

SOMMAIRE

| | |
|--|------|
| Remerciements | i |
| SOMMAIRE..... | ii |
| LISTE DES NOTATIONS | iii |
| LISTE DES ABREVIATIONS | viii |
| LISTE DES FIGURES | ix |
| LISTE DES TABLEAUX..... | xi |
| LISTE DES PHOTOS | xii |
| INTRODUCTION | 1 |
| PARTIE I : BASES THÉORIQUES..... | 3 |
| <i>CHAPITRE I : GISEMENT SOLAIRE</i> | 4 |
| <i>CHAPITRE II : RAPPELS SUR LES TRANSFERTS THERMIQUES</i> | 21 |
| <i>CHAPITRE III : GENERALITES SUR LE SECHAGE</i> | 32 |
| PARTIE II : REALISATION ET EXPERIMENTATION D'UN SECHOIR SOLAIRE | 48 |
| <i>CHAPITRE I : CONCEPTION DU SECHOIR</i> | 49 |
| <i>CHAPITRE II : RESULTATS ET DISCUSSIONS</i> | 61 |
| CONCLUSION | 89 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 90 |
| ANNEXES | I |
| <i>Table des matières</i> | IV |

LISTE DES NOTATIONS

| | |
|------------|--|
| ϕ | : Latitude en degré (°) |
| L | : Longitude en degré (°) |
| δ | : Déclinaison en degré (°) |
| n | : Numéro du jour |
| ω | : Angle horaire en degré (°) |
| h | : Hauteur angulaire du soleil en degré (°) |
| h_m | : Angle d'élévation à midi en degré (°) |
| z | : Angle solaire zénithal en degré (°) |
| ω_s | : Angle horaire de coucher du soleil en degré (°) |
| H_{cs} | : Heure de coucher du soleil en heure (h) |
| H_{ls} | : Heure de lever du soleil en heure (h) |
| α | : Angle solaire azimutal en degré (°) |
| θ | : Angle d'incidence solaire en degré (°) |
| β | : Inclinaison de la surface orientée en degré (°) |
| α_s | : Angle extérieur d'azimut en degré (°) |
| G_{cs} | : Constante solaire en W/m^2 |
| G_{on} | : Radiation extraterrestre en W/m^2 |
| G_{oH} | : Puissance incidente à la surface de la radiation extraterrestre en W/m^2 |
| H_o | : Radiation extraterrestre journalière sur une surface horizontale en J/m^2 ou kW/m^2 ou kWh/m^2 . |
| I_o | : Radiation extraterrestre sur une surface horizontale pendant une période horaire en J/m^2 |
| G | : Rayonnement global sur une surface horizontale en W/m^2 |
| G_B | : Rayonnement direct sur une surface horizontale en W/m^2 |

- G_D : Rayonnement diffus sur une surface horizontale en W/m^2
- r : Rapport du rayonnement global horaire en moyenne mensuelle au rayonnement global journalier en moyenne mensuelle
- \bar{I} : Rayonnement global horaire en moyenne mensuelle sur une surface horizontale en W/m^2
- \bar{H} : Rayonnement solaire global journalier en moyenne mensuelle sur une surface horizontale en kW/m^2 ou kWh/m^2
- r_D : Rapport du rayonnement diffus horaire en moyenne mensuelle au rayonnement diffus journalier en moyenne mensuelle
- \bar{I}_D : Rayonnement diffus horaire en moyenne mensuelle en W/m^2
- \bar{H}_D : Rayonnement diffus journalier en moyenne mensuelle en kW/m^2 ou kWh/m^2
- G_{Bt} : Rayonnement direct sur une surface inclinée en W/m^2
- G_{Dt} : Rayonnement diffus sur une surface inclinée en W/m^2
- G_{Gt} : Rayonnement réfléchi au sol en W/m^2
- ρ_g : Albédo du sol
- R_B : Facteur de rayonnement direct sur une surface inclinée.
- R : Facteur de rayonnement total sur une surface inclinée
- \bar{H}_t : Rayonnement global journalier en moyenne mensuelle sur une surface inclinée en kW/m^2 ou Wh/m^2
- \bar{R}_B : Facteur du rayonnement direct mensuel significatif sur une surface inclinée
- \bar{H}_B : Rayonnement direct journalier en moyenne mensuelle sur une surface horizontale en kW/m^2 ou kWh/m^2
- \bar{H}_D : Rayonnement diffus journalier en moyenne mensuelle sur une surface horizontale en kW/m^2 ou kWh/m^2
- ω'_s : Angle de coucher du soleil sur une surface inclinée en degré ($^\circ$)

\bar{R} : Facteur de rayonnement total journalier en moyenne mensuelle sur une surface inclinée

\bar{K}_T : Coefficient de clarté

\bar{H}_0 : Rayonnement extraterrestre journalier en moyenne mensuelle frappant une surface horizontale en kW/m^2 ou kWh/m^2

\bar{I}_t : Rayonnement global horaire en moyenne mensuelle en toute heure sur une surface inclinée en W/m^2

\bar{I}_B : Rayonnement direct horaire en moyenne mensuelle sur une surface horizontale en W/m^2

\bar{I}_D : Rayonnement diffus horaire en moyenne mensuelle sur une surface horizontale en W/m^2

\bar{R}' : Facteur de rayonnement total horaire en moyenne mensuelle sur une surface inclinée

λ_t : Conductivité thermique en $\text{W.m}^{-1}\text{C}^{-1}$ ou en $\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$

h_c : Coefficient d'échange par convection en $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

ρ : Masse volumique,

C_p : Chaleur massique

μ : Viscosité dynamique

β : Coefficient de dilatation du fluide

λ : Longueur d'onde en μm

h : Constante de Planck en J.s

C : Vitesse de la lumière en m/s

k : Constante de Boltzmann en J/K

$E_{\lambda T}$: Emittance monochromatique du corps noir exprimé en W.m^{-3}

E_T : Emittance totale du corps noir en W.m^{-2}

ε_λ : Facteur d'émission monochromatique

M_T : Facteur d'émission totale en W.m^{-2}
 $\rho_{\lambda,T}$: Pouvoir monochromatique réfléchissant
 $\alpha_{\lambda,T}$: Pouvoir monochromatique absorbant
 $\tau_{\lambda,T}$: Pouvoir monochromatique filtrant
 ϕ_0 : Flux total du rayonnement incident au point d'impact en W
 H_r : Humidité relative en %
 P_v : Pression partielle de la vapeur d'eau en Pa
 P_{sat} : Pression de vapeur saturante à l'équilibre en Pa
 H_a : Humidité absolue en %
 m_v : Masse de vapeur d'eau en kg
 $m_{\text{air sec}}$: Unité de masse d'air sec en kg
 m_e : Masse d'eau en kg
 m_s : Masse sèche en kg
 X_s : Teneur en eau en base sèche en $\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{masse sèche}}$
 X_h : Teneur en eau en base humide en %
 A_w : Activité de l'eau
 T_{ms} : Taux de matière sèche en %
 m_w : Quantité d'eau qu'on doit enlever du produit en kg
 m_p : Quantité à sécher de produit frais en kg
 X_{Si} : Teneur en eau initiale du produit en %
 X_{Sf} : Teneur en eau finale du produit en %
 E_p : Energie requise pour évaporer la vapeur d'eau en J
 L_v : Chaleur latente de vaporisation de l'eau en kJ/kg
 E_a : Energie acquise par l'air en J

| | |
|-------------|--|
| I_T | : Intensité solaire en W/m^2 |
| A_c | : Aire du capteur en m^2 |
| η_c | : Rendement du capteur en % |
| t_d | : Temps de séchage en heure (h) |
| \dot{m}_a | : Débit massique du flux d'air en kg/s |
| C_{pa} | : Chaleur spécifique de l'air en $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ |
| ΔT | : Différence de température en K |
| ρ_a | : Densité de l'air en $kg \cdot m^{-3}$ |
| V_a | : Débit volumique du flux d'air en $m^3 \cdot s^{-1}$ |
| A | : Aire de l'entrée d'air en m^2 |
| v_a | : Vitesse de l'air en $m \cdot s^{-1}$ |
| h | : Hauteur de l'entrée d'air en m |
| l | : Largeur de l'entrée d'air en m |
| M_{dr} | : Rendement moyen de séchage en $kg \cdot h^{-1}$ |
| Q_U | : Gain de chaleur en W |
| Q_L | : Perte de chaleur par convection en W |
| t_b | : Epaisseur de base de l'isolation en m |
| F_R | : Facteur d'élimination de chaleur |

LISTE DES ABREVIATIONS

TSA : Temps Solaire Apparent en heure (h)

TSL : Temps Standard Local en heure (h)

ET : Equation du Temps en minute (min)

LS : Longitude Standard en degré (°)

LL : Longitude Locale en degré (°)

Rapport-Gratuit.com

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Mouvement annuel de la Terre autour du soleil. Source [4]..... | 5 |
| Figure 2 : Sphère céleste et système de coordonnées.Source [6] | 6 |
| Figure 3 : Latitude et longitude. Source [6]..... | 7 |
| Figure 4 : Définitions de déclinaison et angle horaire. Source [4] | 9 |
| Figure 5 : Mouvement apparent journalier du soleil depuis le lever jusqu'au coucher. Source [4]..... | 11 |
| Figure 6 : Schémas des angles solaires. Source [4] | 12 |
| Figure 7: Les types de rayonnement. | 14 |
| Figure 8 : Rayonnement direct sur une surface horizontale.Source [4]..... | 15 |
| Figure 9 : Rayonnement direct sur une surface inclinée. Source [4] | 16 |
| Figure 10 : Transfert de chaleur par conduction dans un matériau homogène. Source[15] | 22 |
| Figure 11 : Emittance d'un corps noir à 100° C. Source [15] | 25 |
| Figure 12 : Réception d'un rayonnement par un solide.Source [20]..... | 27 |
| Figure 13 : Courbe d'isotherme d'adsorption (A) et de désorption (B).Source [16]..... | 35 |
| Figure 14 : Séchoir solaire actif direct de type serre.Source [4]..... | 38 |
| Figure 15 : Séchoir solaire actif direct de type serre avec toit collecteur. Source [4] | 38 |
| Figure 16 : Séchoir solaire actif de type indirect. Source [4] | 39 |
| Figure 17 : Séchoir solaire actif de type mixte. Source [4] | 39 |
| Figure 18 : Séchoir solaire passif de type direct. Source [4] | 40 |
| Figure 19 : Séchoir solaire passif de type indirect. Source [4] | 41 |
| Figure 20 : Séchoir solaire passif de type mixte. Source [4] | 42 |
| Figure 21 : Graphes des prestations | 49 |
| Figure 22 : Identifications des fonctions services..... | 49 |
| Figure 23 : Vue éclatée des éléments du capteur..... | 54 |
| Figure 24 : Chicanes disposées sur le conduit d'air | 55 |
| Figure 25 : Schéma simplifié de l'armoire de séchage..... | 57 |
| Figure 26 : Processus vertical pour la représentation du diagramme solaire..... | 62 |
| Figure 27 : Diagramme solaire pour tout le 17ième jour du mois de l'année 2017 | 63 |
| Figure 28 : Diagramme solaire du 27 et 28 Février 2017 | 64 |
| Figure 29 : Diagramme solaire du 1 au 3 Mars 2017 | 65 |
| Figure 30 : Bases de données climatiques utilisées pour les calculs de l'estimation solaire. Source [25] | 66 |

| | |
|--|----|
| Figure 31: Processus pour le calcul de rayonnement global sur une surface inclinée | 67 |
| Figure 32 : Comparaison de valeurs obtenues | 68 |
| Figure 33 : Comparaison des variations d'angle | 69 |
| Figure 34: Etapes pour le calcul du rayonnement global horaire sur une surface inclinée | 70 |
| Figure 35 : Comparaison des valeurs du rayonnement global horaire pour le mois de février..... | 71 |
| Figure 36: Comparaison des valeurs du rayonnement global horaire pour le mois de mars..... | 72 |
| Figure 37 : Comparaison des valeurs du rayonnement global horaire pour le mois d'avril | 73 |
| Figure 38 : Variation de température dans l'enceinte | 81 |
| Figure 39 : Variation de température dans l'enceinte pour le séchage de la pomme..... | 83 |
| Figure 40 : Calendrier cultural des récoltes. Source [27] | 87 |
| Figure 41 : Courbes de période de séchage. Source [19]..... | II |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Numéro du jour moyen recommandé pour chaque mois. Source [11] | 19 |
| Tableau 2 : Propriétés du contreplaqué..... | 50 |
| Tableau 3 : Propriétés du verre ordinaire de 4mm d'épaisseur | 51 |
| Tableau 4 : Propriétés du polystyrène..... | 52 |
| Tableau 5 : Propriétés de l'absorbeur sélectionné..... | 53 |
| Tableau 6 : Dimensions de la couverture en verre..... | 54 |
| Tableau 7 : Dimensions de l'absorbeur | 55 |
| Tableau 8 : Dimensions des éléments constitutifs des chicanes | 55 |
| Tableau 9 : Dimensions des éléments de l'isolation | 56 |
| Tableau 10 : Dimensions des éléments du caisson | 56 |
| Tableau 11 : Dimensions des éléments de l'armoire de séchage | 58 |
| Tableau 12 : Dimensions des claies | 58 |
| Tableau 13 : Dimensions de la portière | 58 |
| Tableau 14 : Données du diagramme | 62 |
| Tableau 15 : Valeurs du rayonnement global journalier en moyenne mensuelle sur une surface inclinée | 68 |
| Tableau 16 : Rayonnement global horaire en moyenne mensuelle du mois de février .. | 71 |
| Tableau 17 : Rayonnement global horaire en moyenne mensuelle pour le mois de mars | 72 |
| Tableau 18 : Rayonnement global horaire en moyenne mensuelle pour le mois d'avril | 73 |
| Tableau 19 : Résultats de séchage de l'ananas | 80 |
| Tableau 20 : Résultats de séchage de la pomme..... | 80 |
| Tableau 21 : Données météorologiques. Source auteur..... | 81 |
| Tableau 22 : Données météorologiques. Source auteur..... | 82 |
| Tableau 23: Prix de revient du capteur | 84 |
| Tableau 24 : Evaluation du prix de revient de l'armoire de séchage | 85 |
| Tableau 25 : Matériels supplémentaires intervenants | 85 |
| Tableau 26 : Main d'œuvre et transport..... | 85 |
| Tableau 27 : Prix de revient du séchoir | 86 |
| Tableau 28 : Retour d'investissement pour le séchage de la pomme..... | 87 |
| Tableau 30 : Table des valeurs de $F_{0-\lambda T}$ en fonction de λT . Sources [4][11] | I |

LISTE DES PHOTOS

| | |
|--|----|
| Photo 1 : Le séchoir solaire passif de type indirect | 60 |
| Photo 2 : Ananas après prétraitements..... | 75 |
| Photo 3: Pommes avant séchage | 76 |
| Photo 4 : Balance utilisée lors du pesage..... | 77 |
| Photo 5 : Premier thermomètre | 78 |
| Photo 6 : Deuxième thermomètre | 78 |
| Photo 7 : Installation des thermomètres..... | 79 |

INTRODUCTION

Dans la majorité des pays en voie de développement, l'économie repose principalement sur l'agriculture.[1] Madagascar ne déroge pas à cette règle avec une population de 85% œuvrant essentiellement dans ce domaine clé. En dépit de ce taux important, la production alimentaire ne satisfait pas aux besoins de la population. De plus, les méthodes de conservation des produits sont dans la plupart des cas inadéquates amenant ainsi à des pertes conséquentes réduisant significativement l'approvisionnement alimentaire. Notre intérêt se porte particulièrement sur les fruits qui sont des denrées abondantes mais périssables dans les pays tropicaux comme le nôtre. Les fruits sont des ressources alimentaires essentielles et pécuniaires mais leurs disponibilités à cause des fluctuations saisonnières et les pertes de récoltes sont non négligeables faute de moyens de conservation et/ou de transformations appropriés.[2]

Le séchage est depuis toujours, une méthode répandue pour empêcher leur détérioration. Il augmente la durée de leur conservation. Le séchage solaire est un moyen courant pour la conservation des fruits à cause de forts ensoleillement tout au long de l'année. La conception d'un système de séchage solaire opérationnel doit se faire en tenant compte des récoltes propres à la région considérée, du type de séchage spécifique à effectuer et du gisement solaire exploitable sur le site considéré.

L'utilisation de l'énergie solaire fait partie depuis toujours de l'histoire humaine. Le séchage solaire à l'air libre a été longtemps le moyen le plus utilisé. Malgré cela, cette méthode souffre d'inconvénients sanitaires, climatiques et biologiques affectant grandement la qualité des produits finis. Cependant, un fort accroissement de l'usage des séchoirs solaires est récemment constaté du fait de leur efficacité. La finalité d'un séchoir est de fournir le maximum de chaleur disponible, sous les conditions ambiantes par le biais de l'énergie solaire thermique, qui est utilisée comme source d'énergie principale ou supplémentaire et le flux d'air à l'intérieur de ce dispositif peut être généré par convection naturelle ou forcée. Une initiation à l'utilisation de séchoirs solaires économiques et fabriqués avec les matériaux locaux pourrait réduire les pertes durant les récoltes et améliorer notablement la qualité des produits séchés comparée aux méthodes conventionnelles de séchage.

Divers recherches sur le séchage solaire ont été déjà entrepris. L'objectif de notre travail était de procurer une meilleure approche technique et une évaluation financière du

processus de séchage solaire à partir d'un séchoir passif de type indirect que nous avons conçu pour sécher deux types de fruit, la pomme et l'ananas.

Les travaux et résultats sont consignés dans ce manuscrit qui comporte deux grandes parties distinctes :

- La première partie, subdivisée en trois chapitres, traite du gisement solaire, des rappels sur les transferts thermiques et des généralités du séchage solaire.
- La deuxième partie subdivisée en deux chapitres est consacrée aux méthodes et matériaux mis en œuvre pour la conception du séchoir solaire et traite des résultats obtenus ainsi que leurs interprétations.

PARTIE I : BASES THÉORIQUES

CHAPITRE I : GISEMENT SOLAIRE

La source d'énergie la plus abondante disponible pour l'humanité est l'énergie solaire. La connaissance du gisement solaire pour une région donnée est primordiale lors de la conception d'une application utilisant l'énergie solaire car l'environnement où elle fonctionne dépend énormément de l'énergie solaire à disposition dans ce lieu. En effet, savoir la trajectoire du soleil dans le ciel est nécessaire pour calculer le rayonnement reçu sur une surface, la disposition et l'orientation propre des capteurs pour éviter les ombrages et les dimensionnements du système de conversion d'énergie et la chaleur accumulée. [3] [4]

Dans ce chapitre nous définirons d'abord les mouvements relatifs du soleil par rapport à la terre lors de sa trajectoire dans le ciel avec des systèmes de coordonnées bien définis et après, nous donnerons un modèle d'estimation de l'énergie solaire disponible.

