tableau N°7: *Variation de la masse et de l'humidité relative du drosera frais*

Temps en (h)	Masse de l'échantillon en (g)	Humidité Relative en fonction du temps
0	100	78,00
1	70	68,57
2	48	54,17
3	30	26,67
4	26	15,38
5	25	12,00
6	24	8,33
7	24	8,33

Source : Auteur

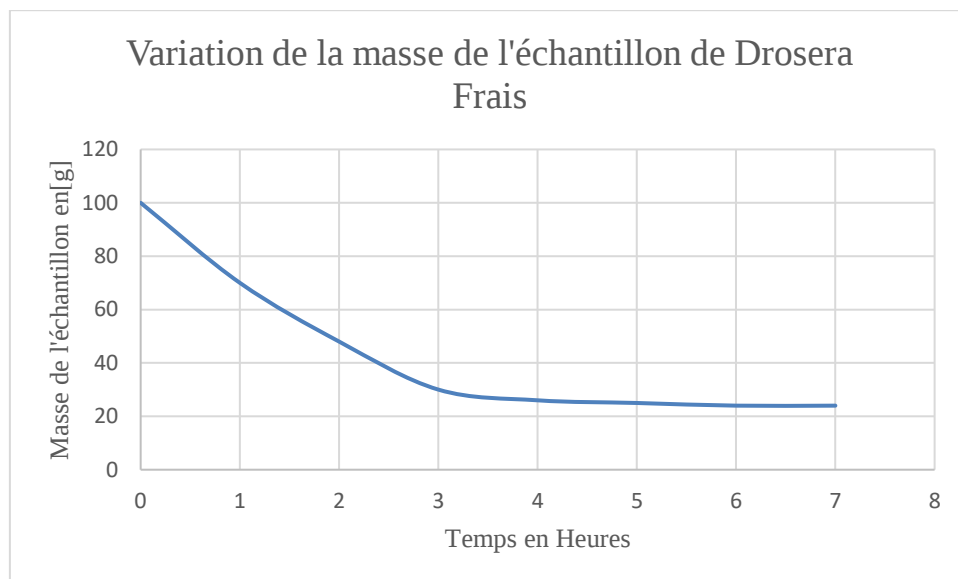


Figure N° 42: *Courbe de variation de la masse de l'échantillon de Drosera Frais*

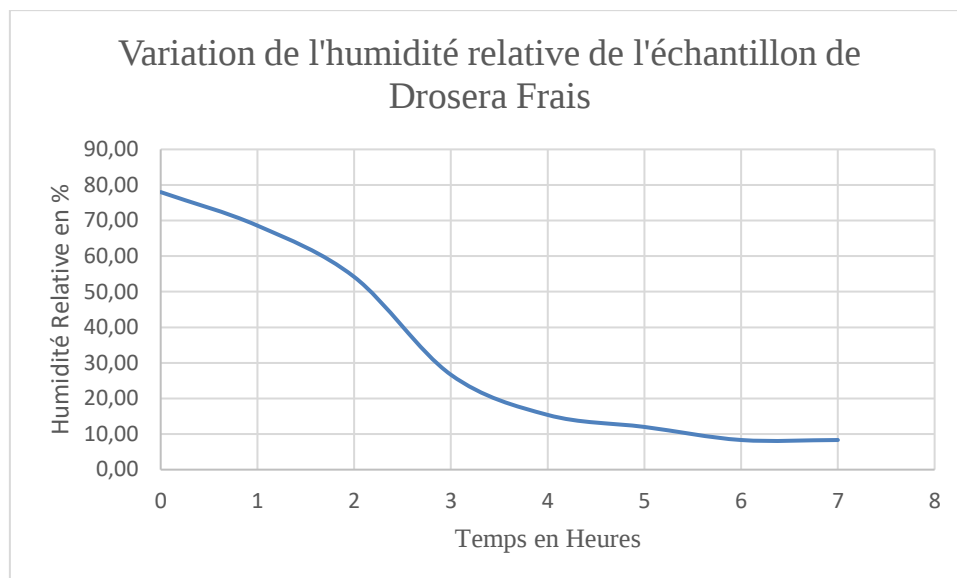


Figure N° 43: *Courbe de variation de l'humidité relative de l'échantillon de Drosera Frais*

Ces courbes montre que la masse du drosera frais reste quasi constante après 6 heures de séchage ce qui correspond à une humidité relative finale de 8,33%.

Dans la courbe de variation de la masse de l'échantillon, nous avons une courbe décroissante, qui indique que l'air caloporteur venant du capteur agit sur les plantes à sécher. Cette décroissance est d'une manière constante grâce à l'uniformité de l'air circulant à travers les plantes. De plus, l'existence des deux résistances à ailettes régularise aussi la température de l'enceinte de l'armoire de séchage.

2.2 Drosera pré séché

L'appellation produit « pré-séché » indique ici les plantes séchées à l'air libre collectées auprès des fournisseurs.

Tableau N°8: *Variation de la masse et de l'humidité relative du drosera pré séché*

Temps en (h)	Masse de l'échantillon en (g)	Humidité Relative en fonction du temps
0	100	24,00
1	93	18,28
2	89	14,61
3	86	11,63
4	83	8,43
5	83	8,43
6	83	8,43
7	83	8,43

Source : Auteur

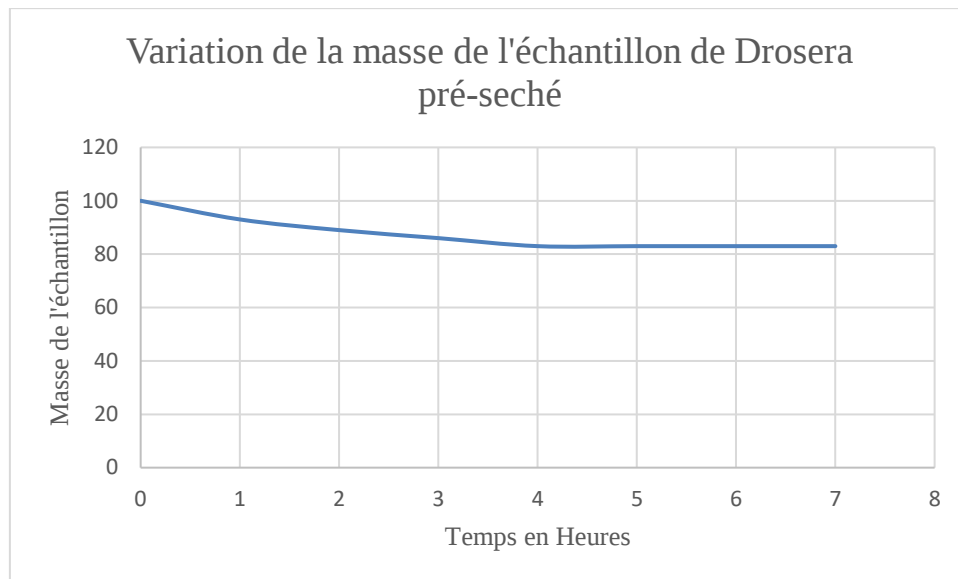


Figure N° 44: *Courbe de variation de la masse de l'échantillon de Drosera pré-séché*

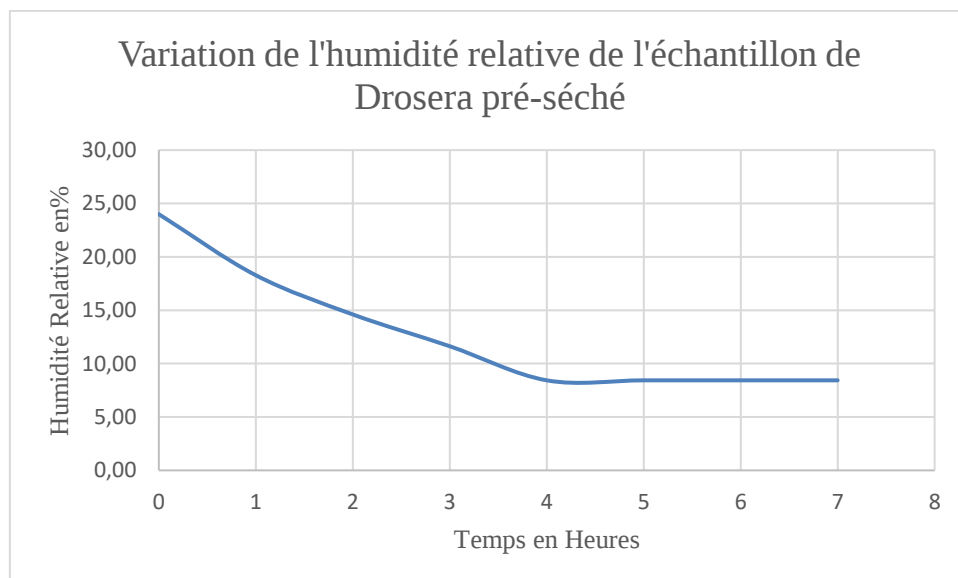


Figure N° 45: *Courbe de variation de l'humidité relative de l'échantillon de Drosera pré-séché*

On constate d'après ces courbes que pour les drosera pré-séché la masse ne varie plus après 4 heures de séchage. Ce qui indique l'achèvement du processus de séchage à une humidité relative finale de 8,43%.

Dans les deux courbes de variation de masse et de l'humidité du Drosera pré-séché, nous voyons très bien que l'humidité du plante est déjà réduit à 24% avant le procédé de séchage. Ce qui offre un temps de séchage plus court par rapport au séchage du Drosera frais.

L'humidité après séchage du Drosera pré-séché est a une petite différence vis-à-vis du Drosera frais. Cela est due à la formation des plaques, qui se sont formées au moment du séchage à l'air libre de ses plantes chez les fournisseurs. L'existence de ces plaques rends difficile l'extraction de l'humidité des plantes pré-séchées.

Tableau N°9: Comparaison variation humidité du drosera frais et drosera pré-séché

	DROSERE PRE-SECHES	DROSERE FRAIS
Temps en (h)	Humidité Relative en fonction du temps	Humidité Relative en fonction du temps
0	24,00	78,00
1	18,28	68,57
2	14,61	54,17
3	11,63	26,67
4	8,43	15,38
5	8,43	12,00
6	8,43	8,33
7	8,43	8,33

Source : Auteur

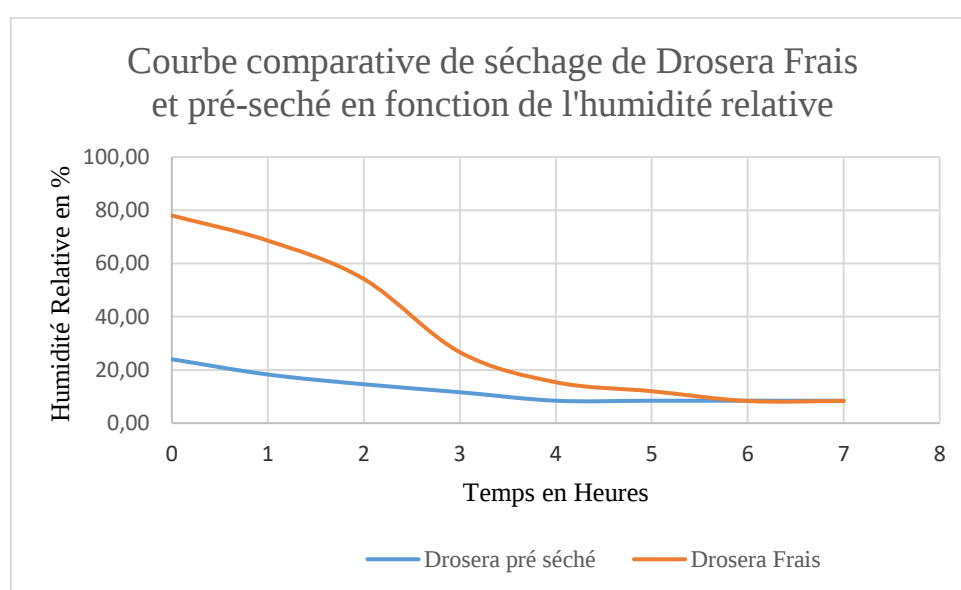


Figure N° 46: Courbe de comparative de séchage de Drosera Frais et pré-séché en fonction de l'humidité relative

On remarque aisément à partir de cette courbe que les humidités finales issues du séchage des droseras frais et pré-séché sont très proches.

2.3 Centella Asiatica

2.3.1 Centella Asiatica frais

Tableau N°10: Variation de la masse et de l'humidité relative du Centella Asiatica frais

Temps en (h)	Masse de l'échantillon en (g)	Humidité Relative en fonction du temps
0	100	80,00
1	73	72,60
2	52	61,54
3	41	51,22
4	30	33,33
5	27	25,93

6	24	16,67
7	23	13,04
8	22	9,09
9	22	9,09

Source : Auteur

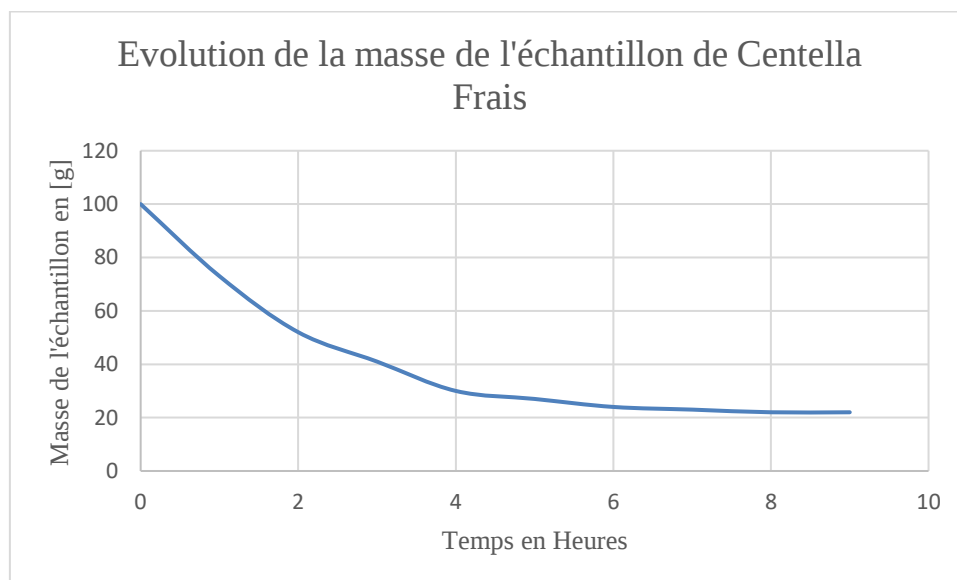
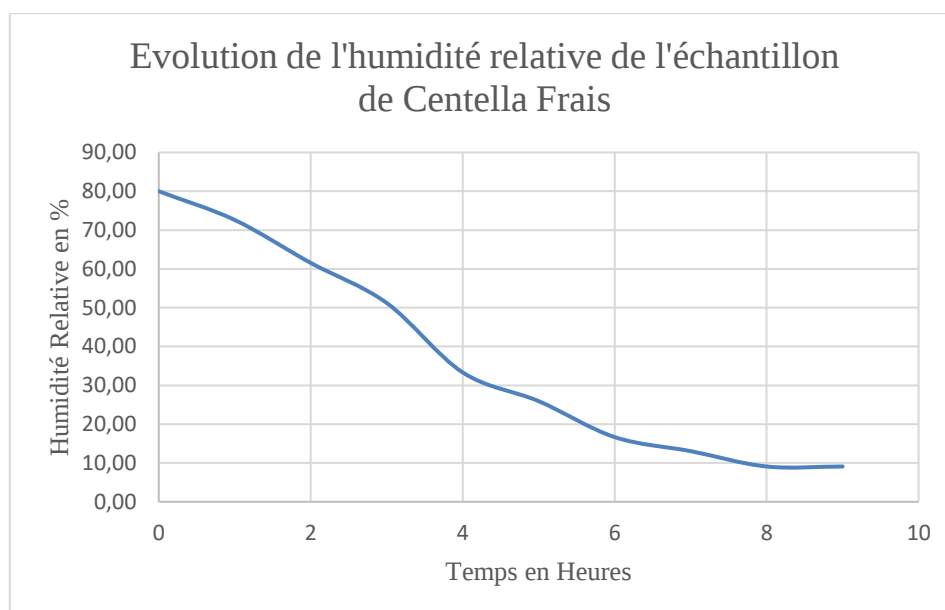


Figure N° 47: Courbe de variation de la masse de l'échantillon de Centella Frais



Source : Auteur

Figure N° 48: Courbe de variation de l'humidité relative de l'échantillon de Centella Frais

Ces courbes nous indiquent que le processus de séchage du Centella Asiatica frais dure 8 heures à une humidité relative finale de 9,09%.

Ici, nous constatons que le Centella possède une grande teneur en eau. C'est pour cette raison que son séchage est plus long. La décroissance des courbes indique l'action de l'air caloporteur aux plantes.

La petite différence d'humidité finale du Centella frais avec celle du Centella pré-séché est due par l'existence de ces paques qui se forment au moment du séchage à l'air libre, que nous venons de voir dans le paragraphe 2-3-1 du chapitre VII.