I.1 - L'énergie solaire

I.1.1 - Généralités

L'énergie solaire est la seule source d'énergie externe de la terre. L'énergie solaire arrive sur terre sous forme de radiation constituée de spectres généralement visibles entre l'infrarouge et l'ultraviolet. Les rayonnements solaires sont considérés comme composés d'ondes électromagnétiques qui est fondamental pour toutes applications en solaire thermique et pour le revêtement anti-réflexion des cellules solaires et de flux de photons essentiels pour les applications concernant les cellules et la photochimie solaire. Pour le gisement solaire, presque toutes les régions de Madagascar disposent de plus de 2.800 heures d'ensoleillement annuel. Avec $2.000\text{kWh/m}^2/\text{an}$, le pays figure parmi les pays riches en potentiel d'énergie solaire. [5] [6]

I.1.2 - Captation et utilisation [7]

Il existe divers techniques pour capter une partie de l'énergie solaire et l'utiliser. L'énergie solaire thermique est le procédé de transformation de l'énergie solaire sous une forme thermique pour utiliser la chaleur obtenue à un usage direct (chauffe-eau solaire, chauffage solaire, cuisinière et séchoir solaire) ou indirect (centrales solaires thermodynamiques, froid solaire). L'énergie solaire thermodynamique utilise l'énergie solaire thermique pour produire de l'électricité selon le même principe qu'une centrale électrique classique mais en utilisant des centrales héliothermoélectriques. L'énergie

solaire photovoltaïque permet de produire de l'électricité par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque.

I.1.3 - Mouvement de la terre autour du soleil [4] [8] [9]

La terre effectue une rotation autour de son axe en 24 heures qui forme un angle de $23^{\circ} 27.14\text{min}$ ($23^{\circ}45'$) sur le plan elliptique ou se trouve le plan de l'orbite terrestre et l'équateur solaire et effectue une révolution complète autour du soleil pendant une période approximative de 365,25 jours. Les mouvements relatifs Terre-Soleil ne sont pas simples, mais ils sont systématiques et de ce fait prévisibles. On sait généralement que le soleil est plus haut dans le ciel en été qu'en hiver; le mouvement apparent naturel du soleil se produit quand le soleil effectue un arc à travers le ciel atteignant son plus haut point à midi.

Dans l'hémisphère Nord le 21 Juin, le soleil se trouve à la position extrême nord face à la terre appelée solstice d'été, durant lequel la journée est la plus longue tandis que le 21 Décembre, le solstice d'hiver l'opposé se produit et le soleil se trouve à la position extrême sud face à la terre. Entre les six mois, c'est-à-dire le 21 Mars et le 21 Septembre, la durée d'un jour est égale à celle de la nuit. Les solstices d'été et d'hiver sont différents dans l'hémisphère Sud car le solstice d'été est le 21 Décembre et le solstice d'hiver le 21 Juin.

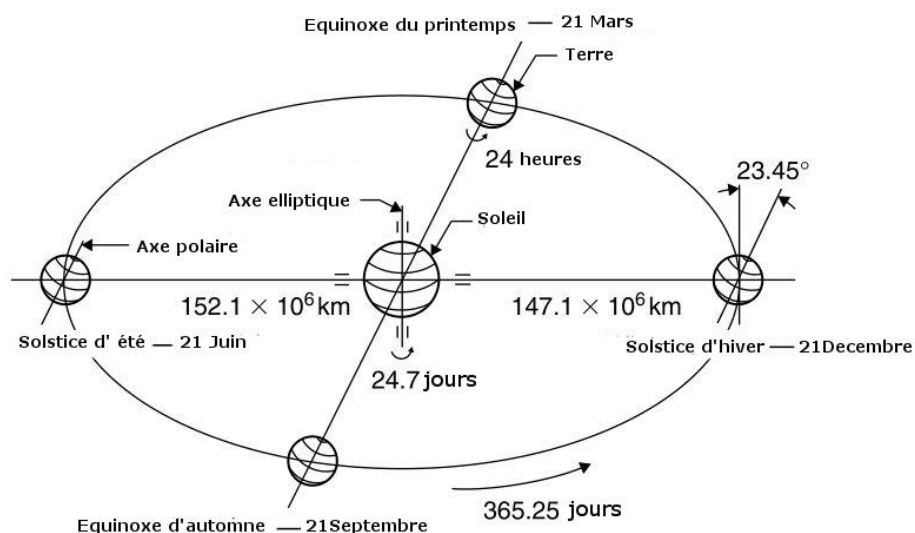


Figure 1 : Mouvement annuel de la Terre autour du soleil. Source [4]

I.2 - Systèmes de coordonnées [4] [6] [9] [10]

Pour un observateur sur la terre, le soleil comme tout autre astre est localisé sur une sphère imaginaire de rayon large et indéfini appelé sphère céleste. En considérant que

tout mouvement est relatif, il est convenable de considérer la Terre comme immuable et de décrire le mouvement virtuel du soleil par un système de coordonnées fixe à la terre avec comme origine le site qui nous intéresse. A cet effet, la position du soleil sur la sphère céleste est aisément définissable pour un observateur depuis la Terre avec les angles astronomiques : la hauteur angulaire h et l'angle solaire azimut α .

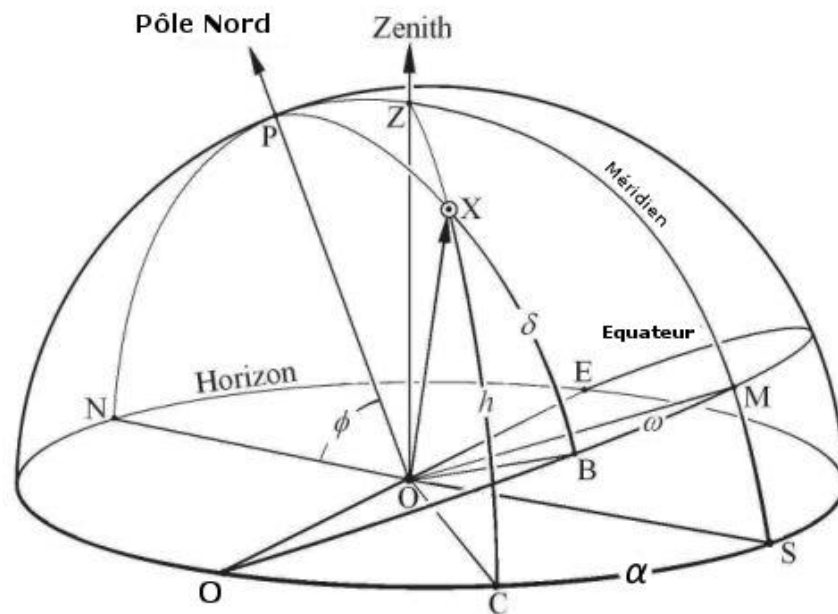


Figure 2 : Sphère céleste et système de coordonnées. Source [6]

I.2.1 - Coordonnées géographiques

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre.

a. - Latitude

La latitude ϕ d'un lieu correspond à l'angle avec le plan équatorial, que fait le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu. L'équateur terrestre est donc caractérisé par une latitude égale à 0° , le pôle nord par la latitude $+90^\circ$ et le pôle sud par la latitude -90° .

b. - Longitude

La longitude L d'un lieu correspond à l'angle que fait le plan méridien passant par ce lieu avec un plan méridien retenu comme origine. On a choisi pour méridien (origine 0°) le plan passant par l'observatoire de Greenwich.

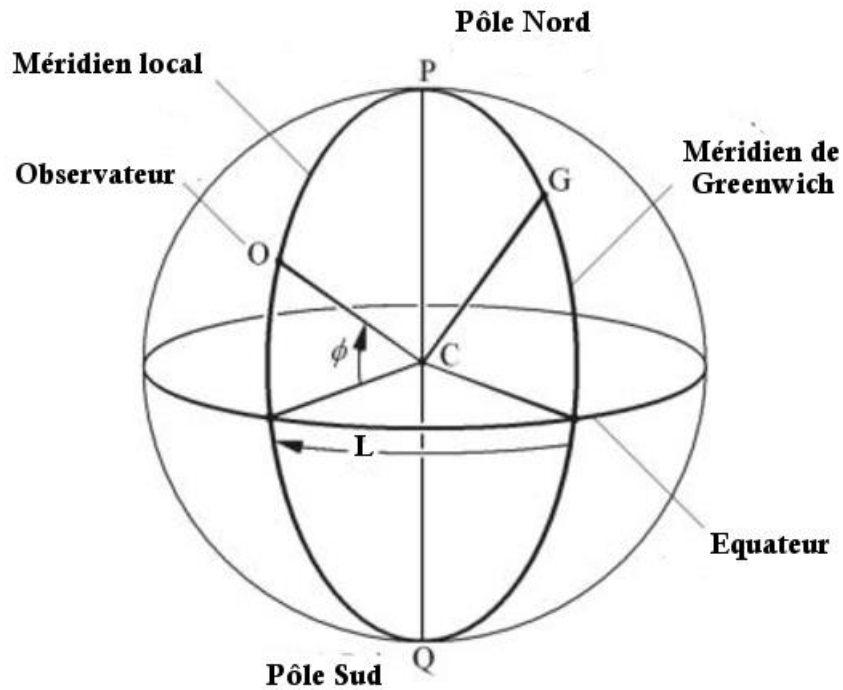


Figure 3 : Latitude et longitude. Source [6]

I.2.2 - Coordonnées horaires

a. - Déclinaison δ

La déclinaison solaire est la distance angulaire des rayons du soleil vers le nord (ou vers le sud) de l'équateur. La déclinaison vers le nord est positive et celle vers le sud est négative. Elle varie de 0° pendant l'équinoxe de printemps à $+23,45^\circ$ pendant le solstice d'été et de 0° pendant l'équinoxe d'automne à $-23,45^\circ$ pendant le solstice d'hiver. La déclinaison δ en degré pour un jour quelconque (n) de l'année peut être calculée approximativement pour les calculs d'ingénieries par l'équation suivante :

$$\delta = 23,45 \sin\left[\frac{360}{365} (284 + n)\right] \quad (I.1)$$

b. - Calcul du temps

Pour les calculs liés à l'énergie solaire, le Temps Solaire Apparent (TSA) doit être utilisé pour l'expression de l'heure pour une journée. Le temps solaire apparent est basé sur le mouvement angulaire apparent du soleil dans le ciel. Le temps où le soleil traverse le méridien de l'observateur est le Midi (ou midi pile) qui est l'heure où le soleil est le plus haut dans le ciel (culmination) et où l'ombre d'un objet est donc la plus courte. Elle indique précisément le sud (dans l'hémisphère nord) ou le nord (dans l'hémisphère sud), en dehors des zones équatoriales comprises entre les deux tropiques. Ce temps ne coïncide pas avec 12h00 de l'horloge locale. Pour convertir le Temps Standard Local (TSL) en

Temps Solaire Apparent, il y a deux corrections à effectuer : l'équation du temps et la correction de longitude.

Equation du Temps :

Due aux facteurs associés à l'orbite terrestre autour du soleil, la vitesse de l'orbite terrestre varie tout au long de l'année et le temps solaire apparent varie significativement par rapport à l'heure donnée par une horloge à vitesse uniforme. Cette variation est appelée Equation du Temps (ET). Les valeurs de l'Equation du Temps (en minutes) en fonction d'un jour de l'année (n) peuvent être obtenues approximativement par l'équation suivante :

$$ET = 9,87 \sin (2B) - 7,53 \cos (B) - 1,5 \sin (B) \quad (I.2)$$

$$\text{Avec } B = (n - 81) \frac{360}{365} \quad (I.3)$$

Correction de longitude :

L'heure standard d'une horloge est calculée à partir d'un méridien sélectionné près du centre de la zone du temps ou à partir du méridien standard (méridien de Greenwich) dont la longitude est de 0° . Lorsque le soleil effectue 4 min pour traverser 1° de longitude, une correction de longitude de $4 \times (\text{Longitude Standard} - \text{Longitude Locale})$ doit être ajoutée ou soustraite de l'heure de l'horloge standard du lieu. La correction est constante pour une longitude particulière et les règles suivantes, par convention, doivent être respectées. L'équation générale pour calculer le temps solaire apparent est donnée par :

$$TSA = TSL + ET \pm 4 (LS - LL) \quad (I.4)$$

Lorsque le local est à l'est de Greenwich, le signe de l'équation \pm de (I.4) est moins. Par contre, si le local est à l'ouest, le signe est plus.

c. - Angle horaire ω

L'angle horaire ω du soleil est l'angle compris entre 0° et 360° , formé par le plan méridien du lieu et celui qui passe par la direction du soleil si l'on prend comme origine le méridien de Greenwich. La valeur de l'angle horaire est nulle au midi solaire, négative le matin, positive dans l'après-midi et augmente de 15° par heure. L'expression symbolique de l'angle horaire en degré est :

$$\omega = \pm 0,25 (\text{Nombres de minutes à partir du midi solaire local}) \quad (I.5)$$

Apparent :

$$\omega = 15^\circ(\text{TSA} - 12) \quad (\text{I.6})$$

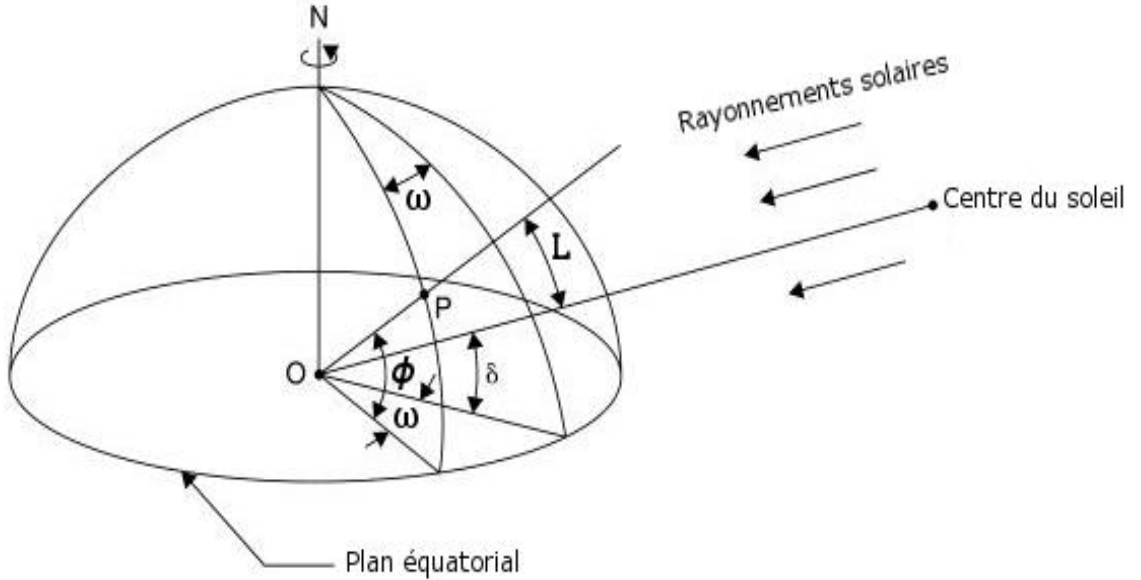


Figure 4 : Définitions de déclinaison et angle horaire. Source [4]

I.2.3 - Coordonnées azimutales

a. - La hauteur angulaire du soleil h

La hauteur angulaire du soleil h est l'angle entre les rayons du soleil et le plan horizontal. Il est en relation avec l'angle zénith solaire z qui est l'angle entre les rayons du soleil et la verticale.


$$z + h = \frac{\pi}{2} = 90^\circ \quad (I.7)$$

L'expression de l'angle d'élévation solaire est :

$$h = \arcsin(\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega) \quad (I.8)$$

L'expression de l'angle solaire zénith est :

$$z = \arccos(\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega) \quad (I.9)$$

 Angle horaire de coucher de soleil et durée de journée :

Le soleil est dit levé ou couché quand l'angle d'élévation solaire est nul. L'angle horaire du soleil est le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire, dans sa

course d'est en ouest, par rapport au méridien local. L'angle horaire de coucher du soleil ω_s est donné par la résolution de l'équation (I.8) pour la valeur de ω_s quand $h = 0^\circ$.

$$\sin h = \sin 0 = 0 = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega_s$$

On a donc $\cos \omega_s = - \frac{\sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta}$

$$\omega_s = \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (I.10)$$

Où ω_s est considéré positif au coucher.

Pour chaque valeur du cosinus, il y a plusieurs valeurs de l'angle ω . Quand l'angle horaire du midi solaire local est 0° avec chaque 15° de longitude équivalent à 1 heure, l'heure de coucher et de lever à partir du midi solaire est donnée par :

$$H_{cs} = -H_{ls} = \frac{1}{15} \cos^{-1} [-\tan \phi \tan \delta] \quad (I.11)$$

La durée de journée est cette heure multipliée par 2 :

$$\text{Durée de journée} = \frac{2}{15} \cos^{-1} [-\tan \phi \tan \delta] \quad (I.12)$$

b. - Angle solaire azimut α

L'azimut est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil. L'expression de l'angle solaire azimut est donnée par :

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h}\right) \quad (I.13)$$

Cette équation n'est valable que pour $\cos \omega > \frac{\tan \delta}{\tan \phi}$. Si ce n'est pas le cas, cela signifie que le soleil est derrière la ligne Est-Ouest et l'azimut est de $-\pi + |\alpha|$ pour les heures matinales et de $\pi - \alpha$ pour les heures après-midi.