2.3.2 *Centella Asiatica* pré séché

Tableau N°11: *Variation de la masse et de l'humidité relative du Centella Asiatica pré séché*

Temps en (h)	Masse de l'échantillon en (g)	Humidité Relative en fonction du temps
0	100	27,00
1	94	22,34
2	90	18,89
3	87	16,09
4	84	13,10
5	81	9,88
6	81	9,88
7	81	9,88
8	81	9,88
9	81	9,88

Source : Auteur

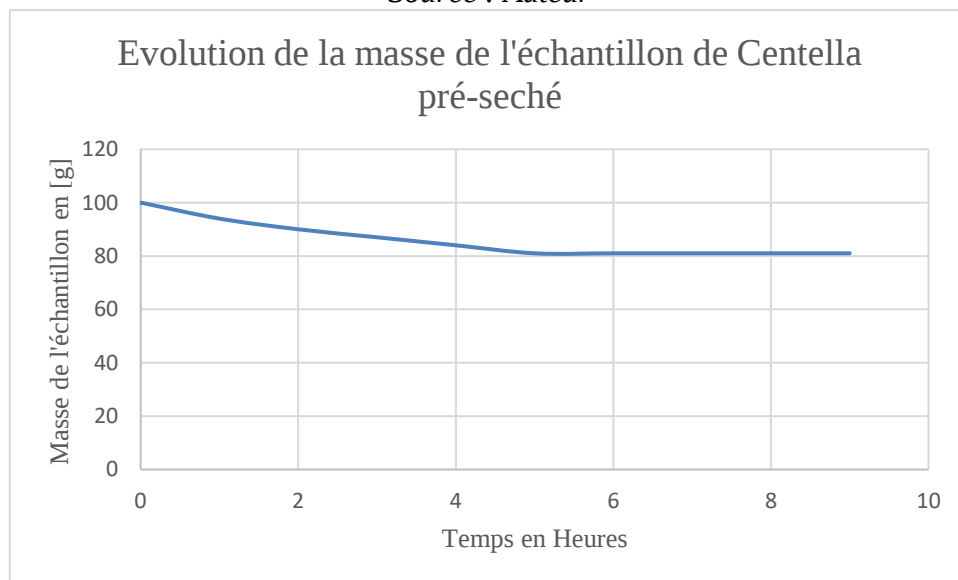


Figure N° 49: *Courbe de variation de la masse de l'échantillon de Centella pré-séché*

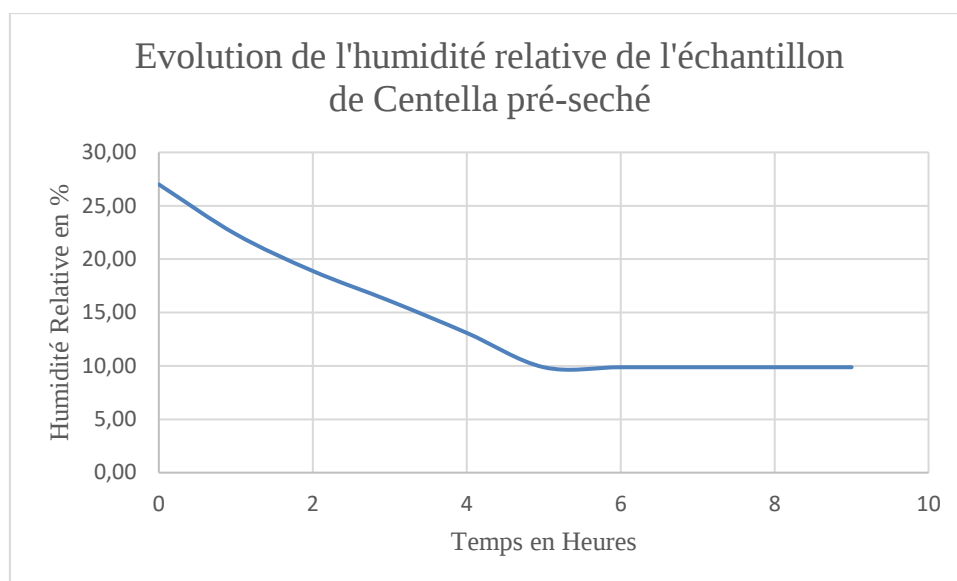


Figure N° 50: *Courbe de variation de l'humidité relative de l'échantillon de Centella pré-séché*

Ces courbes montre que le séchage du Centella Asiatica pré-séché nécessite 5 heures environ et permet d'obtenir une humidité relative de 9,88%, valeur proche de celle obtenue avec le Centella Asiatica frais (9,09%).

2.4 Commentaires

Auparavant la société PRONAMA exporte directement, sans traitement supplémentaire, les produits pré-séchés de haute teneur à l'humidité relative (environ 25%). Ce qui entraine des problèmes de normalisation vis-à-vis des importateurs étranger. En effet, du fait de cette humidité élevée il se trouve parfois qu'arrivé au port de destination, les marchandises présentent des avaries, causés par la prolifération de moisissures. Ce qui engendre des pertes conséquentes tant pour l'exportateur et l'importateur.

Actuellement, moyennant le séchoir solaire utilisant les technologies innovantes du séchage normalisé, les résultats obtenus s'avèrent satisfaisantes. Les humidités relatives sont tous en-dessous de 10%, zone à partir de laquelle toute attaque par les micro-organismes seront écartée.

Par ailleurs, nous avons effectué une étude comparative du résultat obtenu sur le séchage de produit pré-séché avec celui du produit fraîchement collecté même si l'approvisionnement de ce dernier reste improbable.

En effet, il importe de souligner que les produits achetés auprès des fournisseurs sont tous des produits pré-séchés. En effet ces produits ont déjà subi un séchage à l'air libre, sous le soleil, ce qui leurs donnent une couleur plus sombre par rapport aux produits frais. Leur degré d'humidité relative initiale réduite permet d'effectuer donc deux cycles de séchage pendant une journée. Ce qui favorise la productivité de l'unité de séchage.

Dans cette partie, nous avons pu acquérir des résultats de séchage de deux plantes médicinales, desquels nous obtiendrons probablement des expériences pratiques en matière de séchage. En outre, le passage par cette phase expérimentale nous a permis d'étudier la variation de la masse et de l'humidité du produit au cours du séchage.

Nous pouvons dire que cette partie expérimentale, nous a permis de détecter les conditions et méthodes d'exploitation optimale du séchoir solaire.

2.5 Etablissement des courbes de séchage

Il existe plusieurs courbes caractéristiques dites "courbes des séchage".

On entend par courbes de séchage les courbes représentant les variations de :

- la teneur en eau en fonction du temps :

$$X = f(t)$$

- la vitesse de séchage en fonction du temps :

$$\frac{dX}{dt} = f(t)$$

- la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau :

$$\frac{dX}{dT} = f(X)$$

La première courbe obtenue expérimentalement est $X = f(t)$. C'est elle qui contient le plus d'informations, les deux autres se déduisent par dérivation. Le transfert d'humidité entre l'air et le produit peut également être représenté par une courbe qui décrit l'évolution de la teneur en eau réduite du produit rapporté à la matière sèche, en fonction du temps $X_r = f$.

2.6 Etablissement des courbes d'équilibres

En utilisant le model d'HENDERSON [17] donné par la formule (II-10) et en tenant compte des données du courbe de variation des températures de la journée, les quelques valeurs de notre constante K nous est maintenant disponible, pour pouvoir faire la description des courbes d'équilibres de chaque produit que nous avons traité. Ainsi chaque produit a son propre valeur de la constante K.

Drosera frais : $K_1 = 7.0024 \times 10^{-5}$

Drosera pré-séché : $K_2 = 2.45556 \times 10^{-5}$

Centella frais : $K_3 = 9.37129 \times 10^{-6}$

Centella pré-séché : $K_4 = 7.56866 \times 10^{-5}$

CHAPITRE VIII. INGENIERIE ET TECHNOLOGIE

1 CHOIX DE L'EMPLACEMENT DE L'UNITE

L'unité de séchage de la société est implantée à Ambohimamory dans la région d'Analamanga, district d'Antsimondrano, commune rurale d'Andranonahoatra, à 10Km de la commune urbaine d'Antananarivo.

Ce site d'implantation a été choisi pour les raisons suivantes :

- c'est un carrefour reliant la route nationale 7 aux routes nationales 2, 1 et 4 ce qui favorise l'accès au moyen de transports et de commercialisation performants, nécessaires pour les étapes de l'approvisionnement en matière première (collecteur à l'usine) et de la distribution du produit fini (usine vers les points de ventes ou éventuellement vers le port d'embarquement) ;
- facilité d'installation et de fonctionnement de l'usine (présence de l'électricité, d'eau potable) ;
- disponibilité en main d'œuvre et en consommables nécessaires pour la transformation ;
- l'existence des laboratoires de référence pour les analyses ;
- aspect géographique et climatique favorable.

2 LES MATERIELS ET EQUIPEMENT DE L'UNITE

2.1 Matériels et outillages

Tableau N°12: *Matériels et outillages*

Désignation	Quantité
Séchoir et accessoires (Capteur, claies et armoire, ventilateur)	1
Matériel de conditionnement (Presse et moule)	1
Balance de précision portée max 1000g	1
Balance portée max 100kg	1

Tableau N°13: *Les matériels administratifs et financiers*

Désignation	Quantité
Ordinateur	1
Téléphone portable	2
Tables de bureau	2
Chaises	3
Mobilier de rangement	2

2.2 Organisation des activités de l'usine

Les activités principales de l'usine sont :

- l'approvisionnement en matière première ;
- la production de plantes médicinales séchées;
- le contrôle de la qualité des produits ;
- la distribution et la vente des produits finis ;
- l'administration.

2.2.1 La production

La production annuelle s'évalue en fonction de la demande sur le marché ainsi que la disponibilité en matière première.

2.2.2 La collecte des matières premières

La collecte de drosera s'effectue à Ankazobe et celle de la Centella à Moramanga

2.2.3 Estimation d'approvisionnement en matière première et de production

Tableau N°14: Quantité prévisionnelle de Drosera traités par an

Années	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5
Drosera frais en Kg	14 400	15 840	17 424	19 166	21 083
Drosera séché en Kg	11 832	13016	14317	15749	17324

Source : Auteur

Tableau N°15: Quantité prévisionnelle de Centella traitées par an

Années	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5
Centella frais en Kg	10 080	11 088	12 197	13 416	14 758
Centella séché en Kg	8 083	8 891	9 781	10 759	11 835

Source : Auteur

2.2.4 Ligne de production

Les matières premières destinées à être séchées sont toujours soumises à une préparation préliminaire (nettoyage, triage, etc.) en vue des traitements ultérieurs.