Par définition, au midi solaire, le soleil est exactement sur le méridien qui contient la ligne Nord-Sud et par conséquent, l'azimut est de 0° . L'angle d'élévation h_m à midi est donc :

$$h_m = 90^\circ - \phi + \delta \quad (I.14)$$

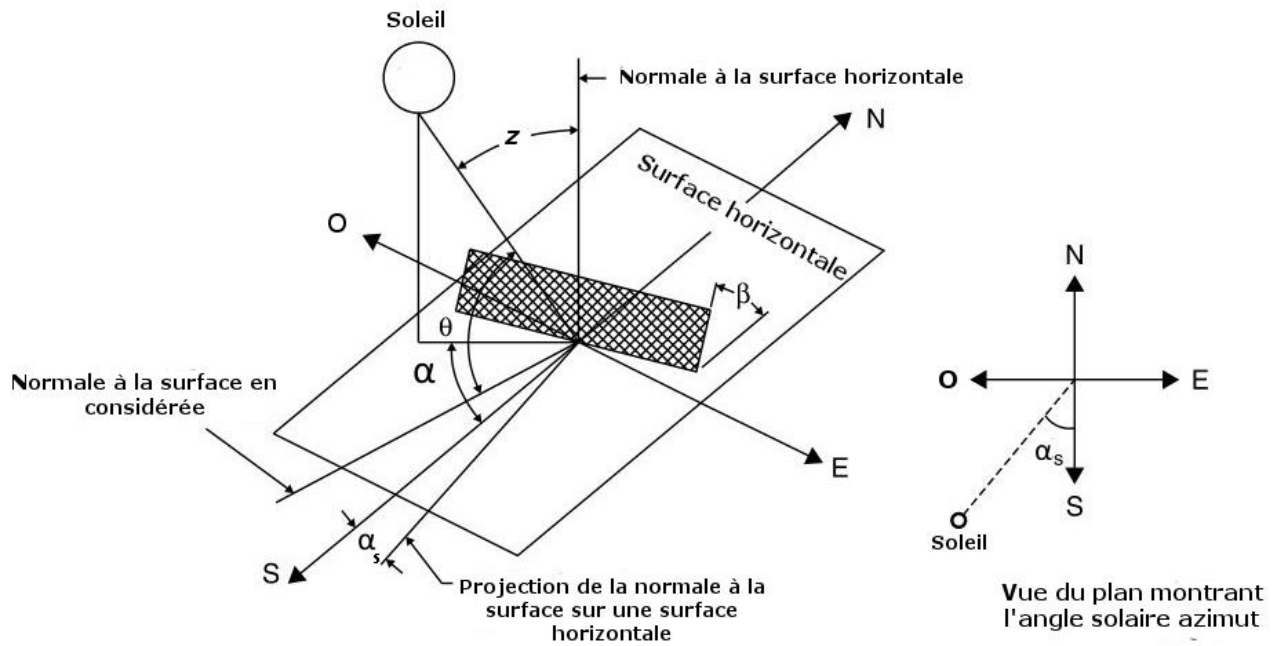


Figure 6 : Schémas des angles solaires. Source [4]

I.2.5 - Diagramme solaire

D'un point de vue pratique, il est convenable d'avoir des abaques ou des diagrammes représentant la trajectoire du soleil sur une surface horizontale appelés diagrammes solaires. Les équations précédentes montrent que la hauteur angulaire, et l'azimut sont fonctions de la latitude, de l'angle horaire et de la déclinaison. Un diagramme solaire est un graphe représentant en abscisse les valeurs de l'azimut et en ordonnée les valeurs de la hauteur angulaire du soleil. Le diagramme nous permet de :

- Connaître la position du soleil dans le ciel à n'importe quelle période de l'année
- Connaître la durée d'ensoleillement d'une journée
- Déterminer l'orientation propre d'un capteur pour éviter les ombrages

I.3 - Estimation du rayonnement solaire [4] [5] [7] [9] [10] [11] [12] [13]

Comme dit précédemment, de nombreux paramètres interviennent dans la conception, les dimensionnements et l'évaluation de performance pour une application solaire. Ces paramètres incluent entre autres le rayonnement global, le rayonnement direct, le rayonnement diffus et la durée d'ensoleillement.

Il existe deux types d'appareil pour les mesurer : le pyranomètre et le pyréliomètre. Le premier est utilisé pour mesurer le rayonnement global tandis que le second est destiné

à la mesure de l'intensité du rayonnement solaire direct sur une incidence normale. Faute de moyens et de matériels disponibles en notre possession, nous allons donner des modèles pour l'estimation de rayonnement solaire disponible. Il est important de préciser que les modèles que nous avons trouvés dans la bibliographie se différencient les uns des autres par la détermination du rayonnement direct et du rayonnement diffus.

I.3.1 - La radiation solaire extraterrestre

La terre intercepte seulement une fraction de l'énergie rayonnée par le soleil à l'intérieur du volume sphérique entourant l'espace. La radiation solaire extraterrestre est le rayonnement solaire reçu par une surface à la limite de l'atmosphère terrestre. La quantité d'énergie solaire par unité de temps à une distance significative Terre-Soleil reçue sur une unité de surface de la surface normale au soleil (perpendiculaire à la direction de propagation des rayonnements) en dehors de l'atmosphère est appelée constante solaire et notée G_{cs} (W/m^2). Par convention elle est de $1366,1 W/m^2$. Durant toute l'année, la radiation extraterrestre G_{on} mesurée sur un plan normal au rayonnement pendant un jour n de l'année est donnée par l'équation :

$$G_{on} = G_{cs} \left(1 + 0,0033 \cos \left(\frac{360 n}{365} \right) \right) \quad (I.16)$$

Quand une surface est placée parallèlement au sol, la puissance G_{oH} incidente à la surface de la radiation extraterrestre à un moment donné de l'année est donnée par :

$$G_{oH} = G_{on} \cos z = G_{cs} \left(1 + 0,0033 \cos \frac{360 n}{365} \right) (\cos z) . \text{Ce qui nous donne :}$$

$$G_{oH} = G_{cs} \left(1 + 0,0033 \cos \frac{360 n}{365} \right) (\sin \delta \sin \phi + \cos \phi \cos \delta \cos \omega) \quad (I.17)$$

La radiation totale H_o extraterrestre sur une surface horizontale pendant une journée peut être obtenu en intégrant le rayonnement solaire incident entre la période de lever et de coucher de soleil ω_s et $-\omega_s$. On a donc l'expression de la radiation totale :

$$H_o = \frac{24 \times 3600 G_{cs}}{\pi} \left(1 + 0,0033 \cos \frac{360 n}{365} \right) \left(\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \delta \sin \phi \right) \quad (I.18)$$

Pour calculer la radiation extraterrestre sur une surface horizontale pendant une période horaire, on intègre l'équation I.17 entre les angles horaires ω_1 et ω_2 ($\omega_2 > \omega_1$) ce qui donne :

$$I_o = \frac{24 \times 3600 G_{cs}}{\pi} \left(1 + 0,0033 \cos \frac{360 n}{365} \right) \left(\cos \phi \cos \delta \sin (\omega_2 - \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \delta \sin \phi \right) \quad (I. 19)$$

I.3.2 - Types de rayonnement

a. - Rayonnement direct

Le rayonnement direct est le rayonnement incident sur un plan donné provenant d'un petit angle solide centré sur le disque solaire. Il parvient en ligne droite et par temps clair.

b. - Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est le rayonnement du soleil dispersé par l'atmosphère et tombant sur un plan d'orientation donnée.

c. - Rayonnement global

Le rayonnement global est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.

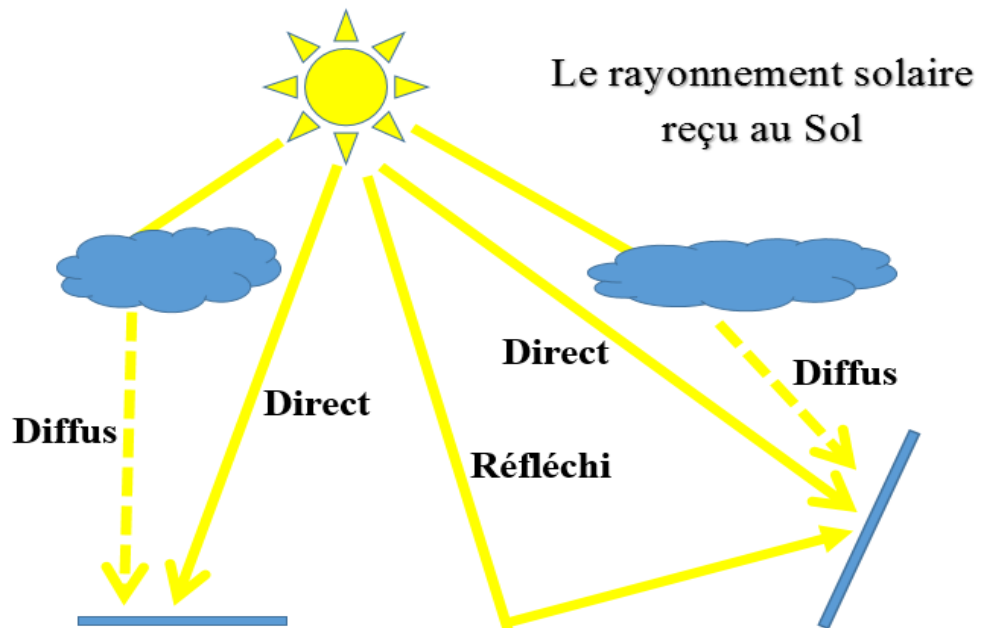


Figure 7: Les types de rayonnement.

I.3.3 - Calcul du rayonnement global

a. - Rayonnement global sur une surface horizontale

Le rayonnement global sur une surface horizontale est donné par :

$$G = G_B + G_D \quad (I.20)$$

Pour une surface horizontale, la valeur du rayonnement direct sur une surface horizontale est donnée par l'expression :

$$G_B = G_{Bn} \cos z = G_{Bn} \sin h \quad (I.21)$$

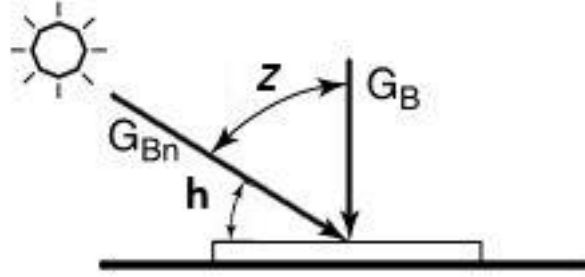


Figure 8 : Rayonnement direct sur une surface horizontale. Source [4]

Le rayonnement global sur une surface horizontale est donc donné par :

$$G = G_{Bn} \cos z + G_D = G_{Bn} \sin h + G_D \quad (I.22)$$

Pour prédire la performance d'un système utilisant l'énergie solaire, les valeurs horaires des radiations sont nécessaires. Puisque dans la plupart des cas, ce genre de données n'est pas disponible, les données de radiation journalière moyenne à long terme peuvent être utilisées pour estimer la distribution de la radiation moyenne journalière à long terme. Pour ce faire, des corrélations sont généralement appliquées et les deux corrélations les plus utilisées sont les corrélations de Liu et Jordan et celle de Collares-Pereira et Rabl.

L'expression de la corrélation de Collares-Pereira et Rabl est donnée par :

$$r = \frac{\bar{I}}{\bar{H}} = \frac{\pi}{24} [a + b \cos \omega] \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \left(\frac{\pi \omega_s}{180}\right) \cos \omega_s} \quad (I.23)$$

Les valeurs de a et b sont données par :

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60) \quad (I.24)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60) \quad (I.25)$$

Celle de Liu et Jordan est donnée par :

$$r_D = \frac{\bar{I}_D}{\bar{H}_D} = \left(\frac{\pi}{24}\right) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \left(\frac{\pi \omega_s}{180}\right) \cos \omega_s} \quad (I.26)$$

b. - Rayonnement global sur une surface inclinée

Habituellement, les capteurs solaires ne sont pas montés horizontalement mais à un certain angle pour recevoir davantage les radiations interceptées et réduire les réflexions et les pertes. La conception de systèmes utilisant l'énergie solaire nécessite donc des données de rayonnement solaire sur une surface inclinée. La totalité de l'insolation sur une surface terrestre pour une localité considérée pendant un moment donné dépend de l'orientation de la surface inclinée. Une surface plane absorbe le rayonnement direct (G_{Bt}), le rayonnement diffus (G_{Dt}) et le rayonnement réfléchi au sol (G_{Gt}). Son expression est donnée par l'équation :

$$G_t = G_{Bt} + G_{Dt} + G_{Gt} \quad (I.27)$$

La valeur du rayonnement direct sur une surface inclinée est donnée par l'expression:

$$G_{Bt} = G_{Bn} \cos \theta \quad (I.28)$$

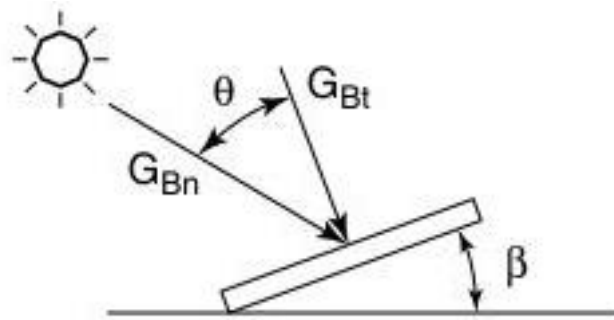


Figure 9 : Rayonnement direct sur une surface inclinée. Source [4]

Le rapport géométrique R_B est le rapport du rayonnement direct sur une surface inclinée sur celui d'un rayonnement direct sur une surface horizontale en toute heure qui peut être calculé exactement par une utilisation appropriée de l'angle d'incidence θ et de l'angle zénith z . On a donc :

$$R_B = \frac{G_{Bt}}{G_B} = \frac{G_{Bn} \cos \theta}{G_{Bn} \cos z} \text{ ce qui donne :}$$

$$R_B = \frac{\cos \theta}{\cos z} \quad (I.29)$$

R_B : Facteur de rayonnement direct sur une surface inclinée.

Le rayonnement direct pour n'importe quelle surface est donc donné par la formule :

$$G_{Bt} = R_B G_B \quad (I.30)$$

Beaucoup de modèles donnent la radiation solaire sur une surface inclinée. Le modèle de ciel isotrope développé par Hottel et Woertz et amélioré par Liu et Jordan nous donne le rayonnement diffus sur une surface horizontale :

$$G_D = 2 \int_0^{\pi/2} G_R \cos z \, dz = 2G_R \quad (I.31)$$

G_R : Rayonnement diffus du ciel ($W/m^2 \, rad$)

Le rayonnement diffus sur une surface inclinée est donné par :

$$G_{Dt} = \int_0^{\frac{\pi}{2}-\beta} G_R \cos z \, dz + \int_0^{\pi/2} G_R \cos z \, dz \quad (I.32)$$

A partir de I.31, on a $G_R = G_D/2$. L'équation I.32 devient donc :

$$G_{Dt} = \frac{G_D}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}-\beta} \cos z \, dz + \frac{G_D}{2} = \frac{G_D}{2} \left[\sin \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) \right] + \frac{G_D}{2} = G_D \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right)$$

On a donc :

$$G_{Dt} = G_D \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (I.33)$$

Le rayonnement réfléchi sur le sol G_{Gt} est obtenu de la même façon par la somme $\rho_G (G_B + G_D)$ où ρ_G est l'albédo du sol. L'albédo est une grandeur adimensionnelle, rapport de l'énergie solaire réfléchie par une surface à l'énergie solaire incidente.

G_{Gt} est donc donné par :

$$\rho_G (G_B + G_D) = 2 \int_0^{\pi/2} G_r \cos z \, dz = 2G_r \quad (I.34)$$

G_r : Rayonnement réfléchi isotrope sur le sol ($W/m^2 \, rad$)

Le rayonnement réfléchi au sol sur une surface inclinée est donné par :

$$G_{Gt} = \int_{\frac{\pi}{2}-\beta}^{\frac{\pi}{2}} G_r \cos z \, dz \quad (I.35)$$

En combinant les équations I.34 et I.35, on a donc :

$$G_{Gt} = \rho_G (G_B + G_D) \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (I.36)$$

On peut maintenant avoir l'expression du rayonnement global sur une surface inclinée :

$$G_t = R_B G_B + G_D \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho_G (G_B + G_D) \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (I.37)$$

On sait que $G = G_B + G_D$. L'équation I.37 peut donc s'écrire :

$$\frac{G_t}{G} = R = \frac{G_B}{G} R_B + \frac{G_D}{G} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_G \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (I.38)$$

c. - Rayonnement global journalier en moyenne mensuelle sur une surface inclinée

Le rayonnement global journalier en moyenne mensuelle sur une surface inclinée $\overline{H_t}$ est donné par :

$$\overline{H_t} = \overline{H_B R_B} + \overline{H_D} \left[\frac{1 + \cos \beta}{2} \right] + \rho_G \overline{H} \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (I.39)$$

Le rayonnement direct journalier en moyenne mensuelle $\overline{H_B}$ peut être calculé si on connaît le rayonnement solaire global journalier en moyenne mensuelle sur une surface horizontale \overline{H} et le rayonnement moyen mensuel diffus journalier sur une surface horizontale $\overline{H_D}$. Son expression est donnée par :

$$\overline{H_B} = \overline{H} - \overline{H_D} \quad (I.40)$$

Pour une surface orientée vers l'équateur, on a :

$$\overline{R_B} = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + (\pi/180) \omega'_s \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + (\pi/180) \omega_s \sin \phi \sin \delta} \quad (I.41)$$

L'angle ω'_s de coucher du soleil sur une surface inclinée est donnée par :

$$\omega'_s = \min\{\omega_s, \cos^{-1}[-\tan(\phi - \beta) \tan \delta]\} \quad (I.42)$$

Il est à noter que pour l'hémisphère sud le terme $\phi - \beta$ se transforme en $\phi + \beta$.

Le facteur de rayonnement total journalier sur une surface inclinée \overline{R} peut ainsi s'exprimer comme suit :

$$\overline{R} = \frac{\overline{H_t}}{\overline{H}} = \left(1 - \frac{\overline{H_D}}{\overline{H}} \right) \overline{R_B} + \frac{\overline{H_D}}{\overline{H}} \left[\frac{1 + \cos \beta}{2} \right] + \rho_G \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (I.43)$$

Dans cette corrélation, le rapport du rayonnement diffus au rayonnement global sur une surface horizontale en fonction du coefficient de clarté $\overline{K_T}$ est donné en tenant compte de la saison comme suit :

Pour $\omega_s \leq 81,4^\circ$ et $0,3 \leq \overline{K_T} \leq 0,8$ on a :

$$\frac{\overline{H_D}}{\overline{H}} = 1,391 - 3,560\overline{K_T} + 4,189\overline{K_T}^2 - 2,137\overline{K_T}^3 \quad (I.44)$$

Pour $\omega_s > 81,4^\circ$ et $0,3 \leq \overline{K_T} \leq 0,8$ on a :

$$\frac{\overline{H_D}}{\overline{H}} = 1,311 - 3,022\overline{K_T} + 3,427\overline{K_T}^2 - 1,821\overline{K_T}^3 \quad (I.45)$$

Le rapport entre le rayonnement horizontal journalier au sol et le rayonnement extraterrestre est appelé coefficient de clarté, il est défini par :

$$\overline{K_T} = \frac{\overline{H}}{\overline{H_o}} \quad (I.46)$$

La valeur de $\overline{H_o}$ peut être calculée à partir de (I.18) en choisissant un jour particulier de l'année pour un mois donné durant lequel l'insolation extraterrestre journalière totale est considérée comme la valeur mensuelle significative.

Tableau 1 : Numéro du jour moyen recommandé pour chaque mois. Source [11]

| Mois | Date | Numéro du jour dans l'année |
|-----------|------|-----------------------------|
| Janvier | 17 | 17 |
| Février | 16 | 47 |
| Mars | 16 | 75 |
| Avril | 15 | 105 |
| Mai | 15 | 135 |
| Juin | 11 | 162 |
| Juillet | 17 | 198 |
| Aout | 16 | 228 |
| Septembre | 15 | 258 |
| Octobre | 15 | 288 |
| Novembre | 14 | 318 |
| Décembre | 10 | 344 |

d. - Rayonnement global horaire sur une surface inclinée

Le rayonnement global horaire en moyenne mensuelle en toute heure sur une surface inclinée est donnée par :

$$\bar{I}_t = \bar{I}_B R_B + \bar{I}_D \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \bar{I} \rho_G \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (I.47)$$

L'expression du rayonnement direct horaire en moyenne mensuelle \bar{I}_B est donnée par :

$$\bar{I}_B = \bar{I} - \bar{I}_D \quad (I.48)$$

L'équation (I.47) devient donc : $\bar{I}_t = (\bar{I} - \bar{I}_D) R_B + \bar{I}_D \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \bar{I} \rho_G \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$

Le facteur de rayonnement total horaire sur une surface inclinée peut ainsi s'exprimer comme suit :

$$\bar{R}' = \frac{\bar{I}_t}{\bar{I}} = \left(1 - \frac{\bar{I}_D}{\bar{I}} \right) R_B + \frac{\bar{I}_D}{\bar{I}} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_G \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (I.49)$$

Pour un cas spécifique où une surface fixe est en direction du sud avec un angle d'inclinaison l'expression de R_B est donnée par :

$$R_B = \frac{\cos \theta}{\cos z} = \frac{\sin(\phi - \beta) \sin \delta + \cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega}{\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega} \quad (I.50)$$

En connaissant le rayonnement global journalier sur une surface horizontale, on peut exprimer \bar{R}' par :

$$\bar{R}' = \left(1 - \frac{r_D \bar{H}_D}{r \bar{H}} \right) R_B + \frac{r_D \bar{H}_D}{r \bar{H}} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_G \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (I.51)$$

CHAPITRE II : RAPPELS SUR LES TRANSFERTS THERMIQUES

[14] [15]

Dès qu'il existe entre deux corps ou entre deux parties d'un même corps une différence de température, elle tend à disparaître spontanément par échange de chaleur qui peut se faire par trois modes différentes. Ces trois modes de transfert sont :

- Transfert de chaleur par conduction
- Transfert de chaleur par convection
- Transfert de chaleur par rayonnement

Généralement, ces modes de transfert de chaleurs agissent simultanément mais selon le cas, ces trois phénomènes sont d'importances relatives différentes. A l'intérieur d'un solide, seule la conduction intervient. Pour des corps exposés à l'air, c'est l'effet de convection qui est le plus important. Si la température s'élève, le rayonnement prend de plus en plus d'importance.

II.1 - Transfert de chaleur par conduction

II.1.1 - Définition

Il y a conduction lorsque la chaleur se propage à travers un corps sans transfert de matière. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres

II.1.2 - Equation générale

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température.

$$\vec{\varphi} = -\lambda_t \overrightarrow{grad}(T) \quad (I.52)$$

Pour un matériau homogène de surface S, le transfert de chaleur par conduction dans la direction x (variable d'espace) est donné par :

$$\varphi = -\lambda_t S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (I.53)$$

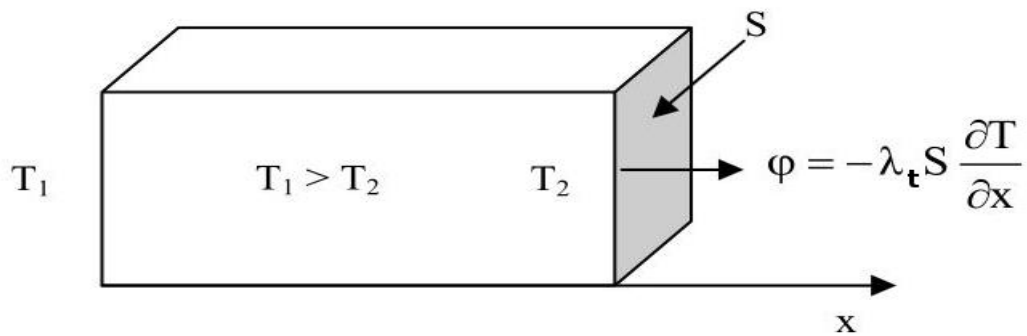


Figure 10 : Transfert de chaleur par conduction dans un matériau homogène.
Source[15]

II.2 - Transfert de chaleur par convection

II.2.1 - Définition

Les transferts de chaleur qui s'effectuent simultanément avec des transferts de masse sont dits transferts de chaleur par convection. C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. Les phénomènes de convection interviennent dans la transmission de la chaleur à chaque fois qu'un fluide se déplace par rapport à des éléments (mur, parois, plaque...). Lorsque la température d'un fluide n'est pas uniforme, il se produit à l'intérieur de celui-ci des courants de convections qui ont tendance à égaliser la masse volumique aux différents points du fluide.

On distingue deux types de convection :

- La convection naturelle. Les mouvements du fluide sont dû aux variations de son poids volumique résultant des échanges de chaleur fluide-paroi.
- La convection forcée. Les mouvements du fluide sont provoqués par une action mécanique extérieure (pompe, ventilateur, vent...) et dans tous les cas, le flux de chaleur est échangé.

II.2.2 - Equation générale

L'équation générale d'un transfert de chaleur par convection (naturelle ou forcée) est donnée par la relation dite loi de Newton :

$$\varphi = h_c S \Delta T \quad (I.54)$$

h_c : coefficient d'échange par convection en $W/m^2 K$

S : Aire de la surface de contact solide/fluide

ΔT : Différence de température entre le fluide et le corps (fixe)

La détermination du coefficient d'échange par convection est complexe. Elle fait intervenir :

- Les propriétés physiques du fluide (masse volumique ρ , chaleur massique C_p , conductivité thermique λ_t , viscosité dynamique μ , coefficient de dilatation du fluide β)
- Les dimensions de l'élément suivant lequel s'écoulent les courants de convections
- La vitesse de ces courants
- La différence de température

II.3 - Transfert de chaleur par rayonnement

II.3.1 - Définition

Contrairement à la convection ou la conduction, le rayonnement est un mode d'échange d'énergie qui ne nécessite pas l'existence d'un support. C'est une émission d'énergie susceptible de se transmettre dans le vide. C'est donc le mécanisme par lequel la chaleur se transmet d'un corps à haute température vers un autre à basse température lorsque ces corps sont séparés dans l'espace ou même lorsqu'un vide existe entre eux. Tous les corps (liquide, solide ou gazeux) émettent un rayonnement électromagnétique. Lorsque ce dernier est absorbé, il se transforme en énergie thermique. Tout corps qui émet ce type de rayonnement est capable d'absorber un rayonnement de même nature. On désigne l'énergie transmise par chaleur rayonnée. Le rayonnement se propage de manière rectiligne à la vitesse de la lumière. Il est constitué de radiations de différentes longueurs d'onde.

II.3.2 - Lois fondamentales de rayonnement des sources noires

a. - Corps noir

C'est un corps qui absorbe intégralement tout le rayonnement qu'il reçoit et n'en réfléchit ou n'en transmet rien et ceci indépendamment de son épaisseur, de sa température, de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde du rayonnement incident. La représentation d'un corps noir doit répondre aux exigences suivantes :

- Ses parois doivent être rigides et parfaitement absorbantes au rayonnement,
- Le rayonnement émis et absorbé ainsi que les parois doivent constituer un système fermé afin que l'ensemble soit à l'équilibre ; aucun rayonnement ne doit donc sortir ou entrer dans le système fermé ainsi constitué.

Les corps noirs rayonnent de la même manière. A la même température, un corps noir rayonne plus qu'un corps non noir. On utilise le corps noir comme une référence à laquelle on compare les caractéristiques du rayonnement des autres corps.

b. - Loi de PLANCK

Dans un intervalle centré autour d'une longueur d'onde λ , le flux d'énergie émise par un corps noir à la température T augmente très rapidement avec la longueur d'onde λ , atteint un maximum puis retombe très vite encore. Cette émission d'énergie en fonction de λ dépend seulement de sa température mais non pas de la nature de la matière avec laquelle interagit le rayonnement. Cette loi s'écrit :

$$E_{\lambda T} = \frac{2 \pi h C^2 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{h C}{k T \lambda}\right) - 1} \quad (I.55)$$

C : vitesse de la lumière ; $C = 2,9979.10^8$ m/s

h : constante de Planck ; $h = 6,6261.10^{-34}$ J.s

k : Constante de Boltzmann ; $k = 1,38065.10^{-23}$ J/K

$E_{\lambda T}$: est appelée émittance monochromatique du corps noir exprimé en $W.m^{-3}$

Cette loi peut s'écrire sous la forme simple :

$$E_{\lambda T} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (I.56)$$

Avec $C_1 = 3,742.10^{-16} W.m^2$ et $C_2 = 1,4385.10^{-2} m K$

La loi de Planck permet de tracer les courbes isothermes (T constante) représentant les variations de $E_{\lambda T} = E_{\lambda}$ en fonction de la longueur d'onde pour diverses températures. Le pouvoir émissif monochromatique à une température quelconque part de 0 à $\lambda = 0$, passe par un maximum et revient à zéro pour $\lambda = +\infty$. Pour toutes les longueurs d'ondes, il croît avec la température, mais il croît d'autant plus vite que la longueur d'onde est plus courte, aussi la valeur du maximum λ_{max} se déplace vers les courtes longueurs d'ondes lorsque la température s'élève.

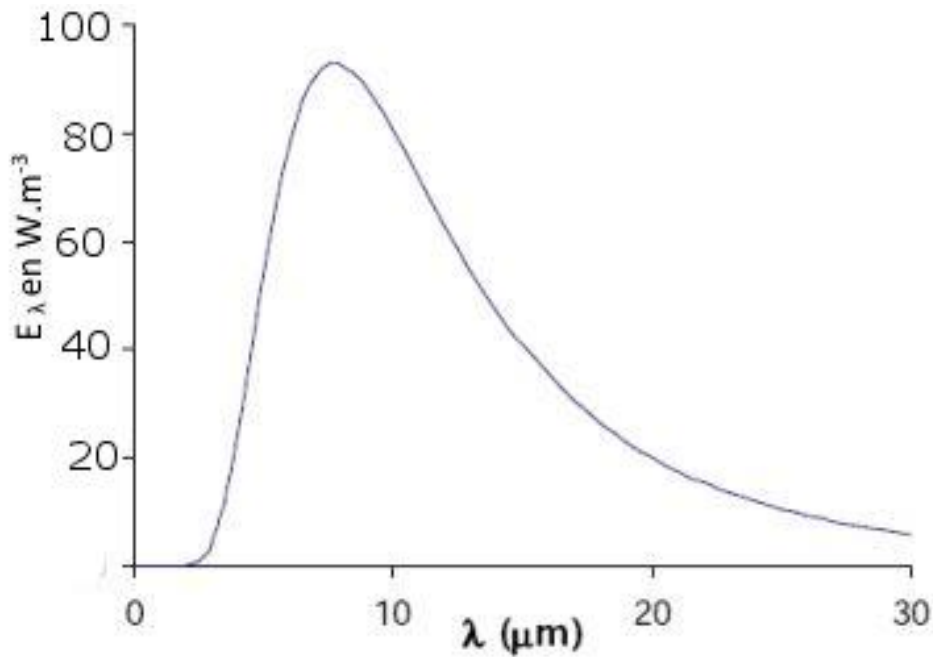


Figure 11 : Emission d'un corps noir à 100° C. Source [15]

c. - Loi de Wien

La relation entre la longueur d'onde maximale λ_{\max} correspondant à $E_{\lambda_{\max}}$ et la température absolue T est donnée par la loi de déplacement de Wien :

$$\lambda_{\max} T = 2897 \quad (I.57)$$

d. - Loi de STEFAN-BOLTZMANN

L'intégration de la formule de Planck pour toutes les longueurs d'onde donne l'émission totale E_T du corps noir qui n'est plus fonction que de la température T . Cette émission totale est donnée par la loi de Stefan Boltzmann :

$$E_T = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad (I.58)$$

✚ Fraction de l'émission dans un intervalle donné de longueurs d'onde $[\lambda_1 ; \lambda_2]$:

C'est la fraction du flux émis par l'unité de surface du corps noir à la température T entre les longueurs d'ondes λ_1 et λ_2 .

$$F_{\lambda_1 T - \lambda_2 T} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda T} d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\lambda T} d\lambda} = F_{0-\lambda_2 T} - F_{0-\lambda_1 T} \quad (I.59)$$

Calculons $F_{0-\lambda T}$:

$$F_{0-\lambda T} = \frac{1}{\sigma T^4} \int_0^\lambda \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} d\lambda = \frac{1}{\sigma} \int_0^\lambda \frac{C_1 (\lambda T)^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} d(\lambda T) \quad (I.60)$$

Nous constatons que $F_{0-\lambda T}$ ne dépend que du produit λT . Il suffit donc de dresser une fois pour toutes une table à une entrée unique λT donnant $F_{0-\lambda T}$ et de l'utiliser pour le calcul de $F_{0-\lambda_1 T}$ et $F_{0-\lambda_2 T}$ et en déduire $F_{\lambda_1 T - \lambda_2 T}$. Nous donnerons en annexes une table des valeurs de $F_{0-\lambda T}$.

II.3.3 - Rayonnement des corps opaques non noirs

a. - Facteur d'émission ou émissivité

On définit les propriétés émissives des corps réels par rapport aux propriétés émissives du corps noir dans les mêmes conditions de température et de longueur d'onde et on les caractérise à l'aide de coefficients appelés facteurs d'émission ou émissivités.

Facteur d'émission monochromatique :

$$\varepsilon_\lambda = \frac{M_{\lambda,T}}{E_{\lambda,T}} \quad (I.61)$$

Facteur d'émission totale :

$$M_T = \int_0^\infty M_{\lambda,T} d\lambda = \int_0^\infty \varepsilon_\lambda E_{\lambda,T} d\lambda < \int_0^\infty E_{\lambda,T} d\lambda = E \quad (I.62)$$

On peut définir que le facteur d'émission total dépend en principe de la température :

$$\varepsilon = \frac{M_T}{E_T} \quad (I.63)$$

L'émittance totale d'un corps non noir à la température T est donc donnée par la relation:

$$M_T = \varepsilon_T \sigma T^4 = \varepsilon_T E_T \quad (I.64)$$

II.3.4 - Réception du rayonnement par un solide

Quand un rayon incident d'énergie ϕ_λ frappe un corps à la température T , une partie de l'énergie incidente $\phi_\lambda \rho_{\lambda,T}$ est réfléchi par la surface S , une autre

partie $\varphi_{\lambda}\alpha_{\lambda,T}$ est absorbée par le corps qui s'échauffe et le reste $\varphi_{\lambda}\tau_{\lambda,T}$ est transmis et continue son chemin.

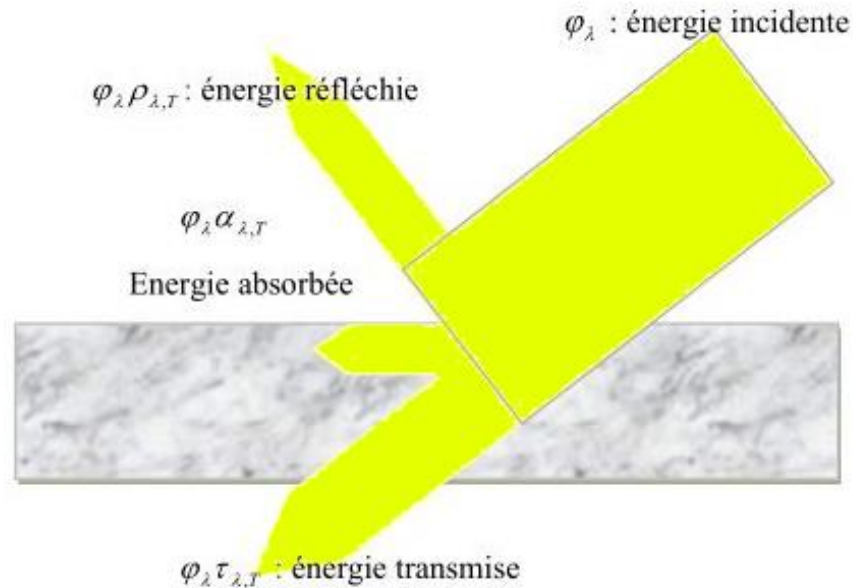


Figure 12 : Réception d'un rayonnement par un solide. Source [20]

On définit ainsi les pouvoirs monochromatiques :

- Réfléchissant $\rho_{\lambda,T}$ appelé encore ou facteur ou coefficient de réflexion ou réflectivité.
- Absorbant $\alpha_{\lambda,T}$ ou coefficient d'absorption ou absorptivité,
- Filtrant $\tau_{\lambda,T}$

On a donc : $\varphi_{\lambda} = \varphi_{\lambda}\rho_{\lambda,T} + \varphi_{\lambda}\alpha_{\lambda,T} + \varphi_{\lambda}\tau_{\lambda,T}$

$$\rho_{\lambda,T} + \alpha_{\lambda,T} + \tau_{\lambda,T} = 1 \quad (I.65)$$

a. - Absorption du rayonnement par les matériaux

La majorité des matériaux solides absorbent pratiquement tout le rayonnement sur une couche de surface très fine, moins de 1,25mm d'épaisseur.

b. - Transmission du rayonnement par les matériaux

Les corps qui ne transmettent pas le rayonnement sont appelés opaques et pour ceux-ci, l'équation précédente se réduit à :

$$\rho_{\lambda,T} + \alpha_{\lambda,T} = 1 \quad (I.66)$$

c. - Réflexion du rayonnement par les matériaux

La réflexion du rayonnement peut être régulière ou diffuse :

- Si une surface est bien polie et lisse, la réflexion du rayonnement sera similaire à celle d'un rayon lumineux. L'angle d'incidence sera égal à l'angle de réflexion. C'est la réflexion régulière.
- La plupart des matériaux utilisés dans l'industrie sont rugueux parce que leurs surfaces présentent des aspérités qui sont grandes par rapport à une longueur d'onde. La réflexion du rayonnement à partir d'une surface rugueuse se dirige pratiquement dans toutes les directions. C'est la réflexion diffuse.

Les grandeurs $\rho_{\lambda,T}$, $\alpha_{\lambda,T}$ et $\tau_{\lambda,T}$ ne dépendent pas seulement du matériau, de son épaisseur et de son état de surface, mais varient aussi avec la longueur d'onde du rayonnement.

II.3.5 - Propriétés des matériaux vis-à-vis du transfert de chaleur par rayonnement

a. - Loi de KIRCHHOFF

On considère le transfert de chaleur par rayonnement entre deux corps initialement aux températures T_1 et T_2 . La loi de Kirchhoff établit un rapport entre le coefficient d'absorption α et le coefficient d'émission ε d'une même surface lorsque l'équilibre thermique est atteint entre les deux corps. A la température d'équilibre T et pour une longueur d'onde λ donnée, le rapport $\frac{M_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}}$ est le même pour tout le corps. Pour le corps noir, $\alpha_{\lambda,T}=1$ et $M_{\lambda,T}=E_{\lambda,T}$. Le rapport est donc égal à l'émittance monochromatique du corps noir, ce qui nous donne $M_{\lambda,T} = E_{\lambda,T} \cdot \alpha_{\lambda,T}$. Ainsi, le facteur d'absorption est égal au facteur d'émission : $\alpha_{\lambda,T} = \varepsilon_{\lambda,T}$. L'émittance monochromatique de tout corps est égale au produit de son pouvoir absorbant monochromatique par l'émittance monochromatique du corps noir à la même température, d'où l'intérêt de connaître le rayonnement émis par le corps noir.