Ces opérations de préparations varient selon la nature de la matière première et le produit que l'on veut obtenir. Les principales d'entre-elles sont mentionnées ci-dessous :

- réception et pesage de la matière première,
- triage pour ne retenir que les produits saines et mûres,

- calibrage pour grouper les produits de meme taille ou de taille désirée,
- lavage à l'eau potable (eau municipale ou traitée),
- séchage,
- conditionnement en sacs,
- mis sur le marché.

Nous trouverons ci-après le diagramme de fabrication

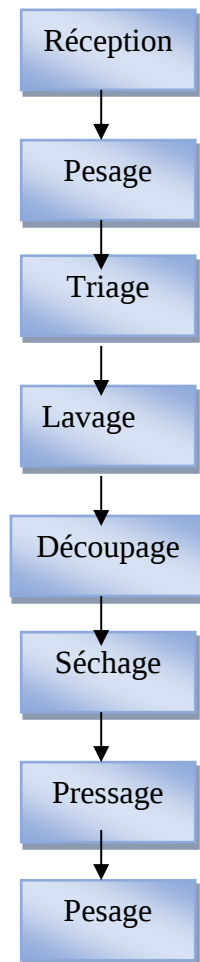


Figure N° 51: *Diagramme de fabrication de Plantes médicinales séchées*

a) La réception

A la réception, les produits doivent être pesés. Pour s'assurer de la qualité des produits réceptionnés, on doit procéder à l'estimation du pourcentage en matière étrangère, en produits abîmés et contaminés de la matière première.

Une matière première riche en impuretés, en produits abîmés et contaminés doit être refusée.

Après la réception de la marchandise, on notera dans un cahier le numéro du lot, le nom de la clientèle, la date de réception, les résultats d'analyse (si c'est possible) et le prix.

b) Le triage

Le triage a pour but d'éliminer les produits de mauvaise qualité. A l'unité de séchage, le triage se fait manuellement. Un triage manuel permet de supprimer tous les produits impropres à la consommation

c) Nettoyage et lavage

Avant tout traitement ou séchage, la matière première est soumise à un nettoyage et lavage pour éliminer les produits contaminés et toute souillure et matière étrangère.

Cette étape permet d'obtenir des produits frais propres et facilite la conduite des traitements ultérieurs. En particulier, elle permet de diminuer le temps de séchage et d'exploiter dans des meilleures conditions la capacité du séchoir.

d) Le séchage

Les produits sont récoltés avec un taux d'humidité très élevé, propice aux dégradations diverses ce qui les rend très périssables.

Le séchage constitue un des moyens de conservation efficace en réduisant l'humidité des produits. Ce qui permet un stockage de longue durée sans pertes en qualité et en quantité.

3 EVALUATION FINANCIERE DU PROJET

L'évaluation est un processus qui a pour but de déterminer et de juger la valeur des résultats des activités entreprises. Elle met en évidence des éléments de décision sur la continuation, l'abandon ou la multiplication du projet.

Elle dégage la réussite ou le déficit de la faisabilité de ce projet grâce aux indicateurs de rentabilité d'un projet d'investissement, on peut déterminer que sa réalisation est fiable ou non pour rassurer un investisseur avec son financement.

3.1 Investissements d'immobilisation

Il s'agit d'une acquisition, de moyen de production, faite par l'Entreprise, qui vise à maintenir, remplacer et/ou accroître le capital productif. C'est le fait d'engager des fonds pour une utilisation d'une durée de vie supérieur à 1 an, susceptible d'engendrer des fonds nets pendant plusieurs années. Ce capital permet à l'entreprise de produire des biens ou des services. L'ensemble de ces biens constitue les « immobilisations ». Il existe deux types d'immobilisations : les immobilisations corporelles et les immobilisations incorporelles.

Les immobilisations corporelles représentent la partie physique de l'entreprise, c'est-à-dire principalement les bâtiments et les machines ; les immobilisations incorporelles représentent la partie non physique, c'est-à-dire le savoir, les logiciels, les fonds de commerce et les brevets.

Tableau N°16: *Tableau des investissements d'immobilisation : (en Ariary).*

Désignation	Nombre	Prix unitaire	Montant	Sous total
IMMOBILISATIONS INCORPORELLES				750 000
Licence Microsoft office et logiciel	1	750 000	750 000	
IMMOBILISATIONS CORPORELLES				13 415 000
<i>Matériels et outillages</i>				<i>11 570 000</i>
Armoire de séchage	1	5 500 000	5 500 000	
Système de ventilation	2	600 000	1 200 000	
Capteur solaire	6	550 000	3 300 000	
Matériel de conditionnement (presse, moule)	1	1 200 000	1 200 000	
Balance de précision portée max 1000g	1	160 000	160 000	
Balance portée max 100kg	1	210 000	210 000	
<i>Matériels de communication</i>				<i>300 000</i>
Téléphones portables	2	150 000	300 000	
<i>Matériels et mobilier de bureau</i>				<i>645 000</i>
Chaise	3	35 000	105 000	
Table de bureau	2	120 000	240 000	
Mobilier de rangement	2	150 000	300 000	
<i>Matériels informatiques</i>				<i>900 000</i>
Ordinateur	1	900 000	900 000	
TOTAL			14 165 000	14 165 000

Source : Auteur

D'après ce tableau, le montant des investissements d'immobilisation est de Ar. 14 165 000, qui constitue les frais de premier établissement de l'unité de production.

Tableau N°17: *Renouvellement des matériels informatiques et du logiciel (en Ariary)*

Désignation	Prix unitaire	Nombres	Montant
Ordinateurs	900 000	1	900 000
Licence Microsoft et logiciel informatique	750 000	1	750 000
Total			1 650 000

Tableau N°18: *_Tableau d'amortissements des immobilisations (en Ariary)*

DESIGNATION	valeur d'acquisition	tau x	duré e	1ère -4ème année	5ème année
Licence Microsoft et logiciel	750 000	25%	4ans	187 500	
matériel et outillage	11 570 000	20%	5ans	2 314 000	2 314 000
matériel de bureau	645 000	10%	10ans	64 500	64 500
matériels informatiques	900 000	25%	4ans	225 000	
matériel de communication	300 000	25%	5ans	75 000	
Total				2 866 000	2 378 500

3.2 Charges salariales (en Ariary)

Tableau N°19: *Charges salariales*

POSTES		Effectifs	1ère et 2ème années		3ème et 4ème années		5ème année	
			salaire/mois	salaire/an	salaire/mois	salaire /an	salaire /mois	salaire/an
Gérant		1	700 000	8 400 000	770 000	9 240 000	847 000	10 164 000
Responsable Adm . Et Fin.		1	500 000	6 000 000	550 000	6 600 000	605 000	7 260 000
Ouvriers		2	120 000	2 880 000	132 000	3 168 000	145 200	3 484 800
sous -total				17 280 000		19 008 000		20 908 800
Charges patronales	OSIE (5%)			864 000		950 400		1 045 440
	Cnaps (13%)			2 246 400		2 471 040		2 718 144
TOTAL				20 390 400		22 429 440		24 672 384

L'effectif du personnel reste le même pendant les 5 premières années. Mais une hausse de salaire de 10% tous les 2ans sera prévue pour garantir la motivation du personnel.

3.3 Les chiffres d'affaires prévisionnels

La production prévue pour les cinq premières années d'activité est présentée dans les tableaux suivants :

3.3.1 Tableau de production

Tableau N°20: *Tableau de production du drosera*

Rubrique	1ère Année	2ème Année	3ème Année	4ème Année	5ème Année
Matière première brute (en kg)	14 400	15 840	17 424	19 166	21 083
Déchet (1%)	144	158,4	174,24	191,664	210,8304
Produit frais trié (en kg)	14 256	15 682	17 250	18 975	20 872
PU matière première brute	10 000	10 000	10 500	10 500	11 025
Achat matière première brute	144 000 000	158 400 000	182 952 000	201 247 200	232 440 516

Tableau N°21: *Tableau de production du Centella*

Rubrique	1ère Année	2ème Année	3ème Année	4ème Année	5ème Année
Matière première brut (en kg)	10 080	11 088	12 197	13 416	14 758
Déchet (1%)	100,8	110,88	121,968	134,1648	147,58128
Produit frais trié (en kg)	9 979	10 977	12 075	13 282	14 611
PU matière première brute	6 500	6 500	6 825	6 825	7 166
Achat matière première brute	65 520 000	72 072 000	83 243 160	91 567 476	105 760 434,8

Rubrique	1è Année	2è Année	3è Année	4è Année	5è Année
Montant total matière brut	209 520 000	230 472 000	266 195 160	292 814 676	338 200 951

3.3.2 Tableau des chiffres d'affaire

Les tableaux ci-dessous illustrent les chiffres d'affaires réalisées pendant les cinq premières années d'activité.

Tableau N°22: *Chiffre d'affaire réalisée avec le drosera*

Rubrique	1 ^è Année	2 ^è Année	3 ^è Année	4 ^è Année	5 ^è Année
PU Produit fini	16 000	16 000	16 800	16 800	17 640
Produit fini	11 832	13 016	14 317	15 749	17 324
CA	189 319 680	208251648	240530653	264583719	305594195

Tableau N°23: *Chiffre d'affaire réalisée avec le centella*

Rubrique	1 ^è Année	2 ^è Année	3 ^è Année	4 ^è Année	5 ^è Année
PU Produit fini	12500	12500	13125	13125	13781
Produit fini	8 083	8 891	9 781	10 759	11 835
CA	101 039 400	111143340	128370557,7	141207613	163094794

Rubrique	1 ^è Année	2 ^è Année	3 ^è Année	4 ^è Année	5 ^è Année
Montant total CA (Ariary)	290 359 080	319 394 988	368 901 211	405 791 332	468 688 989

3.4 Charges d'exploitation

Tableau N°24: *Charges d'exploitation (en Ariary)*

RUBRIQUES	1ère année	2ème année	3ème année	4ème année	5ème année
Achats consommés					
Matières premières	209 520 000	230 472 000	266 195 160	292 814 676	338 200 951
Emballage	6 285 600	6 914 160	7 985 855	8 784 440	10 146 029
Fournitures diverses	2 095 200	2 304 720	2 661 952	2 928 147	3 382 010
Frais de transports	1 468 800	1 615 680	1 777 248	1 954 973	2 150 470
	219 369 600	241 306 560	278 620 214	306 482 236	353 879 459
Services intérieurs		-	-		-
Salaires	17 280 000	17 280 000	19 008 000	19 008 000	20 908 800
Charges patronales	3 110 400	3 110 400	3 421 440	3 421 440	3 763 584
Entretiens et réparation	708 250	779 075	856 983	942 681	1 036 949
	21 098 650	21 169 475	23 286 423	23 372 121	25 709 333
Services extérieurs		-	-		-
Eau et électricité	2 400 000	2 640 000	2 904 000	3 194 400	3 513 840
Frais de communication	1 080 000	1 188 000	1 306 800	1 437 480	
Impôts et taxes	2 903 591	3 193 950	3 513 345	3 864 679	4 251 147
Transit et douane	5 238 000	5 761 800	6 337 980	6 971 778	7 668 956
Assurances	1 047 600	1 152 360	1 267 596	1 394 356	1 533 791
Sevice bancaire	580 718	638 790	702 669	772 936	850 229

	13 249 909	14 574 900	16 032 390	17 635 629	17 817 964
TOTAUX	253 718 159	277 050 935	317 939 027	347 489 985	397 406 755

Ce tableau met en évidence toutes charges que l'usine devrait supporter pendant les cinq premières années de son existence

3.5 Le Fonds de Roulement Initial (FRI), Investissement (Io)

3.5.1 Fonds de roulement initial

C'est la somme d'argent qu'on aura besoin pour faire fonctionner l'entreprise.

Cette somme représente les dépenses de la société pendant les 3 premiers mois de son existence.

$$FRI = 253\,718 \times \frac{3}{12}$$

$$FRI = 63\,429\,540$$

3.5.2 Investissement Io

$$I_0 = \text{Montant des immobilisations} + \text{Fonds de roulement initial}$$

$$I_0 = 14\,165\,000 + 63\,429\,540$$

$$I_0 = 77\,594\,540$$

3.5.3 Plan de financement

Tableau N°25: Plan de financement

RUBRIQUES	Pourcentage	Montant
Apport des associés	30%	23 278 362
Emprunt	70%	54 316 178
Investissement en Ariary	100%	77 594 540

Le projet nécessite un investissement d'Ariary 77 594 540 dont:

- 70% faisant l'objet d'un emprunt auprès d'une banque avec un taux d'intérêt de 16% et une annuité constante d'Ariary **16 588 670** durant cinq ans.

- 30% destinés aux apports des associés

3.6 Remboursement d'emprunt

C'est la restitution de l'argent emprunté à la banque au taux d'intérêt de 16%.

Le remboursement se fera par annuité constante « a » du capital.

3.6.1 Calcul d'annuité

$$a = \text{Somme emprunté} \times \frac{1}{1 - (1 + i)^{-n}}$$

Avec $i = 16\%$ et $n = 5 \text{ ans}$

$$\frac{1}{1 - (1 + i)^{-n}} = 0.30540982$$

$$a = 54\,316\,178 \times 0.30540982$$

$$a = 16\,588\,670 \text{ Ar}$$

3.6.2 Remboursement d'emprunt

Tableau N°26: Remboursement d'emprunt

Année	Capital	Intérêt i=16%	Amortissement	Annuité constante
1	54 316 178	8 690 588	7 898 082	16 588 670
2	46 418 096	7 426 895	9 161 775	16 588 670
3	37 256 321	5 961 011	10 627 659	16 588 670
4	26 628 662	4 260 586	12 328 084	16 588 670
5	14 300 578	2 288 092	14 300 578	16 588 670

3.7 Compte des résultats

Le compte résultat est un état récapitulatif des charges et des produits réalisés par l'entité au cours de la période considérée .La différence entre les produits et les charges, fait apparaître le résultat net de la période.

Il mesure la performance de l'activité

3.7.1 Compte de résultat par nature pendant 5 années d'exercice (en Ariary)

Tableau N°27: *Compte de résultat par nature pendant 5 années d'exercice (en Ariary)*

RUBRIQUES	1ère année	2ème année	3ème année	4ème année	5ème année
Chiffres d'affaire	290 359 080	319 394 988	368 901 211	405 791 332	468 688 989
Production stockée					
Production immobilisée					
I- PRODUCTION DE L'EXERCICE	290 359 080	319 394 988	368 901 211	405 791 332	468 688 989
Achat consommé	219 369 600	241 306 560	278 620 214	306 482 236	353 879 459
Services extérieurs	13 249 909	14 574 900	16 032 390	17 635 629	17 817 964
II- CONSOMMATION DE L'EXERCICE	232 619 509	255 881 460	294 652 604	324 117 865	371 697 423
III_VALEUR AJOUTEE D'EXPLOITATION	57 739 571	63 513 528	74 248 607	81 673 468	96 991 566
Charges de personnel	20 390 400	20 390 400	22 429 440	22 429 440	24 672 384
Impôts, taxes et versements assimilés	2 903 591	3 193 950	3 513 345	3 864 679	4 251 147

IV -EXEDENT BRUT D'EXPLOITATION	34 445 580	39 929 178	48 305 822	55 379 348	68 068 035
Autres produits opérationnels					
Autres charges opérationnelles					
Amortissement	2 866 000	2 866 000	2 866 000	2 866 000	2 378 500
V-RESULTAT OPERATIONNEL	31 579 580	37 063 178	45 439 822	52 513 348	65 689 535
Produits financiers					
Charges financières	8 690 588	7 426 895	5 961 011	4 260 586	2 288 092
VI-RESULTAT FINANCIER	-8 690 588	-7 426 895	-5 961 011	-4 260 586	-2 288 092
RESULTAT AVANT IMPOT (V+VI)	22 888 992	29 636 283	39 478 811	48 252 762	63 401 442
Impôts exigibles sur le résultat (IR 25%)	5 722 248	7 409 071	9 869 703	12 063 191	15850361
Impôts différés (variation)					
TOTAL PRODUITS DES ACTIVITES ORDINAIRES	290 359 080	319 394 988	368 901 211	405 791 332	468 688 989
TOTAL CHARGES DES ACTIVITES ORDINAIRES	273 192 336	297 167 776	339 292 103	369 601 761	421 137 907
VII-RESULTAT NET DES ACTIVITES ORDINAIRES	17 166 744	22 227 212	29 609 108	36 189 572	47 551 082

3.7.2 Compte de résultat par fonction : (en Ariary)

Tableau N°28: Compte de résultat par fonction : (en Ariary)

RUBRIQUES	1ère année	2ème année	3ème année	4ème année	5ème année
Produits des activités ordinaires	290 359 080	319 394 988	368 901 211	405 791 332	468 688 989
Coûts de la vente	219 369 600	241 306 560	278 620 214	306 482 236	353 879 459
MARGE BRUTE	70 989 480	78 088 428	90 280 997	99 309 096	114 809 530
Autres produits opérationnels					
Coûts commerciaux	13 249 909	14 574 900	16 032 390	17 635 629	17 817 964
Charges administratives	26 159 991	26 450 350	28 808 785	29 160 119	31 302 031
Autres charges opérationnelles					
RESULTAT OPERATIONNEL	31 579 580	37 063 178	45 439 822	52 513 348	65 689 535
Produits financiers					
Charges financières	8 690 588	7 426 895	5 961 011	4 260 586	2 288 092
RESULTAT AVANT IMPOT	22 888 992	29 636 283	39 478 811	48 252 762	63 401 442
Impôt exigible sur le résultat	5 722 248	7 409 071	9 869 703	12 063 191	15 850 361
Impôt différé					
RESULTAT NET DES ACTIVITES ORDINAIRES	17 166 744	22 227 212	29 609 108	36 189 572	47 551 082
Charges extraordinaires					
Produits extraordinaires					
RESULTAT NET DE L'EXERCICE	17 166 744	22 227 212	29 609 108	36 189 572	47 551 082

3.8 Budget de trésorerie

Le plan de trésorerie est un instrument de mesure de flux financiers pendant cinq ans. Il permet de vérifier la présence de solde net de trésorerie toujours positive.