Corps gris :

C'est un corps dont le pouvoir absorbant est indépendant de la longueur d'onde du rayonnement qu'il reçoit ; il est défini par $\alpha_{\lambda,T} = \alpha_T$. Par opposition aux corps noirs, le coefficient d'absorption des corps gris est inférieur à 1.

Cas des corps gris : loi de Kirchhoff généralisée :

Dans le cas du corps gris, on peut généraliser cette loi, ce qui facilite les applications. En effet, pour un corps gris $\alpha_{\lambda,T} = \alpha_T$ donc :

$$M_T = \int_0^{\infty} M_{\lambda,T} d\lambda = \int_0^{\infty} \alpha_{\lambda,T} E_{\lambda,T} d\lambda = \alpha_T \int_0^{\infty} E_{\lambda,T} d\lambda = \alpha_T E_T \quad (I.67)$$

L'émittance totale M_T d'un corps gris à la température T est égale au produit de son pouvoir absorbant α_T par l'émittance totale E_T du corps noir à la même température. Or, pour un corps non noir : $M_T = \epsilon_T E_T$. D'après la loi de Kirchhoff, on montre que : $\alpha_{\lambda,T} = \epsilon_{\lambda,T}$. Comme les corps gris sont caractérisés par $\alpha_{\lambda,T} = \alpha_T$, d'après ce qui précède : $\epsilon_{\lambda,T} = \epsilon_T$.

b. - Loi de BEER

Soit ϕ_0 le flux total (pour la totalité des longueurs d'onde) du rayonnement incident au point d'impact. Le pourcentage de flux perdu est proportionnel à $dx : \frac{-d\phi}{\phi} = K dx$

Après intégration, on obtient la loi de BEER :

$$\phi = \phi_0 \exp(-Kx) \quad (I.68)$$

Le verre ou une couche gazeuse d'épaisseur L absorbera le flux :

$$\phi_{abs} = \phi_0 (1 - \exp(-KL)) \quad (I.69)$$

On définit alors le facteur total d'absorption et le facteur total de transmission de la couche L :

$$\phi_{abs} = \alpha_L \phi_0 \Rightarrow \alpha_L = 1 - \exp(-KL) \quad (I.70)$$

$$\tau_L = 1 - \alpha_L \Rightarrow \tau_L = \exp(-KL) \quad (I.71)$$

Absorption monochromatique :

On peut décomposer la relation de BEER pour chaque longueur d'onde :

$$\phi_{\lambda} = \phi_{0\lambda} (1 - \exp(-K_{\lambda}x)) \quad (I.72)$$

On définit dans ce cas le facteur d'absorption monochromatique et le facteur de transmission monochromatique de la couche L :

$$\phi_{\lambda abs} = \alpha_{L\lambda} \phi_{0\lambda} \Rightarrow \alpha_{L\lambda} = 1 - \exp(-K_{\lambda}L) \quad (I.73)$$

$$\tau_{L\lambda} = 1 - \alpha_{L\lambda} \Rightarrow \tau_{L\lambda} = \exp(-K_{\lambda}L) \quad (I.74)$$

Tout corps doit être considéré sous deux points de vue :

- comme émetteur, car il envoie toujours un rayonnement lié à sa température (sauf s'il est parfaitement transparent),
- comme récepteur, car il reçoit des rayonnements émis ou réfléchis et diffusés par les corps qui l'entourent.

c. - Propriétés radiatives des corps en tant qu'émetteurs

Milieu semi-transparent comme émetteurs de rayonnement :

Lors de l'émission, le rayonnement provient de toute leur masse. La loi de KIRCHHOFF s'applique aux milieux semi-transparentes. Aussi, pour les gaz d'épaisseur L , l'égalité de l'émissivité et du facteur d'absorption monochromatiques permet d'écrire : $\varepsilon_{L\lambda} = \alpha_{L\lambda} = 1 - \exp(-K_{\lambda}L)$

Comme les corps semi transparents ne sont pas des corps gris : $\varepsilon_{L\lambda} \neq \alpha_{L\lambda}$

Milieux opaques comme émetteurs de rayonnement :

Le rayonnement émis par les corps opaques provient uniquement de leur seule surface. On définit les grandeurs suivantes relativement aux émissions de rayonnement des corps opaques :

- Émittance énergétique ou pouvoir émissif, monochromatique (W/m^3),
- Émittance énergétique ou pouvoir émissif totale obtenue par intégration sur les longueurs d'onde de l'émittance énergétique ou pouvoir émissif monochromatique (W/m^2)
- Luminance
- Facteurs d'émission monochromatique ou totale : le corps noir sert de référence à ces grandeurs.

d. - Propriétés radiatives des corps en tant que récepteurs

Les propriétés radiatives des matériaux permettent d'interpréter leurs réactions lorsqu'un rayonnement les atteint. On distingue ainsi les corps parfaitement transparents, semi-transparentes et opaques.

Corps parfaitement transparents vis-à-vis de la propagation du rayonnement :

Ils se laissent traverser par le rayonnement incident dans son intégralité, et ceci :

- Sans changement de direction de propagation
- Sans diminution de l'énergie véhiculée

Exemples de corps parfaitement transparents : Le vide, Les gaz simples : H₂, N₂, O₂,.....

Corps partiellement ou semi transparents vis-à-vis de la propagation du rayonnement :

La propagation du rayonnement dans les corps partiellement transparents s'accompagne d'une diminution de l'énergie : quand un rayonnement pénètre dans un milieu semi-transparent, il s'éteint progressivement par absorption.

Exemples de corps partiellement transparents : Certains gaz composés (H₂O, CO, CO₂, CH₄), verres, polymères....

Corps opaque vis-à-vis de la propagation du rayonnement :

Un rayonnement incident qui arrive sur un corps opaque est en partie réfléchi, le reste est absorbé sous forme de chaleur au voisinage du point d'impact. Les corps opaques arrêtent la propagation de tout rayonnement dès leurs surfaces.

Exemples de corps opaques : la majorité des liquides et des solides sont opaques.

II.3.6 - Equation générale

Le flux de chaleur transmis par rayonnement est donné par :

$$\varphi = \sigma \varepsilon_s S (T_s^4 - T_m^4) \quad (I.75)$$

φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement en W

σ : Constante de Stefan

ε_s : Facteur d'émission de la surface

S : Aire de la surface en m²

T_s : Température de la surface en K

T_m : Température du milieu environnant la surface en K

CHAPITRE III : GENERALITES SUR LE SECHAGE

III.1 - Définition

Le séchage est une opération unitaire qui consiste à éliminer un liquide d'un solide, d'un semi-solide, voire d'un liquide par évaporation pour obtenir un produit final solide.

[16] Le séchage est de ce fait utilisé pour plusieurs raisons :

- le liquide résiduel est incompatible avec l'utilisation ultérieure du produit, pour des raisons chimiques ou physiques.
- le produit humide se conserve mal, qu'il subisse une dégradation chimique, ou que son aspect physique soit modifié.
- le coût des manipulations du produit humide est grevé par la présence de liquide résiduel même si ce dernier ne gêne pas l'application.
- le séchage, outre son objectif principal qui est d'éliminer le liquide, apporte une modification morphologique du solide intéressant pour son usage ultérieur. **[17]**

Le séchage implique deux types de transferts: le transfert d'énergie thermique, de l'environnement vers le liquide à évaporer, et le transfert de masse, de l'intérieur du solide vers sa surface et ensuite le passage en phase gazeuse. Il existe en général deux types de séchage :

- le séchage par entraînement dans lequel l'élimination du liquide est généralement enlevé sous forme de vapeur par l'air (ou autre gaz en mouvement). La température du gaz est généralement supérieure à celle du produit et la pression de vapeur du liquide imprégnant le solide inférieure à la pression dans le dispositif de séchage.
- le séchage par ébullition pour lequel la pression de vapeur du liquide est la même que celle régnant dans l'appareil de séchage. Il s'ensuit que la température est donnée par la pression à laquelle a lieu l'ébullition. **[17]**

III.2 - Le séchage des produits agroalimentaires

L'objectif à atteindre lors d'un séchage d'un produit est d'abaisser sa teneur en eau, de telle sorte que l'activité de l'eau soit portée à une valeur permettant sa conservation à une température ordinaire sur de longues durées. Le séchage peut s'appliquer dans divers secteurs industriels mais le séchage des denrées alimentaires pour leur conservation reste le domaine où il est le plus utilisé.

Le séchage des aliments revêt également un aspect économique. Les aliments peuvent être classés en trois larges groupes en se basant sur les valeurs ajoutées durant le

processus de séchage. Pour les céréales, les tubercules et les légumes-racines, juste une petite valeur est ajoutée par kilogramme de produits séchés. Une plus grande valeur par unité de masse est ajoutée pour les légumes, les fruits et les produits halieutiques. Une valeur encore plus grande que celles citées précédemment est ajoutée pour les épices, les herbes et plantes médicinales, les noix, les matériaux bioactifs et les enzymes. [18]

III.3 - Paramètres influant le séchage [11] [12] [17] [19] [20]

III.3.1 - L'air humide

L'air humide est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau. Cet air humide et ses composants peuvent être assimilés à des gaz parfaits avec une précision suffisante dans notre domaine d'utilisation.

Humidité relative (H_r) :

C'est le rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau dans un mélange gaz-vapeur et de la pression de vapeur saturante à l'équilibre à la même température.

$$H_r = \frac{P_v}{P_{sat}} \quad (I.76)$$

Humidité absolue (H_a) :

C'est la masse de vapeur d'eau par unité de masse d'air sec.

$$H_a = \frac{m_v}{m_{air\ sec}} \quad (I.77)$$

A partir de la relation (I.77) on obtient :

$$H_a = \frac{m_v}{m_{air\ sec}} = \frac{M_v P_v}{M_{air\ sec} P_{air\ sec}} = \frac{M_v}{M_{air\ sec}} = 0.622 \frac{P_v}{P_{air\ sec}} = 0.622 \frac{P_v}{P - P_v}$$

$$H_a = 0,622 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (I.78)$$

III.3.2 - Propriétés des corps humides

a. - Liaison d'eau

Les corps contenant de l'eau sont classés suivant la nature des liaisons entre cette eau et ses autres constituants. L'eau présente dans un matériau peut se présenter sous trois états: eau libre (eau capillaire), eau liée (eau adsorbée) et vapeur d'eau. Un corps est dit hydraté quand la liaison d'eau est liée chimiquement par association moléculaire ou par insertion dans un réseau cristallin. Une opération de séchage consiste à enlever toute l'eau

du corps autre que son eau d'hydratation pour avoir une teneur en eau de plus de 2,5% en base sèche.

b. - Humidité absolue et humidité relative

Un produit d'origine animale ou végétale de masse m contient de l'eau de masse m_e et une masse sèche m_s . On peut donc écrire pour tout produit :

$$m = m_s + m_e \quad (I.79)$$

Comme pour l'air humide on définit l'humidité absolue ou la teneur en eau d'un produit en base sèche exprimée ($\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}$) par :

$$X_s = \frac{m_e}{m_s} = \frac{m - m_s}{m_s} \quad (I.80)$$

La teneur en eau d'un produit en base humide ou humidité relative ou titre en eau (%) est définie par :

$$X_h = \frac{m_e}{m} = \frac{m - m_s}{m} \quad (I.81)$$

Les deux grandeurs sont liées par les relations suivantes :

$$X_s = \frac{X_h}{1 - X_h} \quad (I.82)$$

$$X_h = \frac{X_s}{1 + X_s} \quad (I.83)$$

III.3.3 - Activité de l'eau

Pour le séchage de certains produits qui nécessitent une attention hygiénique particulière comme les fruits, la présence de l'eau pour la croissance des micro-organismes, la germination des spores et sa participation dans plusieurs types de réactions chimiques devient problématique. Cette présence dépend d'une grandeur thermodynamique appelée activité de l'eau qui est le rapport entre la pression de vapeur d'eau d'un corps humide et de la pression de la vapeur saturante à la même température.

$$A_w = \left(\frac{P_v}{P_{v \text{ sat}}} \right)_T \quad (I.84)$$

Une grande teneur de l'activité de l'eau favorise le développement des micro-organismes. Pour diminuer et contrôler cette activité il faut recourir à différentes méthodes comme l'ajout de soluté (ajout de sucre pour les fruits par exemple) ou le séchage.

Pour mesurer l'activité de l'eau, les méthodes suivantes sont les plus courantes : la méthode d'équilibre de vitesse de sorption (méthode isobare), la mesure de la pression de vapeur et la mesure par un hygromètre.

III.3.4 - Isothermes de sorption

Un corps humide exposé à un flux ininterrompu d'air perd continuellement de l'humidité jusqu'à ce que la pression de vapeur humide de l'eau dans le solide soit égale à la pression partielle de vapeur de l'air. Le corps solide et le gaz sont alors dits en équilibre et la teneur en eau du solide est appelée teneur en eau d'équilibre sous les conditions normales. Exposer davantage le corps à cet air pendant une longue période indéterminée ne conduira plus à aucune perte d'humidité. La teneur en eau dans le solide peut être réduite encore plus en l'exposant à un air ayant une humidité relative plus basse. Cela signifie que la désorption d'eau du corps est en équilibre dynamique avec l'adsorption de l'air humide environnant. L'humidité relative à ce point est appelée humidité relative du milieu à l'équilibre. Elle est caractérisée par une courbe composée de la teneur en eau et de l'humidité du milieu à l'équilibre appelée isotherme humide d'équilibre.

L'isotherme de sorption représenté par une courbe est un outil efficace pour prédire l'interaction de l'eau et les composants du produit décrivant la relation entre l'activité de l'eau et l'humidité relative à l'équilibre à une température donnée. La courbe obtenue lorsque le produit humide est placé dans un air sec et se sèche est appelée courbe de désorption tandis que la courbe obtenue lorsque le produit sec est placé dans un air humide et qu'il s'humidifie est appelée courbe d'adsorption.

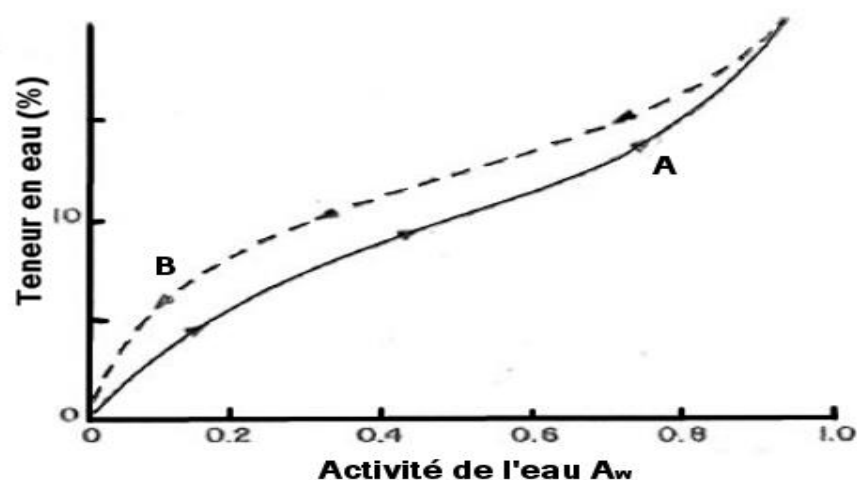


Figure 13 : Courbe d'isotherme d'adsorption (A) et de désorption (B). Source [16]

III.3.5 - Détermination de l'humidité des produits

Il existe diverses méthodes pour déterminer l'humidité d'un matériau après séchage. Parmi celles-ci, citons :

- Les mesures des pertes de poids obtenues par séchage
- L'utilisation des isothermes de sorption.

a. - Mesures des pertes de poids obtenues par séchage

Il faut d'abord peser un échantillon de produit dans son état initial, puis en cours de séchage jusqu'à ce que la masse reste constante. La perte de poids correspondante est considérée ainsi comme le poids de l'eau de l'échantillon ou taux de matière sèche. Elle est donnée par la formule :

$$T_{ms} = \frac{m_s}{m} = \frac{m - m_{eau}}{m} \quad (I.85)$$

b. - Utilisation des isothermes de sorption

Une connaissance des isothermes de sorption permet la mesure de l'humidité de l'air en équilibre avec le produit et donc de connaître l'humidité du produit considéré.

III.4 - Le séchage solaire [4] [11] [19]

Le séchage solaire est l'utilisation de l'énergie solaire pour sécher un produit. Les applications utilisant l'énergie solaire pour le séchage peuvent se diviser en deux parties : le séchage à l'air libre et le séchage avec les séchoirs solaires. La méthode de séchage à l'air libre consiste à sécher les produits par utilisation du rayonnement solaire, de la température ambiante, de l'humidité relative de l'air ambiant et du vent. Le procédé présente certaines limites et les plus observées sont les effets indésirables des saletés, la pollution atmosphérique et les attaques des insectes et des rongeurs, affectant sérieusement la qualité des produits. Une extension de ce procédé est l'utilisation d'un séchoir solaire. Un séchoir solaire est un appareil de séchage qui utilise l'énergie solaire par transformation en chaleur des rayonnements émis par le soleil pour sécher des substances qui sont généralement des produits agroalimentaires. L'objectif d'un séchoir est de fournir davantage de chaleur au produit plus que ce qui est disponible naturellement sous les conditions ambiantes augmentant suffisamment ainsi, la vapeur saturante de l'humidité du produit améliorant donc le mouvement de l'humidité dans le produit.

III.4.1 - Types de séchoir

Les différents séchoirs peuvent utiliser le transfert thermique par conduction, par convection, par rayonnement ou leurs combinaisons. En s'appuyant sur le mode dont la chaleur solaire est exploitée et de leurs dispositions structurelles, les principales catégories de séchoirs sont actives et passives. Pour un système actif, un ventilateur est utilisé pour faire circuler l'air depuis le conduit d'air jusqu'au produit. Pour un système passif, l'air chauffé circule à travers le produit par portance comme résultat de la pression de l'air.

Il existe trois types majeurs de séchoirs solaires : direct, indirect, et mixte. Pour un séchoir solaire de type direct, les mêmes pièces d'équipements sont utilisées pour la collection de l'énergie solaire et le séchage. Pour un séchoir solaire de type indirect, le collecteur d'énergie et l'armoire de séchage sont indépendants l'une de l'autre. Pour un séchoir de type mixte, les deux autres types (direct et indirect) sont combinés.

a. - Les systèmes de séchage d'énergie solaire actifs

Type direct :

C'est un séchoir de taille plus grande, commercial, à convection forcée, de type serre ayant un toit transparent qui est surtout utilisé pour sécher le bois. Ce type est souvent accompagné de source de chaleur supplémentaire. Une autre variante de ce type est un collecteur toit-mur dans lequel le collecteur solaire est directement une partie du toit ou du mur de l'armoire de séchage.