Tableau N°29: *Budget de trésorerie*

Rubriques	1ère année	2ème année	3ème année	4ème année	5ème année
Emprunts contractés	54 316 178				
Ventes	290 359 080	319 394 988	368 901 211	405 791 332	468 688 989
Encaissement	344 675 258	319 394 988	368 901 211	405 791 332	468 688 989
Charges d'exploitation	253 718 159	277 050 935	317 939 027	347 489 985	397 406 755
<u>Intérêts</u>	8 690 588	7 426 895	5 961 011	4 260 586	2 288 092
IR (25%)	5 722 248	7 409 071	9 869 703	12 063 191	15 850 361
Immobilisations	14 165 000				
Remboursement d'emprunt	16 588 670	16 588 670	16 588 670	16 588 670	16 588 670
Décaissement	298 884 666	308 475 571	350 358 411	380 402 432	432 133 879
Solde	45 790 592	10 919 417	18 542 800	25 388 900	36 555 110

Ce tableau du plan de trésorerie montre que dès la première année d'activité l'entreprise enregistre déjà un solde net positif.

LES INDICATEURS DE RENTABILITE

La rentabilité financière du projet sera évaluée à partir de l'ensemble des investissements réalisés.

3.9 Evaluation de la rentabilité d'un projet d'investissement

La prise de décision d'investir dans un projet se base principalement sur l'évaluation de son intérêt économique et par conséquent, du calcul de sa rentabilité. Cette dernière dépend des coûts que le projet engendre et des gains qu'il procure. Si la somme des gains est supérieure aux coûts de l'investissement, celui-ci est rentable. Un entrepreneur doit cependant prendre sa décision dans un contexte d'incertitude car un investissement génère des coûts qui ne sont pas précisément connus, vu que les taux d'intérêts sont variables et les conditions économiques ou technologiques sont constamment en évolution.

Nous allons donc illustrer ci-dessous les critères pertinents à utiliser lors de la prise de décision à s'investir.

Trois méthodes sont généralement utilisées, à savoir :

- la méthode de la valeur actualisée ;
- le taux de rentabilité interne ;
- le délai de récupération

3.10 Valeur actualisée nette (VAN)

C'est un indicateur qui permet de prendre la décision quant à la rentabilité ou pas d'un projet d'investissement. Comme tout projet, on commence par un investissement initial, qui permet de créer et faire marcher le projet, pour attendre par la suite la rentrée des gains. Le fonctionnement de la VAN est simple, il consiste à comparer les gains d'un projet à son investissement initial.

Ce critère d'évaluation prend en considération l'ensemble des estimations de flux de trésorerie entrants et sortants associés à un investissement et fait appel au principe d'actualisation afin de rendre homogènes les montants perçus ou déboursés à des périodes différentes.

3.10.1 Le principe d'actualisation

La valeur d'une monnaie n'étant pas constante, il va de soi que 1 Ariary aujourd'hui ne vaut plus exactement 1 Ariary au bout d'une certaine période. Afin de pouvoir comparer des montants perçus ou dépensés à des moments différents, il faut donc tenir compte de cette modification de valeur.

L'actualisation est la seule méthode appropriée pour calculer le rendement des capitaux investis sur plusieurs périodes de temps.

En ramenant des valeurs futures à des valeurs d'aujourd'hui, l'actualisation permet de comparer directement le montant du flux négatif correspondant à l'investissement initial (décaissement) avec le montant total de la série de flux positifs futurs générés sous forme de dividendes et de produit de cession par l'entreprise (encaissements).

3.10.2 Le flux net de trésorerie (FNT)

Le flux de trésorerie (Cash-flow au sens original anglo-saxon) est la différence des encaissements (recettes) et des décaissements (dépenses) engendrés par les activités.

Tableau N°30: *Tableau du flux net de trésorerie (en Ariary)*

RUBRIQUES	1ère année	2ème année	3ème année	4ème année	5ème année
Résultat net de l'exercice	17 166 744	22 227 212	29 609 108	36 189 572	47 551 082
Amortissements	2 866 000	2 866 000	2 866 000	2 866 000	2 378 500
FNT	20 032 744	25 093 212	32 475 108	39 055 572	49 929 582
CUMUL DE FNT	20 032 744	45 125 956	77 601 064	116 656 636	166 586 217

Tableau N°31: *Tableau du flux net de trésorerie actualisé (en Ariary) avec $i=16\%$*

Rubriques	1ère année	2ème année	3ème année	4ème année	5ème année
Flux net de trésorerie	20 032 744	25 093 212	32 475 108	39 055 572	49 929 582
$i=16\% (1+i)^{-n}$	0,862069	0,743163	0,640658	0,552291	0,476113
Flux net actualisé(FNA)	17 269 607	18 648 347	20 805 438	21 570 041	23 772 123
Cumul flux net actualisé	17 269 607	35 917 954	56 723 392	78 293 433	102 065 556

3.10.3 calcul de la VAN

C'est la valeur de la somme du flux net de trésorerie actualisée moins le coût de l'investissement. Elle est donnée par la formule suivante :

$$VAN = \text{Somme FNA} - I_0 = 102\,065\,556 - 77\,594\,540 = 24\,471\,016$$

$$VAN = 24\,471\,016$$

Du point de vue de l'opérateur, la VAN est le meilleur critère pour choisir ou refuser un investissement. Pour notre cas, la VAN est supérieure à 0, notre projet est donc rentable

3.11 Taux de rentabilité interne (TRI)

C'est le taux d'intérêts par lequel la valeur actualisée d'un revenu futur est égale au capital investi. Il est défini comme étant le taux maximal d'intérêt que peut supporter un projet par conséquent, tout projet dont le TRI est supérieur au taux d'intérêt auquel il est financé est rentable. En d'autre terme, c'est le taux d'actualisation qui annule la valeur actualisée nette. Si le taux de rentabilité interne (TRI financier) est supérieur au taux d'actualisation de référence, l'investissement présente une rentabilité financière et on pourra faire l'étude fine de simulation du résultat.

Calcul du TRI

$$I_0 = b_1(1+t)^{-1} + b_2(1+t)^{-2} + b_3(1+t)^{-3} + b_4(1+t)^{-4} + b_5(1+t)^{-5}$$

$$I_0 = 77\,594\,540 \text{ Ar}$$

Posons $t_1 = 27\%$

$$b_1 = 20\,032\,744 \times (1+t)^{-1} = 0,787401575$$

$$b_2 = 25\,093\,212 \times (1+t)^{-2} = 0,62000124$$

$$b_3 = 32\,475\,108 \times (1+t)^{-3} = 0,488189953$$

$$b_4 = 39\,055\,572 \times (1+t)^{-4} = 0,384401538$$

$$b_5 = 49\,929\,582 \times (1+t)^{-5} = 0,302678376$$

$$I_{01} = 77\,311\,284,69$$

Posons $t_2 = 26\%$

$$b_1 = 15\,899\,003,05$$

$$b_2 = 15\,805\,752,19$$

$$b_3 = 16\,234\,501,91$$

$$b_4 = 15\,495\,329,62$$

$$b_5 = 15\,721\,906,27$$

$$I_{02} = 79\,156\,493,03$$

Interpolation

$$I_0 = 77\,594\,540 \quad I_{01} = 77\,311\,285 \quad I_{02} = 79\,156\,93$$

$$t = TRI \quad t_1 = 0,27 \quad t_2 = 0,26$$

$$I_0 = 83\,406\,350 \quad I_{01} = 77\,311\,285 \quad I_{02} = 84\,440\,119$$

$$t_0 = TRI \quad t_1 = 0,27 \quad t_2 = 0,39$$

Nous avons donc

$$t_1 = 40\% > t = TRI > t_2 = 39\%$$

Et

$$I_{01} = 82\,708\,029 < I_0 = 83\,406\,350 < I_{02} = 84\,401\,119$$

D'où

$$\frac{(t_2 - t)}{(t_2 - t_1)} = \frac{(I_{02} - I_0)}{(I_{02} - I_{01})}$$

Ainsi

$$t = t_2 - \frac{(I_{02} - I_0)}{(I_{02} - I_{01})} \times (t_2 - t_1)$$

D'où $t = 0,285$

Ce qui nous donne un TRI = **26,85%**

Le TRI est supérieur à $i=16\%$ taux de remboursement bancaire, signifiant que le projet est donc rentable.

3.12 Délai de récupération

Cet indicateur fournit la durée de temps nécessaire pour faire revenir le capital investi à partir des résultats des activités. Donc temps nécessaire pour recouvrir les investissements sans procéder à une actualisation.

La méthode du « *pay-back time* » ne donne pas une règle générale pour la prise de décision d'investissement comme les deux méthodes précédentes. Le décideur doit donc estimer si la période de recouvrement lui semble suffisamment courte pour que l'investissement soit intéressant. Evidemment, ce temps de retour doit être inférieur à la durée de vie économique du projet. En général le « *pay-back time* » ne doit être utilisé qu'en complément des indicateurs de rentabilité, VAN et TRI. Pour notre cas :

$$DR = \frac{I_0}{b}$$

Avec

$$b = \frac{\text{Total FNT}}{5}$$

Ainsi nous avons : $DR = 2,32896037 \approx 2.329$

$$DR = \mathbf{2ans\ 3mois\ 28jours}$$

Ce délai est inférieur à l'échéance des emprunts donc, le risque d'insolvabilité est écarté.

Un délai court est un critère pour un investissement intéressant car cela facilite notamment les prévisions, ainsi que la stabilité de l'entreprise.

CONCLUSION

Ce travail nous a permis de mettre en évidence que les technologies des séchoirs solaires indirects constituent une des solutions de valorisation des plantes médicinales et aromatiques, notamment comme moyen de conservation. Contrairement aux travaux d'études habituelles qui consiste à établir des modèles mathématiques, nous nous sommes intéressé à exploiter les modules et prototype existants pour réaliser un séchoir pouvant contribuer à satisfaire aux besoins des opérateurs de la filière plante médicinale et aromatiques.

En effet, un séchoir solaire semi-industriel, répondant entièrement aux besoins de la société PRONAMA, a été construit et est actuellement fonctionnel.

Par ailleurs, nous avons avancé des modèles mathématiques associés à ce séchoir du côté de l'insolateur et également de l'armoire de séchage. Puis nous avons effectué des essais de séchage sur deux types de plantes médicinales, afin de déterminer les conditions optimales d'utilisation de notre unité de séchage.

Enfin, une étude financière, relatif à la création de cette unité de séchage a été menée. Etude qui nous a confirmé la performance et l'efficacité du séchoir.

En effet, les différents résultats issus des études financières, ont prouvés la viabilité et la rentabilité du projet. Entre autres :

- la VAN de 24 471 016 Ar
- le TRI de 26.85 %, largement supérieur au taux de l'emprunt pratiqué par le système bancaire actuel ;
- le DR (délai de récupération) des investissements de **2ans 3 mois 28 jours** de production.

A l'avenir, nous avons envisagé d'équiper notre unité des panneaux photovoltaïques pour fournir la quantité totale de l'énergie électrique nécessaire pour le fonctionnement des toutes les installations et équipements électriques. Ainsi, l'unité sera purement solaire et complètement autosuffisante en matière d'énergie.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Luc Adolphe-Claire Osms, « *Aéraulique et ventilation* »,
- [2] Michel Daguenet, « *Les séchoirs solaires : théorie et pratique* », UNESCO, 1985.
- [3] Helios, « *Premium Product* », catalogue 2.0, édition 2011.
- [4] Edith Ybert Tatiana DeleSalle-Féat, « *La Rousse Encyclopédie des plantes médicinales* », édition 2001.
- [5] LEROY SOMER, « *Moteurs asynchrones monophasés fermés. Carter alliage d'aluminium-0.06 à 5.5 kW* », Catalogue technique,
- [6] ANDRIAFENO RAJONANDRIANINA Laurencia, « *Contribution à l'étude et réalisation d'un séchoir à biomasse pour le curcuma à Analamalotra Tamatave* », Mémoire d'Ingénieur, 2014, 61 pages.
- [7] Alexandre LADIPO, « *Conception et mise au point d'un séchoir solaire polyvalent modulaire à vocation industrielle adapté au Bénin* », Thèse de Doctorat, 1988.
- [8] Africa Source for Renewable Energy, « *Africa Energy* », Copyright 2016 Africa Energy.
- [9] Charles COMBES, « *Modélisation informatique d'un système de séchage solaire pour fruits et légumes* », Thèse de Docteur Ingénieur Université de Paris VII, 1981.
- [10] A.V. LUIKOV, "Heat and mass transfert in capillary porous bodies", Pergamon Press, 1966.
- [11] H.M TAN and W.W.S. CHARTERS, "An expérimental investigation of forced-convective heat transfert for fully- developed turbulent flow in an rectangular duct with asymetric heating". Solar Energy, 13, 121 (1970).
- [12] BAILLY, « *Thermodynamique technique* », Bordas, Paris, 1971.
- [13] CHARM S.E, "Fundamentals of food Engineering", Avi.Publisching.Co; Westport. Connecticut 1963.
- [14] J.F. SACCADURA, « *Initiation aux transferts thermiques* ». Technique et Documentation, Paris 1978.
- [15] J.KHEDARI, « *Détermination expérimentale de la vitesse de séchage des denrées agroalimentaires* », Revues générale de la COMPLES, Acte du colloque international (Perpignan– France), 1994.
- [16] HOTTEL, H.C ET WILLIER, A., "Evaluation of flate-plate collector performance, Proceeding of the conference on the use of solar energy", University of Arizona, Vol 2, p: 74-104 1955.
- [17] A.DESCALESCU, « *Le séchage et ses applications industrielles* », Dunod, Paris, 1969

- [18] Valder Ajman, « Formation en phytothérapie, plantes médicinales et aromathérapie », Thèse de Doctorat, 2014
- [19] Schneider Electric, « Distribution Electric », Catalogue 2016, édition 2016

ANNEXES

ANNEXE N°1: EQUIPEMENTS POUR L'INSTALLATION PHOTOVOLTAIQUE

Pour une unité de séchage fonctionnant en énergie solaire totale, les équipements complémentaires suivants sont exigés.

1 CARACTERISTIQUES DES APPAREILS UTILILSES :

RECEPTUEURS	Puissance en Watt	Nombre	Durée d'utilisation en heure
Moteur	370	2	10
Lampe	5	2	6
Résistance	800	2	10
Ordinateur	300	1	2

1.1 Evaluation de la consommation énergétique journalière E_i

La consommation énergétique peut être évaluée soit en [Wh/j] soit en [Ah/j]. Il existe deux possibilités de consommation, dont :

a) Consommation en courant continu (CC)

$$E_{cc} = \sum_{i=1}^n P_i n_i h_i \quad [\text{Wh/j}]$$

n : nombre d'équipement en CC,

P_i : puissance de l'équipement i,

n_i : nombre de l'équipement i,

h_i : heures de marche de l'équipement i.

b) Consommation en courant alternatif

$$E_{ca} = \sum_{i=1}^m P_i n_i h_i$$

m : nombre d'équipement en CA,

P_i : puissance de l'équipement i,

n_i : nombre de l'équipement i,

h_i : heures de marche de l'équipement i.

Dans notre installation, les appareils utilisés sont tous alimentés par un courant alternatif. Ce qui emmène à utiliser la seconde formule.

Ainsi :

$$E_{ca} = (370 \times 2 \times 10) + (5 \times 2 \times 6) + (300 \times 2) + (800 \times 2 \times 10)$$

Ce qui nous donne une consommation de **24 060 [wh/j]**

c) Consommation totale journalière

$$E_T = E_{cc} + \frac{E_{ca}}{n_{ond}} \quad [\text{Wh/jour}]$$

Avec :

η_{ond} : Rendement de l'onduleur

$$\eta_{ond} = 0,95$$

Alors :

$$E_T = \frac{24\,060}{0.95}$$

Alors : $E_T = 25\,327 \text{ [wh/j]}$

1.2 Evaluation de tension et de la puissance du système

La connaissance de la puissance du système nous permet de connaître à l'avance le choix de la tension à utiliser. Et les choix des différents appareils (Onduleurs, régulateur,..) y dépendent.

a) Puissance

$$P_T = \sum_{i=1}^n K_i P_i n_i$$

Avec k_i : coefficient de simultanéité.

Et nous allons prendre $k_i = 1$

$$P_T = (370 \times 2) + (5 \times 2) + (300 \times 1) + (800 \times 2)$$

Ainsi $P_T = 2\,650 \text{ [w]}$

b) Choix de la tension

- 12V pour $P_T \leq 200W$
- 24V pour $P_T \leq 1000W$
- 48V pour $P_T \geq 1000W$

Dans ce cas, nous allons prendre donc une tension de 48V, car la puissance de notre système est supérieure à 1000W.

Nous allons prendre donc l'onduleur Phoenix VICTRON de 48/5000[VA].

Tableau N° 1: Caractéristique de l'Onduleur VICTRON

Onduleur Phoenix VICTRON	48/5000[VA]
Plage de tension d'entrée [v]	38-66
Puissance de sortie de l'onduleur à 25 °C	5 000W
Puissance de l'Onduleur à 25°C	4 500 [W]
Puissance de l'Onduleur à 40°C	4 000 [W]

Puissance de pointe	10 000 [W]
Efficacité maxi à 48[V]	94/95%

Source : Fiche technique convertisseur Phoenix



Figure 1. Onduleur Phoenix VICTRON 48/5000 [VA]

1.3 Calcul du nombre de modules

a) Le nombre de branche sert à déterminer le nombre de modules nécessaires

$$b = \frac{E_T}{U \cdot K \cdot H \cdot I_{max}}$$

Avec k : coefficient correctif, $k = 0,7$ à $0,80$

I_{max} : courant max de charge sous les conditions crêtes,

H : nombre d'heures équivalent à l'irradiation $1000W/m^2$

$$b = \frac{25\,327}{48 \times 0,78 \times 5,2 \times 7,56}$$

Dans notre cas, nous avons $b = 17,2$. Alors nous prenons $b = 18$

b) Le nombre de module N

- $N = b$ pour $U = 12V$,
- $N = 2b$ pour $U = 24V$,
- $N = 4b$ pour $U = 48V$.

Le nombre de module nécessaire pour notre installation est de 72 modules de marque : AFR 130 à 36 cellules. C'est un module photovoltaïque polycristallin.

Tableau N° 2: Caractéristiques du panneau solaire :

Tension à puissance maximal	17.2 V
Courant à puissance maximale	7.86 A
Tension à circuit ouvert	21.6 V
Courant de court-circuit	8.21 A
Courant de seuil à la coupure	12 A



Figure 2. Panneau solaire AFR 130

1.4 Evaluation de la capacité réelle

Pour la détermination de la capacité de la batterie, nous avons comme formule :

$$C = \frac{nE_T}{K_D U}$$

Avec n : nombre de jour d'autonomie,

K_D : coefficient de décharge.