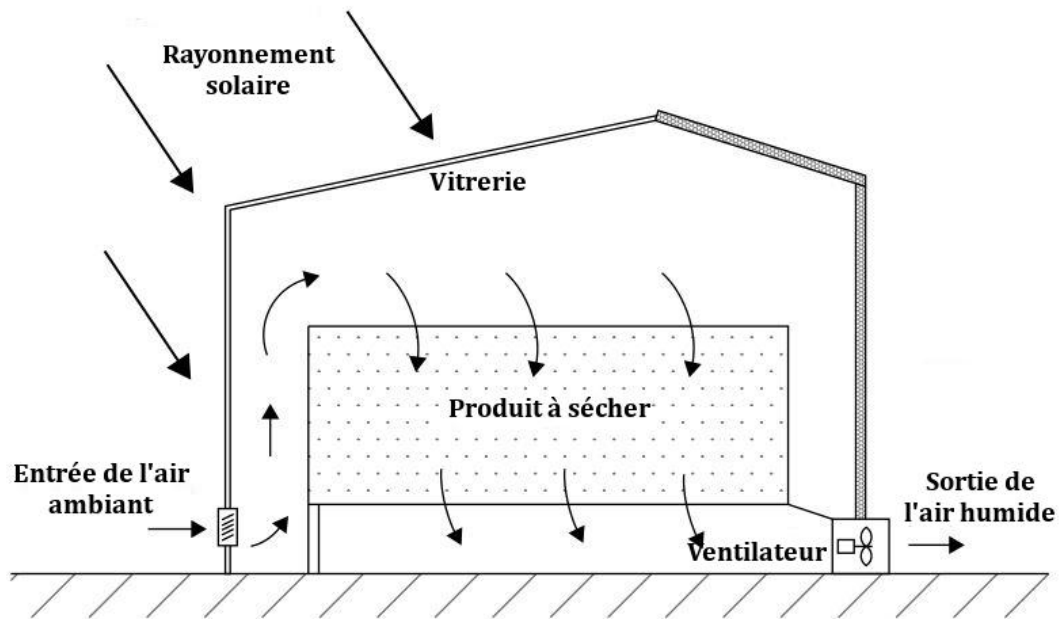


Figure 14 : Séchoir solaire actif direct de type serre. Source [4]

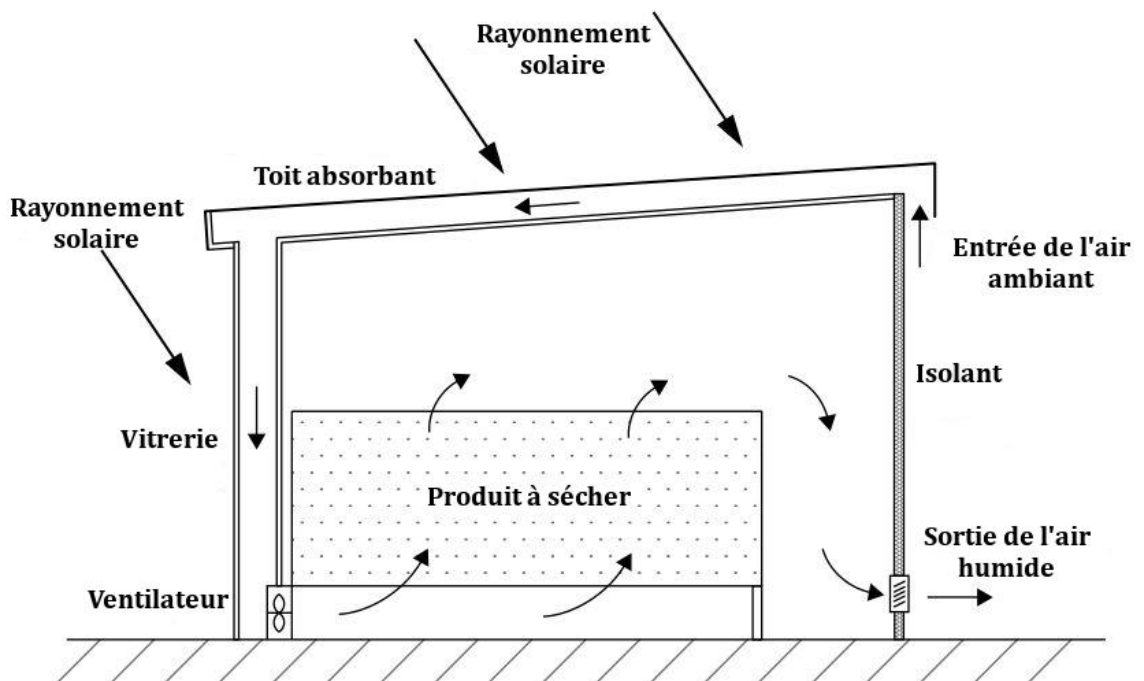


Figure 15 : Séchoir solaire actif direct de type serre avec toit collecteur. Source [4]

✚ Type indirect :

Le séchoir est composé de quatre éléments : une armoire de séchage, un réchauffeur d'air, un ventilateur et un conduit pour transférer l'air chaud du collecteur au séchoir.

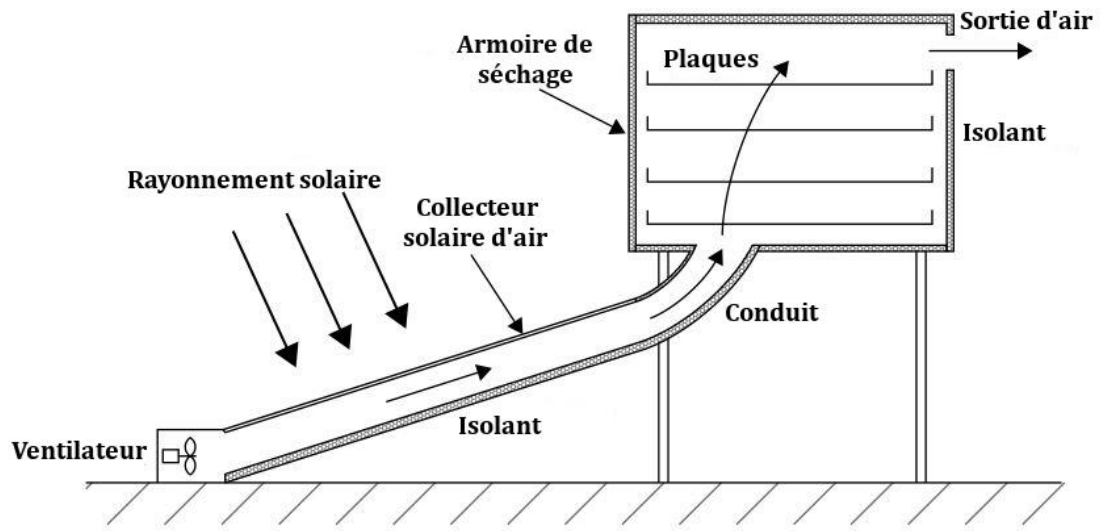


Figure 16 : Séchoir solaire actif de type indirect. Source [4]

Type mixte :

Le séchoir de type mixte est similaire au type indirect mais la différence réside dans le mur et le toit du séchoir qui est constitué de verre pour permettre à l'énergie solaire de chauffer le produit directement.

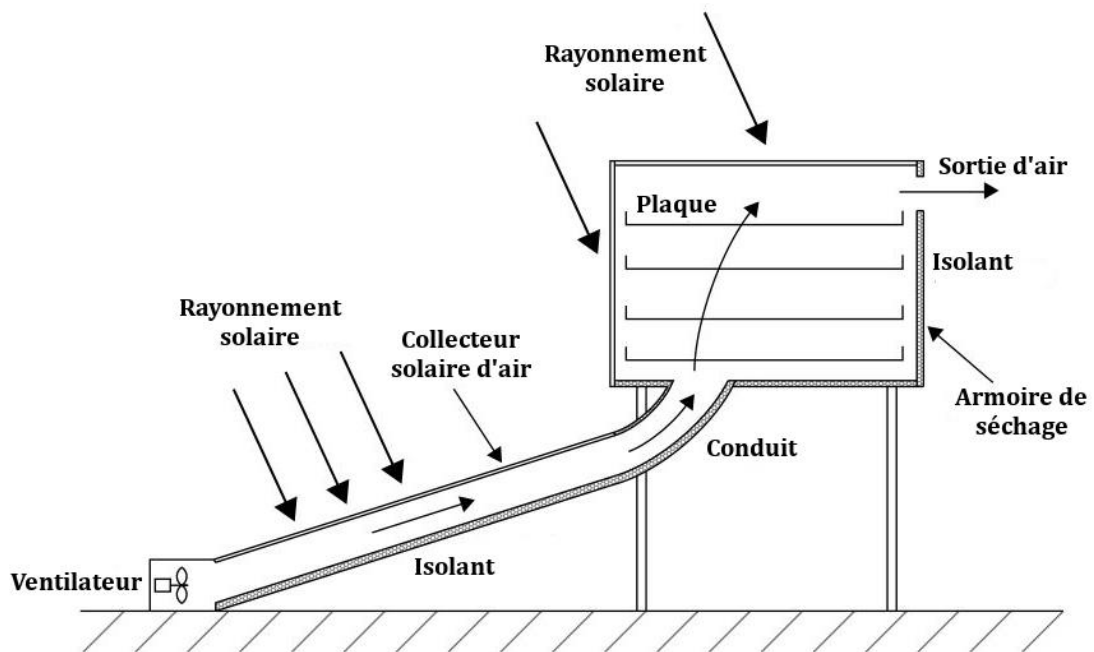


Figure 17 : Séchoir solaire actif de type mixte. Source [4]

b. - Les systèmes de séchage d'énergie solaire passifs

Le système passif opère en utilisant entièrement les sources d'énergie renouvelables comme le soleil et le vent.

Type direct :

Les séchoirs de types directs à circulation naturelle sont des séchoirs dans lesquels le produit est placé dans l'armoire de séchage qui est constitué de murs transparents. La chaleur nécessaire est obtenue par absorption direct de rayonnement solaire depuis le produit jusqu'à la surface interne de la chambre et par convection de la masse d'air chauffée à l'intérieur de l'armoire. La chaleur est transférée au produit par convection et rayonnement améliorant de ce fait la vitesse de séchage comparée aux types indirects. Les séchoirs de type direct ont l'avantage d'être facile à réaliser à partir de matériaux bon marché et sont utilisés communément pour la préservation des fruits, des légumes, des poissons et des viandes. L'inconvénient de ce type de séchoir est la faible circulation d'air favorisant une faible élimination de l'air humide et de l'air asséchant à hautes températures (70-100°C) qui sont très élevées pour les produits surtout ceux qui sont périssables.

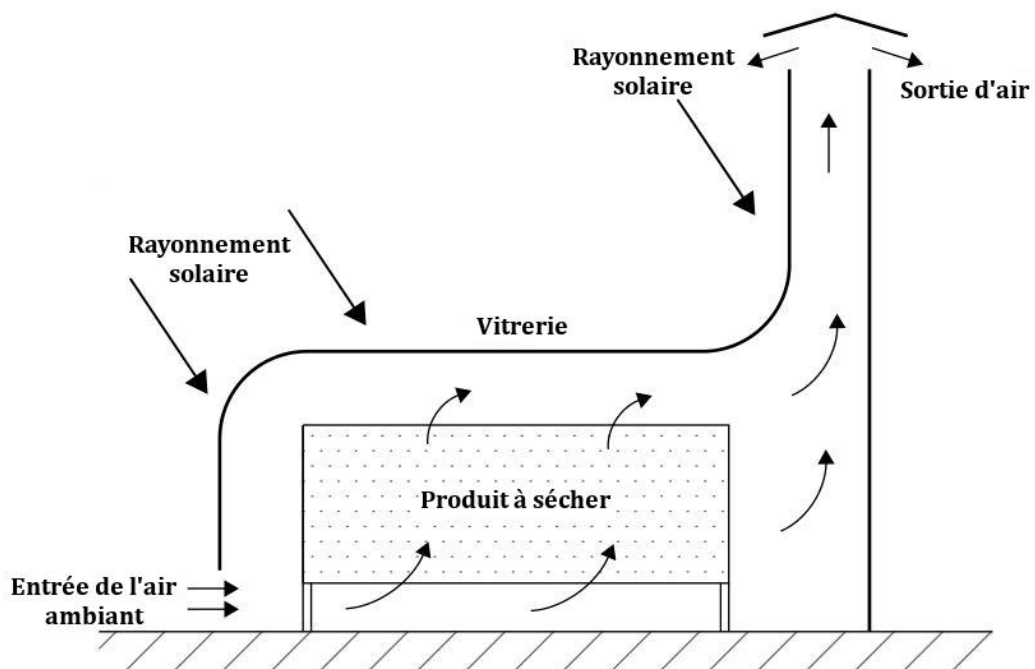


Figure 18 : Séchoir solaire passif de type direct. Source [4]

Type indirect :

Les séchoirs de type indirect, à circulation naturelle sont des séchoirs composés de collecteur solaire d'air chaud, d'un conduit approprié, d'une armoire de séchage et d'une cheminée. Dans ce type de séchoir, le produit est déposé sur une plaque ou sur une claie à l'intérieur de l'armoire de séchage opaque qui ne permet pas aux rayonnements du soleil d'atteindre directement le produit. L'air qui est chauffé durant son passage à

travers le collecteur solaire est canalisé à partir de l'armoire de séchage pour sécher le produit. Le produit ne reçoit pas une insolation directe et permet d'éviter le phénomène de caramélisation (formation de cristaux de sucres sur la surface du produit). Les dommages dus à la température élevée ne se produisent pas. Ces séchoirs sont utilisés pour les fruits et les produits périssables. Une température opérante plus élevée est généralement obtenue dans ce type de séchoir comparé au type direct. Ils peuvent généralement fournir des produits de hautes qualités et sont fortement recommandés pour plusieurs couches de séchage. Leurs inconvénients résident dans le fait que la fluctuation de température de l'air quittant le collecteur rend les conditions constantes d'opération à l'intérieur de l'armoire difficile à maintenir. Ils ont généralement des structures bien élaborées nécessitant plus d'investissements et d'équipements et des coûts de maintenance plus élevés par rapport aux types directs. Leurs efficacités peuvent être facilement améliorées parce que les composants du séchoir peuvent être conçus pour une efficacité optimale de leurs fonctions.

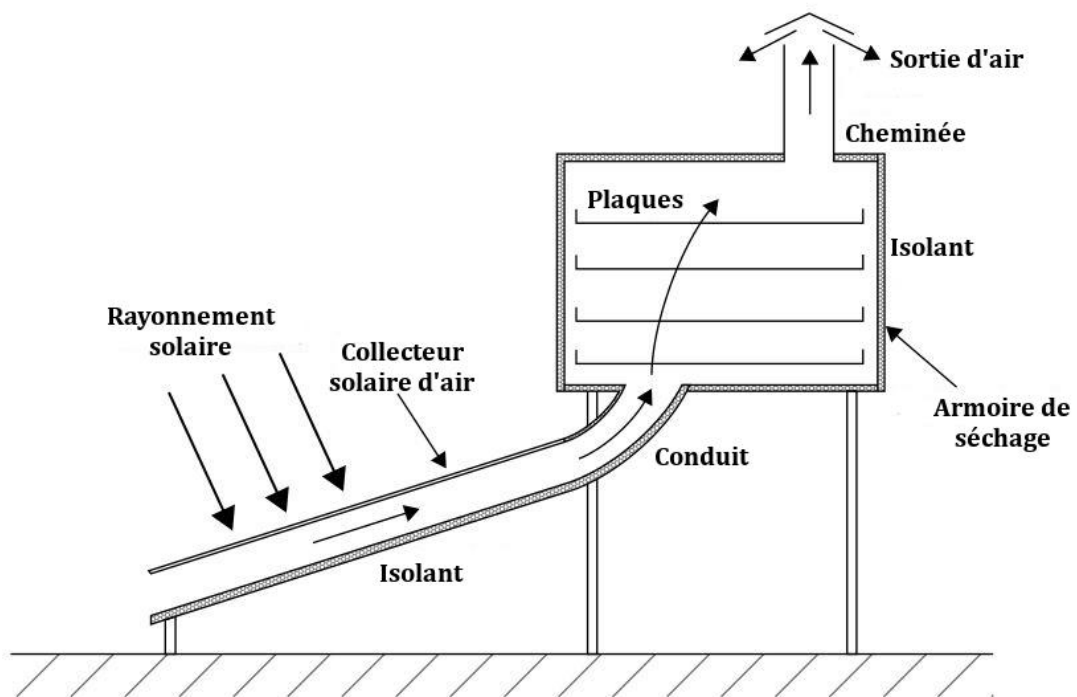


Figure 19 : Séchoir solaire passif de type indirect. Source [4]

Type mixte :

Les types mixtes à circulation naturelle combinent les deux autres modes précédentes. Dans ce type, l'action combinée des rayonnements solaires incidents arrivant directement sur le produit à sécher et l'air chauffé dans le collecteur fournit la chaleur nécessaire pour le procédé de séchage. Ces séchoirs ont les mêmes propriétés que les

types indirects et sont composés d'une armoire de séchage séparée, d'une cheminée et en addition les murs de l'armoire de séchage sont vitrifiés permettant ainsi aux rayonnements solaires d'atteindre directement le produit comme dans les types directs.

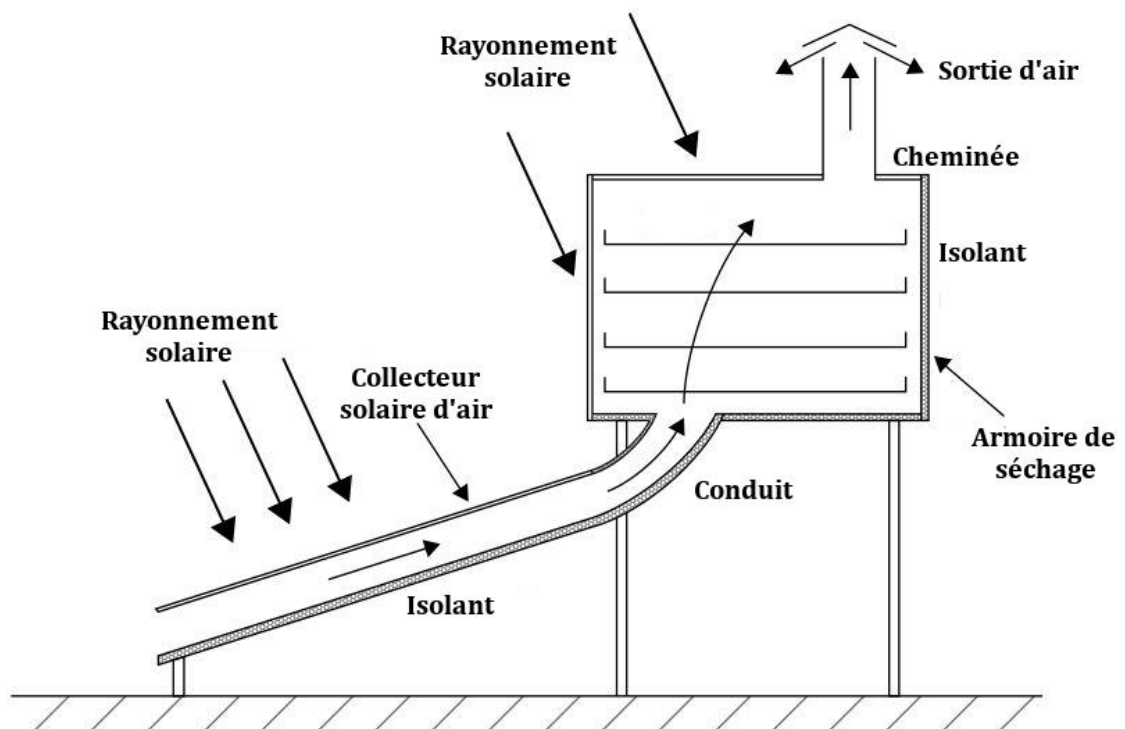


Figure 20 : Séchoir solaire passif de type mixte. Source [4]

III.4.2 - Caractéristiques des capteurs solaires plans à air [1] [4] [7] [13]

a. - Composants d'un capteur

Les capteurs solaires plans à air ou insolateurs sont des systèmes conçus pour capter les rayonnements solaires et les transformer en énergie thermique. L'énergie thermique est transférée à l'air ambiant entrant dans le capteur et permet de le réchauffer. Cet air réchauffé est ensuite utilisé pour sécher les produits disposés dans l'armoire de séchage. Les principaux composants d'un capteur solaire plan à air sont généralement :

- La couverture qui est composée d'une ou de deux plaques de verre ou d'autres matériaux permettant la transmission des rayonnements.
- L'absorbeur qui est une plaque plate, ondulée ou cannelée au niveau de laquelle s'effectue la conversion thermique. Elle est généralement recouverte d'une couche de matériau à forte absorption et à faible émittance.
- Le fluide caloporteur. Le fluide caloporteur est un moyen de transfert de la chaleur collectée par l'absorbeur à un fluide d'échange thermique appelé fluide de travail.