E_T : consommation totale

U : tension

$$C = \frac{3 \times 25\,327}{0.80 \times 48}$$

Nous avons **C= 1 977Ah**

Ce qui conduit à choisir 24 batteries de 2V en séries de marque SOPzS / 1 380Ah/ 41 280[Wh].

1.5 Choix du régulateur

Le choix du régulateur est pris en connaissant le courant de sortie maximal et le courant de court-circuit.

Le courant de sortie maximal du consommateur :

$$I_{n1} = \frac{P_T}{U_{min}}$$

Avec U_{min} Tension minimale

$$I_{n1} = \frac{2\,650}{47}$$

$$I_{n1} = 58,38\,A$$

Notre choix se porte alors à un régulateur Victron MPPT 150/100-Type MC4

Le régulateur de charge et de décharge optimise l’énergie produite par le panneau solaire. Il sert à régulariser la charge que la batterie devrait recevoir. La surcharge de la batterie est évitée par son utilisation, qui la maintient dans un état voisine de la pleine charge. Cela augmentera sa durée de vie et limite sa profondeur de décharge.

Tableau N° 3: Caractéristique du régulateur VICTRON

Régulateur VICTRON	MPPT 150/100
Tension batteries	48V
Courant de charge	100A
Tension maximal champ photovoltaïque(PV)	150Voc
Puissance maximale champ PV	5800W

Source : Fiche technique Régulateur Victron



Figure 3. Régulateur Victron
F

1.6 Inclinaison et orientation des modules photovoltaïques

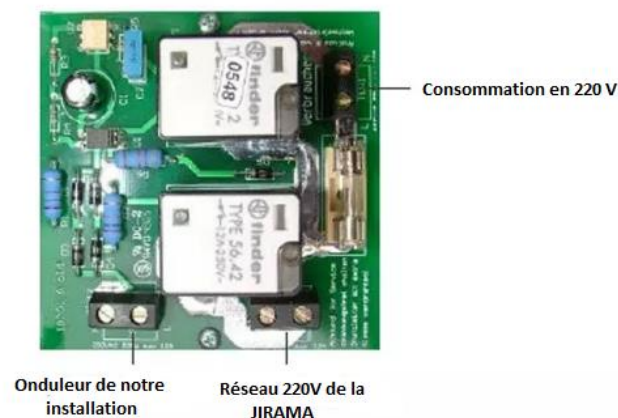
Comme nous le savons, Madagascar se trouve dans l'hémisphère sud, c'est pourquoi l'inclinaison des modules photovoltaïques est orientée vers le NORD pour que les modules puissent arriver à sa puissance maximale. Notre site d'étudier se situe à Antanimenakely ayant comme coordonnée géographique : 17.55°Sud de latitude et 47.51° Est de longitude.

En tenant compte de ces coordonnées, l'inclinaison de notre module sera donc, 30° par rapport à l'horizontale et incliné vers le Nord.

1.7 Module by-pass

Pour coupler l'installation solaire avec le réseau de la JIRAMA nous ne pouvons pas les brancher directement ensemble, sinon, il risquera d'y avoir un court-circuit. Pour y remédier, nous allons utiliser un module by-pass, qui permettra l'exploitation des deux sources d'électricité. Cet appareil effectue automatiquement le basculement entre l'installation solaire autonome vers la source de 220V du réseau électrique.

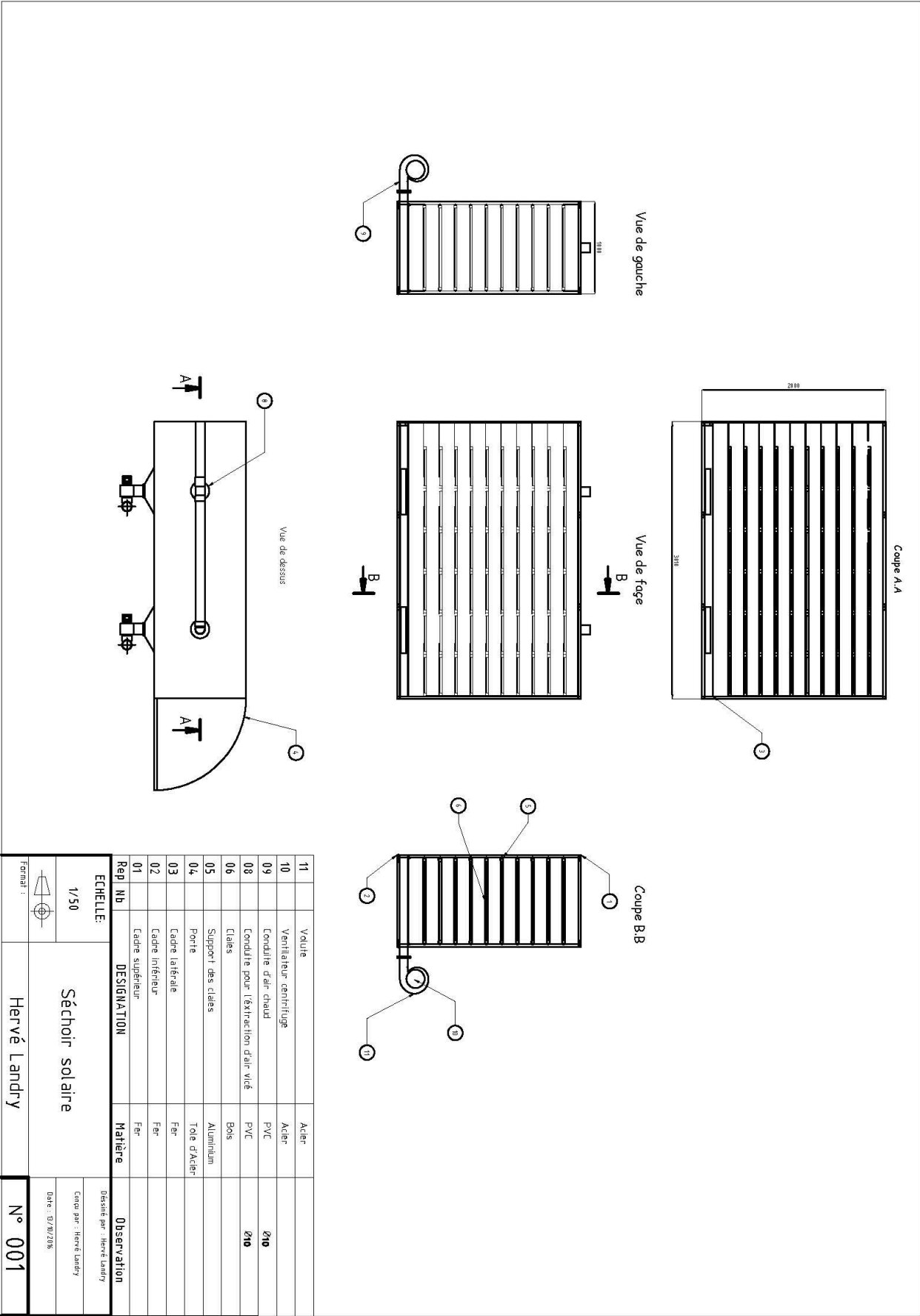
Le module by-pass détecte automatiquement l'énergie de l'installation solaire et si celle-ci n'est plus suffisante, bascule automatiquement sur le réseau de la JIRAMA. Et l'opération inverse est possible lorsque c'est le solaire qui prend le relais quand le réseau électrique n'est pas disponible, afin d'éviter les coupures de courants. Pour se faire, il suffit seulement de définir le réseau prioritaire.



Source : Arrow solar energy

Figure 4. Module by-pass

2 DESSIN DE L'ARMOIRE DE SECHAGE



**Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER 2 EN GENIE ELECTRIQUE
Grade d'Ingénieur**

Auteur : ANDRIATSITOHAINA Hervé Landry

Téléphone : 034 53 542 73

E- mail : landly.tsitohaina@yahoo.fr

Titre du mémoire :

**« CONTRIBUTION A L'ETUDE ET REALISATION D'UN SECHOIR
SOLAIRE POUR PLANTES MEDICINALES DROSE
RAMANTAECA ET CENTELLA ASIATICA »**

Nombre de page : 100 pages

Nombre de figure : 50 figures

Nombre de tableau : 31 tableaux

RESUME

Ce travail nous a permis de mettre en évidence l'importance de l'exploitation de modèle mathématique et de prototype de séchoir solaire existant.

En effet, en partant des acquis du CNRIT en matière de conception et réalisation de séchoir solaire, nous avons pu mettre à jour un séchoir solaire performant pour le séchage des plantes médicinales et aromatiques, notamment celles destinées à l'exportation. Il est évident que des améliorations ont été apportées au sein de ce nouveau séchoir, surtout au niveau de la capacité de production, du système de ventilation et de la consommation électrique.

Mots clés : Séchoir solaire, plantes médicinales, insolateur plan

ABSTRACT

This work allowed us to underscore the importance of the exploitation of mathematical model and an existing typical solar dryer example.

Indeed, starting from the CNRIT's asset in the design and production of solar dryers, we were able to update an efficient solar dryer for the drying of medicinal and aromatic plants, especially those intended for export. It is clear that improvements have been made in this new dryer, especially in terms of production capacity, airing system and electricity consumption.

Keywords: Solar dryer, medicinal plants, plan sunstroke.