Le fluide de travail est chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de température. Il est choisi en fonction de ses propriétés physiques et chimiques. Il doit posséder une conductivité thermique élevée, une faible viscosité et une capacité calorifique élevée. Dans notre cas, le fluide caloporteur est l'air.

- Le conduit d'air qui est un passage qui dirige le transfert de chaleur du fluide caloporteur depuis l'entrée d'air jusqu'à la sortie d'air.
- L'isolation qui est utilisée pour minimiser les pertes de chaleur de part et d'autre du capteur.
- L'enveloppe extérieure (caisson) qui entoure les composants cités ci-dessus pour les protéger de la poussière, de l'humidité et des autres particules nocives.

b. - Géométrie d'un capteur solaire à air

Le plus simple type de capteur est le capteur non couvert dont le principe consiste seulement à créer un conduit d'air entre l'isolation et la surface supérieure de l'absorbeur. Les capteurs de type couvert quant à eux peuvent se présenter sous diverses formes avec la particularité de posséder une couverture diaphane au-dessus de l'absorbeur. La plaque transparente réduit les pertes par convection de l'absorbeur à travers la mince couche d'air stagnante retenue entre la plaque et la couverture. Elle réduit aussi les pertes par rayonnement du capteur car la couverture est transparente aux rayonnements de courtes ondes reçues du soleil et est presque opaque aux radiations thermiques d'ondes longues émises par la plaque absorbante par effet de serre. Cette particularité permet d'obtenir un meilleur rendement de captage comparé au type non-couvert mais induit à une augmentation des coûts et une complexité de fabrication.

L'avantage majeur des capteurs de type non-couvert réside dans le fait qu'ils peuvent être incorporés sur le toit d'un séchoir ou de celui d'un bâtiment de stockage car les tôles ondulées servant d'absorbeur sont des matériaux bon marché et disponibles partout. De plus, quand ils sont combinés avec de la peinture noire, ils forment un excellent absorbeur. La chaleur disponible du capteur dépend du temps et une considération de ce paramètre doit être faite en choisissant l'énergie solaire comme seule source ou en ajoutant une autre source auxiliaire.

c. - Orientation et inclinaison d'un capteur [4] [21]

Les capteurs plans ont l'avantage de recevoir le rayonnement direct et diffus en même temps et sont disposés dans un endroit fixe n'impliquant donc pas de poursuite du soleil. Ils doivent être orientés directement vers le Sud pour l'hémisphère Nord et vers le


Nord pour l'hémisphère Sud. L'angle d'inclinaison optimum est égal à la latitude du lieu considéré avec une variation d'angle de plus ou moins 10 à 15° suivant l'application.

III.4.3 - Dimensionnement simplifié d'un séchoir solaire passif de type indirect [20] [22]

Nous allons donner quelques calculs et paramètres utiles pour le dimensionnement d'un séchoir solaire passif de type indirect.

 **Quantité d'eau qu'on doit enlever du produit :**

$$m_w = m_p \left(\frac{X_{Si} - X_{Sf}}{100 - X_{Sf}} \right) \quad (I.86)$$

 **Energie requise pour enlever l'eau du produit :**

$$E_p = m_w \times L_v \quad (I.87)$$

 **Energie acquise par l'air à partir des rayonnements :**

$$E_a = I_T \times A_c \times \eta_c \quad (I.88)$$

 **Energie requise pour l'évaporation :**

$$E_p = E_a \times t_d \quad (I.89)$$

 **Energie reçue par l'air :**

$$E_a = \dot{m}_a \times C_{pa} \times \Delta T \quad (I.90)$$

 **Débit massique du flux d'air :**

$$\dot{m}_a = \frac{I_T \times A_c \times \eta_c}{C_{pa} \times \Delta T} \quad (I.91)$$

 **Vitesse de l'air requise :**

$$\dot{m}_a = \rho_a \times V_a \quad (I.92)$$

$$V_a = \frac{\dot{m}_a}{\rho_a} \quad (I.93)$$

$$V_a = A \times v_a \quad (I.94)$$

$$v_a = \frac{V_a}{A} \quad (I.95)$$

$$A = h \times l \quad (I.96)$$

✚ Rendement moyen de séchage :

$$M_{dr} = \frac{m_w}{t_d} \quad (I.97)$$

✚ Détermination de l'énergie perdue dans le capteur à air :

➤ **Energie totale transmise et absorbée :**

$$I_T \times A_c \times \tau \times \alpha = Q_u + Q_L \quad (I.98)$$

$$Q_U = \dot{m}_a \times C_{pa} \times \Delta T \quad (I.99)$$

$$Q_L = U_L \times A_c \times \Delta T \quad (I.100)$$

✚ Détermination de l'épaisseur de base de l'isolation :

$$F_R \dot{m}_a C_{pa} \Delta T = \frac{\lambda_t A_c \Delta T}{t_b} \quad (I.101)$$

$$t_b = \frac{\lambda_t A_c}{F_R \dot{m}_a C_{pa}} \quad (I.102)$$

III.5 - Prétraitements des produits avant séchage [12] [18]

Avant le séchage, un certain nombre d'opérations visant à préparer le produit à sécher est indispensable. Les prétraitements sont appliqués pour améliorer les qualités des produits, la stabilité d'entreposage et l'efficacité du procédé de séchage.

III.5.1 - Prétraitements physiques

a. - Lavage

Le lavage consiste à éliminer les microorganismes présents dans les fruits par trempage de ces derniers dans un mélange de solution d'eau et d'un agent détersif.

b. - Triage

Cette opération consiste à sélectionner les produits de bonne qualité en fonction de leur degré de maturité et permet d'enlever les produits en bon état et pas trop mûrs qui supporteront l'attente d'être en phase avancée de séchage pour ne plus être susceptibles de se dégrader.

c. - Pelage

Le pelage est destiné à ôter la couche superficielle et les parties non comestibles d'un produit.

d. - Découpage

Les produits sont découpés selon la forme qu'on veut obtenir comme produit final. C'est une étape primordiale avant le séchage car le temps de séchage dépend de la forme et de l'épaisseur du produit dans le séchoir. De ce fait, on découpe les produits pour accélérer le procédé de séchage sinon ils seraient exposés plus rapidement aux micro-organismes à cause d'un temps de séchage lent.

III.5.2 - Prétraitements chimiques

a. - Blanchiment

Le blanchiment est une méthode de prétraitement des produits à sécher par immersion dans l'eau ou dans la vapeur. Le principal objectif lors d'un blanchiment est de désactiver les enzymes naturels présents dans les aliments car les enzymes sont responsables du développement du goût, de la décoloration ou brunissement, de la détérioration de la qualité nutritionnelle et du changement de texture de l'aliment. Un des avantages du blanchiment est d'éliminer les bulles d'air de la surface végétale et des espaces intracellulaires, réduisant ainsi le taux de microbe initial des produits frais. Cela facilite les opérations primaires comme le pelage et le découpage, améliore la couleur, la texture et le goût sous des conditions optimales. Cette méthode présente aussi des désavantages car elle peut altérer la couleur, la texture et le goût; le processus de chauffage augmente la perte de corps solide soluble comme les vitamines surtout pour le cas d'un blanchiment avec de l'eau et peut aussi modifier les états physico-chimiques des nutriments. Elle présente aussi un inconvénient environnemental du fait de l'utilisation conséquente d'eau (déversement des eaux usées après son utilisation) et d'énergie.

Le temps et la température de blanchiment sont des facteurs considérables pour l'obtention des qualités optimales des produits séchés. La température normale de blanchiment est entre 80 à 100°C. Actuellement, des températures plus basses établies entre 50 à 70°C et une durée plus longue de blanchiment ont été proposées pour une bonne texture et une réduction des pertes de nutriments.

Le temps de blanchiment est en corrélation avec le goût et les attributs sensoriels du fruit sec. Un temps limité de blanchiment suivi d'un refroidissement rapide est une méthode de blanchiment alternative et une combinaison qui a pour effet une amélioration du goût des fruits séchés. Il est à noter que le blanchiment s'applique surtout pour les fruits à peau comestible.

b. - Traitement par dioxyde de soufre

Le traitement par dioxyde de soufre est une opération consistant à soumettre le produit pendant quelques minutes à un courant de soufre. Le dioxyde de soufre préserve la texture, la saveur, les vitamines et la couleur rendant le produit attractif aux yeux des consommateurs. Cette opération est largement utilisée dans l'industrie agroalimentaire pour réduire l'oxydation qui peut entraîner le noircissement des produits durant le séchage et pour préserver l'acide ascorbique et le carotène. Le soufre permet aussi la migration de l'eau contenue dans le produit vers la surface facilitant ainsi le séchage du produit.

PARTIE II : REALISATION ET EXPERIMENTATION D'UN SECHOIR SOLAIRE

CHAPITRE I : CONCEPTION DU SECHOIR

I.1 - Sélection des matériaux pour le séchoir [23]

Pour la sélection des matériaux constituant le séchoir, nous avons procédé à une analyse fonctionnelle des différents besoins autour du séchoir.

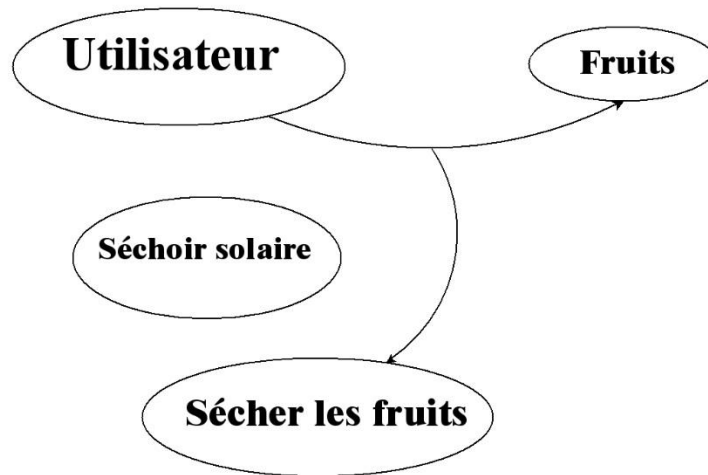


Figure 21 : Graphes des prestations

A partir de ce graphe, nous avons établi un diagramme pieuvre qui permet de définir les liens (c'est-à-dire les fonctions de service) entre le système et son environnement

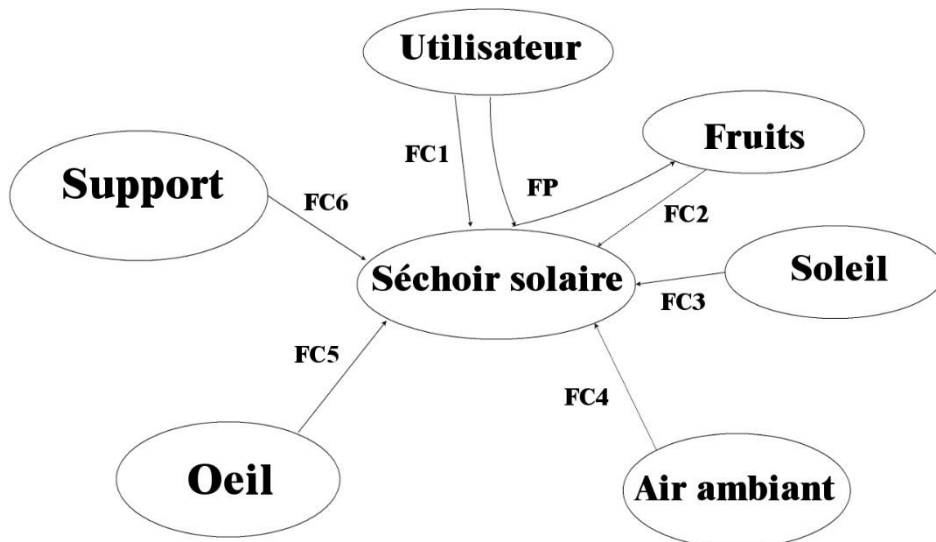


Figure 22 : Identifications des fonctions services

La fonction principale (FP) du séchoir solaire que nous devons concevoir est de sécher les fruits. Les fonctions contraintes (FC) à prendre en compte sont : faciliter l'utilisation du séchoir, contenir les fruits sans les détériorer, supporter les hautes températures et les rayonnements, capter l'énergie et l'utiliser, résister à la composition de l'air ambiant, être agréable à l'œil, s'adapter au terrain d'utilisation.

Après cette étape, nous avons dressé les facteurs d'influences qui sont subdivisés en quatre domaines : caractéristiques spécifiques, les sollicitations mécaniques, les facteurs d'environnement et le facteur temps.

Nous constatons qu'il existe plusieurs matériaux qui satisfont aux exigences considérées, mais nous avons choisi les suivants.

Le bois contreplaqué pour les caractéristiques suivantes :

- **Légèreté** : ce type de bois présente les mêmes propriétés que le bois massif mais présente une plus grande légèreté.
- **Résistance aux chocs et aux intempéries** : Cette caractéristique est essentielle pour le cas de soufflement de vents et les mauvais temps.
- **Résistance à la composition de l'air et à l'humidité** : l'air n'altère pas le contreplaqué chimiquement et il est très étanche.
- **Bonne isolation thermique** : le contreplaqué présente une bonne isolation et on peut y incorporer d'autres matériaux d'isolation thermique
- **Résistance aux insectes xylophages et aux champignons** : cette caractéristique est primordiale car les champignons et les insectes pourraient affecter les fruits durant le séchage.
- **Durabilité**

L'enveloppe du capteur et l'armoire de séchage sont constituées chacune de ce matériau.

Tableau 2 : Propriétés du contreplaqué

| Propriétés physiques | | Propriétés thermiques liées à la conduction | Propriétés radiatives | | | |
|---------------------------------------|---|---|--------------------------|---------------------------------------|-------------|------------|
| | | | Nature : matériau opaque | | | |
| Masse volumique (kg.m ⁻³) | Chaleur massique (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹) | Conductivité thermique | Absorptivité | Transmissivité sous incidence normale | Réfectivité | Emissivité |
| 440-880 | 1200-2700 | 0,11-0,15 | 0,60 | 0 | 0,40 | 0,83-0,98 |

Le verre ordinaire pour la couverture transparente. Ses caractéristiques sont :

- **Résistance aux chocs**
- **Résistance aux brusques variations de température et aux températures élevées.**
- **Isolation de l'air chaud du capteur et l'air ambiant**
- **Transparence au rayonnement**
- **Légèreté**
- **Durabilité** : c'est un matériau durable par rapport aux autres matériaux utilisés comme couverture (film et feuille plastique)

Tableau 3 : Propriétés du verre ordinaire de 4mm d'épaisseur

| Propriétés physiques | | Propriétés thermiques liées à la conduction | Propriétés radiatives | | | |
|---------------------------------------|------------------------------------|---|------------------------------------|---------------------------------------|--------------|------------|
| | | | Nature : matériau semi transparent | | | |
| Masse volumique (kg.m ⁻³) | Température maximale d'utilisation | Conductivité thermique | Absorptivité | Transmissivité sous incidence normale | Réflectivité | Emissivité |
| 2500 | 200°C | 1,20 | 0,08 | 0,83-0,92 | ~0 | 0,85-0,92 |

Exemple d'application :

Le verre utilisé pour une application solaire transmet 92% du rayonnement incident sur la gamme de longueur d'onde 0,30 et 3µm et reste opaque aux autres longueurs d'onde. On considère que le soleil rayonne comme un corps noir à 5760 K. Déterminez le pourcentage de rayonnement solaire que le verre transmet. En assumant que l'intérieur de l'application est un corps noir à 373 K, déterminez le pourcentage de rayonnement émis de l'intérieur et transmis à travers le verre.

Nous allons d'abord déterminer le pourcentage de rayonnement solaire incident que le verre transmet.

- Pour $\lambda_1 = 0,30 \mu\text{m}$, on a : $\lambda_1 T = 0,300 \times 5760 = 1728 \mu\text{m.K}$
- Pour $\lambda_2 = 3 \mu\text{m}$, on a : $\lambda_2 T = 3 \times 5760 = 17280 \mu\text{m.K}$

En interpolant les données de la table des valeurs de $F_{0-\lambda T}$ on obtient :

- Pour $\lambda_1 T = 1728 \mu\text{m.K}$, $F_{0-\lambda_1 T} = 3,17\%$
- Pour $\lambda_2 T = 17280 \mu\text{m.K}$, $F_{0-\lambda_2 T} = 97,78\%$

Le pourcentage de l'énergie rayonnante totale qui parvient du soleil sur le verre à des longueurs d'onde comprises entre 0,30 et 3µm est donc :

$$F_{\lambda_1 T - \lambda_2 T} = 97,78\% - 3,17\% = 94,61\%$$

Le pourcentage qui traverse le verre est $0,92 \times 94,61\% = 87,04\%$

Nous allons maintenant déterminer le pourcentage de rayonnement émis à l'intérieur de l'application et transmis à travers le verre.

- Pour $\lambda_1 = 0,30 \mu\text{m}$, on a : $\lambda_1 T = 0,30 \times 373 = 111,90 \mu\text{m.K}$
- Pour $\lambda_2 = 3 \mu\text{m}$, on a : $\lambda_2 T = 3 \times 373 = 1119 \mu\text{m.K}$

En interpolant les données de la table des valeurs de $F_{0-\lambda T}$ on obtient :

- Pour $\lambda_1 T = 111,90 \mu\text{m.K}$, $F_{0-\lambda_1 T} = 0\%$
- Pour $\lambda_2 T = 1119 \mu\text{m.K}$, $F_{0-\lambda_2 T} = 0,10\%$

Le pourcentage de rayonnement infrarouge incident au verre à des longueurs d'onde comprises entre $0,30$ et $3 \mu\text{m}$ est donc $0,10\%$ et le pourcentage qui traverse le verre est $0,92 \times 0,10 = 0,09\%$.

Cet exemple illustre parfaitement le principe de l'effet de serre. En effet, le verre est un matériau quasiment transparent au rayonnement solaire alors qu'il est presque opaque au rayonnement infrarouge. Un flux solaire traversant le verre et venant chauffer un corps derrière ce dernier se trouve donc piégé, puisque le rayonnement émis par ce corps ne peut traverser le verre.

Le polystyrène expansé pour l'isolation thermique. Ces caractéristiques sont :

- **Légèreté** : c'est un matériau léger et facilement transportable.
- **Conductivité thermique** : sa conductivité thermique est basse lui conférant une bonne propriété d'isolation thermique.
- **Résistance aux chocs et à la compression** : la disposition de l'isolant dans le capteur exige ces propriétés.
- **Chaleur massique basse**

Tableau 4 : Propriétés du polystyrène

| Propriétés physiques | | Propriété thermique liée à la conduction | Propriétés radiatives | | | |
|--|--|--|--------------------------|---------------------------------------|-------------|------------|
| | | | Nature : matériau opaque | | | |
| Masse volumique (kg.m^{-3}) | Chaleur massique ($\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$) | Conductivité thermique | Absorptivité | Transmissivité sous incidence normale | Réfectivité | Emissivité |
| 45 | 1380 | 0,03-0,04 | 0,06 | 0 | 0,94 | 0,97 |

Une tôle plane en acier blanc galvanisée pour l'absorbeur. Ces caractéristiques sont :

- **Conductivité thermique** : La conductivité thermique de ce matériau est de $46 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ce qui est convenable pour l'application.
- **Résistance à la corrosion** : la galvanisation permet un traitement anticorrosif pour le matériau.
- **Traitement de surface** : le matériau est recouvert d'une couche de peinture noire pour améliorer l'absorption et l'émission du rayonnement solaire.

Tableau 5 : Propriétés de l'absorbeur sélectionné

| Propriétés physiques | | Propriété thermique liée à la conduction | Propriétés radiatives | | | |
|--|--|--|--------------------------|---------------------------------------|-------------|------------|
| | | | Nature : matériau opaque | | | |
| Masse volumique (kg.m^{-3}) | Chaleur massique ($\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$) | Conductivité thermique | Absorptivité | Transmissivité sous incidence normale | Réfectivité | Emissivité |
| 7850 | 490 | 46 | 0,65 | 0 | 0,35 | 0,23-0,88 |

I.3 - Réalisation du séchoir solaire

Après avoir sélectionné les matériaux nécessaires à la conception du séchoir, nous en sommes à la réalisation de ce dernier. Le séchoir que nous avons conçu est un séchoir expérimental. Nous n'avons pas dimensionné le séchoir car comme nous pouvons le constater dans le paragraphe à propos des dimensionnements, un véritable dimensionnement tient compte : de la masse de fruits à sécher, de la contrainte temps, du gisement solaire de la localité et du type de séchoir. Nous donnerons dans ce paragraphe une description des opérations de fabrication de ce séchoir expérimental.

I.3.1 - Réalisation du capteur

Le capteur solaire fonctionne en combinant deux principes physiques : l'effet de serre et le corps noir. C'est un dispositif dont l'activité principale est de recueillir l'énergie transmise par les radiations solaires pour la transformer en énergie calorifique et ensuite la transférer au fluide caloporteur produisant ainsi de la chaleur qui est exploitée pour sécher un produit. Le principe de circulation dans l'air dans le capteur se produit par effet Venturi. La surface de sortie d'air du capteur a été diminuée de sorte que la vitesse constante du fluide caloporteur à l'entrée augmente à la sortie du capteur à cause d'une dépression et créant ainsi une aspiration. [24]

a. - Création du modèle

Le capteur solaire que nous avons conçu est un capteur plan de type couvert composé d'une couverture transparente en verre, d'un absorbeur en tôle plane galvanisée et d'une isolation en polystyrène disposée dans le fond du séchoir. Tous les éléments cités précédemment sont assemblés dans du bois contreplaqué qui joue le rôle d'enveloppe dans le système. Le modèle du capteur du séchoir a été conçu comme le montre la figure suivante.

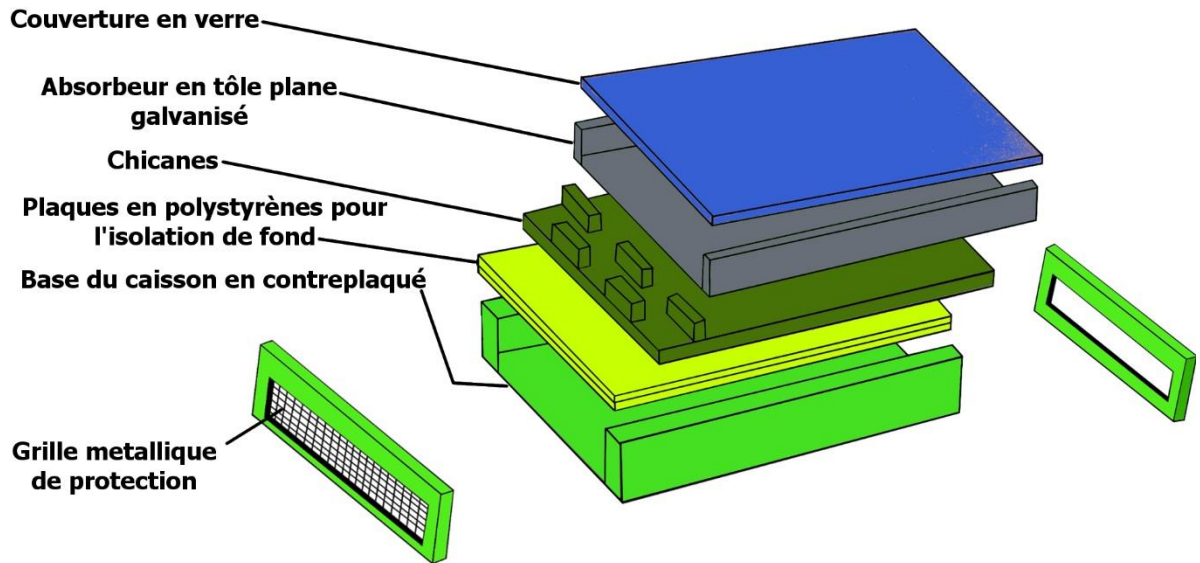


Figure 23 : Vue éclatée des éléments du capteur

b. - Réalisation du modèle

La couverture en verre

La couverture en verre ne subit aucune mise en forme mais elle est choisie avec des dimensions prédéfinies :

Tableau 6 : Dimensions de la couverture en verre

| Désignation | Longueur | Largeur | Epaisseur |
|---------------------|----------|---------|-----------|
| Couverture en verre | 0,70 m | 0,49 m | 0,005 m |

L'absorbeur

L'absorbeur est constitué d'une tôle plane galvanisée peinte avec de la peinture à l'huile noire mate. La mise en forme de l'absorbeur se fait par cisailage avec une cisaille. Les dimensions de l'absorbeur sont décrites dans le tableau suivant :

Tableau 7 : Dimensions de l'absorbeur

| Désignation | Longueur | Largeur | Epaisseur |
|-------------|----------|---------|-----------|
| Absorbeur | 0,70 m | 0,50 m | 0,002m |

Les chicanes

Pour améliorer les performances du capteur, nous avons introduit dans le conduit d'air des chicanes parallélépipédiques en bois disposés en quinconce. Ces dernières rendent turbulent l'écoulement à proximité de la plaque chauffante et régulent la circulation de l'air dans le conduit car le parcours est prolongé .Elles favorisent aussi le transfert thermique au fluide caloporteur optimisant ainsi l'échange par convection. [7] [21]

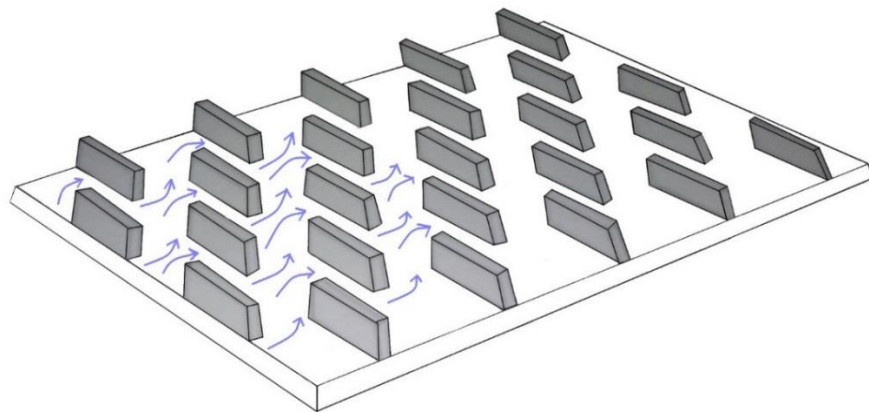


Figure 24 : Chicanes disposées sur le conduit d'air

Les chicanes sont obtenues en fixant des pièces de bois carré sciées avec des dimensions prédéfinies avec des vis sur une plaque en contreplaqué obtenue par sciage. Les dimensions des éléments constituant les chicanes sont les suivantes :

Tableau 8 : Dimensions des éléments constitutifs des chicanes

| Désignation | Longueur | Largeur | Epaisseur | Quantité |
|---------------------|----------|---------|-----------|----------|
| Plaque contreplaqué | 0,70 m | 0,50 m | 0,01 m | 1 |
| Bois carré | 0,10 m | 0,05m | 0,03 m | 25 |

L'isolation

L'isolation de fond est constituée de deux plaques de polystyrène superposées, disposées en sandwich entre deux plaques de contreplaqué (la base des chicanes et la base du caisson). Nous noterons le fait que les parties latérales du caisson ne sont pas isolées. Les dimensions des constituants de l'isolation sont :

Tableau 9 : Dimensions des éléments de l'isolation

| Désignation | Longueur | Largeur | Epaisseur |
|-------------------------|----------|---------|-----------|
| Plaques de polystyrènes | 0,70 m | 0,50 m | 0,04 m |

Le caisson

Le caisson est constitué de planches de contreplaqué sciées. Ces planches constituent la base, les côtés de front et de derrière et les parties latérales du caisson. Les dimensions des éléments constituant le caisson sont les suivantes :

Tableau 10 : Dimensions des éléments du caisson

| Désignation | Longueur | Largeur | Epaisseur | Quantité |
|-------------------------------|----------|---------|-----------|----------|
| Base | 0,70 m | 0,50 m | 0,01 m | 1 |
| Côtés latérales | 0,70 | 0,15 m | 0,01m | 4 |
| Côtés de front et de derrière | 0,50 m | 0,15 m | 0,01 | 4 |

Le capteur est réalisé en suivant le modèle et les mesures données dans les tableaux. La première étape consiste à la réalisation des éléments (parties latérales et base) du caisson. Les deux éléments sont fixés ensemble avec des vis pour constituer la base du capteur. Ensuite, l'isolation de fond et les chicanes sont placées dans la base du caisson. L'étape suivante consiste à placer l'absorbeur sur les parties latérales du caisson avec des vis. Après, les côtés de front et de derrière sont fixés sur la base pour constituer le caisson. La face de front est recouverte de grillage métallique pour éviter que les insectes s'introduisent dans le capteur. Quand tous ces éléments sont mis en place, la couverture en verre est disposée avec des joints en caoutchouc et du silicone. Le silicone joue le rôle double de joint et d'isolant car il fixe la couverture et emprisonne la petite

lame d'air entre cette dernière et l'absorbeur. Pour mieux renforcer le système, des attaches faites de tôles en acier sont implantées sur chaque coin du caisson.

I.3.2 - Réalisation de l'armoire de séchage

L'armoire de séchage est le compartiment où sont disposés les fruits à sécher. L'air chauffé à partir du capteur se dirige vers la partie basse de l'armoire pour traverser les fruits qui sont étalés sur des claies et les sèche par la même occasion.

a. - Création du modèle

L'armoire de séchage que nous avons conçue est une boîte parallélépipédique où sont entreposées trois claies pour sécher les fruits. A l'arrière de l'armoire se trouve une portière pour pouvoir faire entrer et sortir les fruits. L'évacuation de l'air usé après séchage se trouve au sommet de cette portière. Le schéma simplifié ci-dessous montre les différents éléments de l'armoire de séchage.

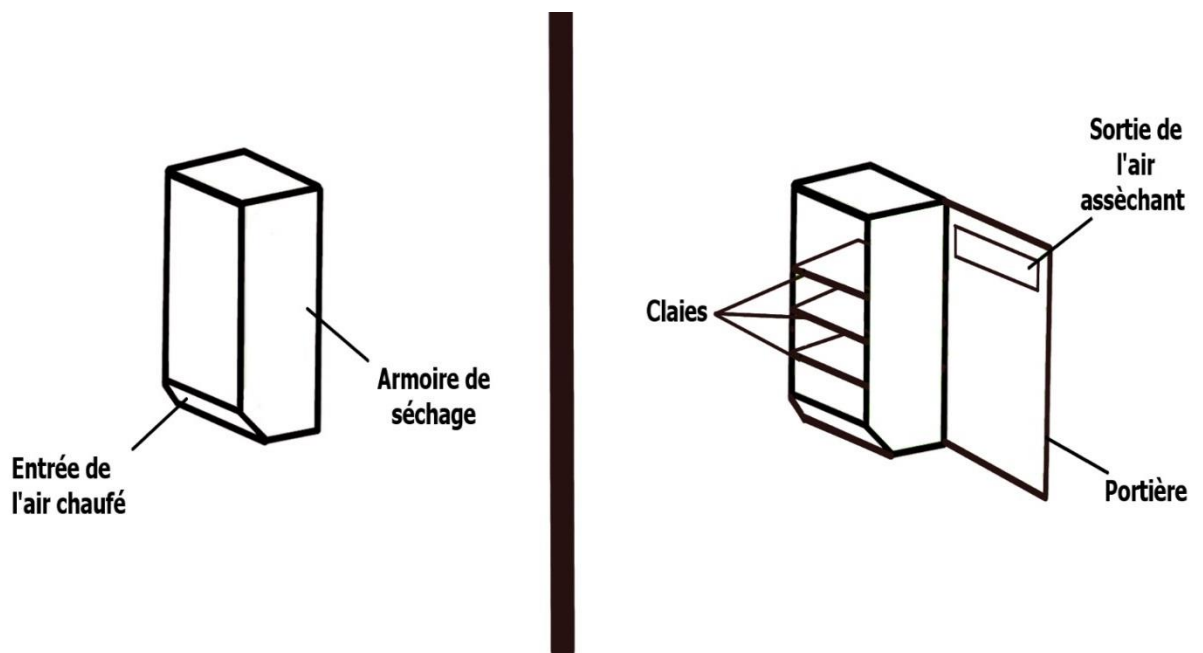


Figure 25 : Schéma simplifié de l'armoire de séchage

b. - Réalisation du modèle

Les éléments de l'armoire

L'ensemble de l'armoire est constitué de bois contreplaqué. La mise en forme appliquée à ce matériau pour obtenir les éléments de l'armoire est le sciage. Les dimensions sont données dans le tableau suivant :

Tableau 11 : Dimensions des éléments de l'armoire de séchage

| Désignation | Longueur | Largeur | Epaisseur | Quantité |
|-------------------------------------|----------|---------|-----------|----------|
| Planches des parties latérales | 0,70 m | 0,35 m | 0,01 m | 4 |
| Planches pour la couverture du haut | 0,50 m | 0,35 m | 0,01 m | 2 |
| Planches pour la base | 0,50 | 0,30 m | 0,01 | 2 |
| Planches de front | 0,55 m | 0,50 | 0,01 | 1 |

Les claies

Les claies sont fabriquées à partir de grilles métalliques fixées sur des fers ronds de forme rectangulaire. Ces claies sont superposées avec 10 cm d'écarts chacune de façon à ce que l'air asséchant reçu depuis le capteur puisse les traverser et sécher par la même occasion les fruits qui y sont disposés. Les dimensions des claies sont les suivantes :

Tableau 12 : Dimensions des claies

| Désignation | Longueur | Largeur | Quantité |
|-------------|----------|---------|----------|
| Claies | 0,50 m | 0,35 m | 3 |

La portière

La portière est faite en bois contreplaqué. Au sommet de cette portière se trouve la sortie d'air de l'armoire de séchage. Cette sortie est aussi recouverte de grillage métallique pour empêcher l'introduction des insectes et des saletés. Les dimensions de la portière sont les suivantes :

Tableau 13 : Dimensions de la portière

| Désignation | Longueur | Largeur | Epaisseur |
|-------------|----------|---------|-----------|
| Portière | 0,70 m | 0,50 m | 0,01 m |

L'armoire de séchage est réalisée en respectant le modèle et les mesures dans les tableaux. La première étape consiste à l'assemblage des éléments de l'armoire avec des vis et des clous. Les supports des claies sont ensuite installées sur les cotées latérales. Après cela, la portière est fixée avec une paumelle. Quand l'armoire est totalement assemblée, l'étape suivante consiste à fixer les coins avec des attaches faites de tôles en

acier pour solidifier l'ensemble. Les parties jointes sont finalement isolées avec un mélange de sciure de bois et de colle pour bois pour éviter les fuites d'air dans l'armoire

I.3.3 - Finalisation du séchoir

Après avoir réalisé le capteur et l'armoire de séchage, les deux éléments sont raccordés ensemble avec des charnières faites de tôles en acier fixées avec des vis. Les parties ainsi raccordées sont isolées avec du silicone et du mélange de sciure de bois et de colle pour bois pour éviter qu'une fuite d'air se produit lors du transfert du fluide caloporteur du capteur vers l'armoire de séchage. Les supports en bois carré du séchoir sont finalement installés après l'assemblage pour stabiliser le séchoir. Le premier support est sur la partie du capteur et le second est sur la partie de l'armoire de séchage.



Photo 1 : Le séchoir solaire passif de type indirect

CHAPITRE II : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans ce chapitre, nous traiterons des résultats de diverses expériences menées pendant une période considérée entre le mois de Février et Avril 2017 à Ivato. Nous donnerons d'abord une estimation des conditions optimales. Ensuite, nous parlerons de différentes expériences menées avec le séchoir avec deux types de fruits. Enfin, nous donnerons une étude économique du séchoir.

II.1 - Estimation des conditions optimales

II.1.1 - Diagramme solaire du lieu considéré

Le diagramme solaire est une forme de représentation graphique de la course du soleil. Il constitue un outil efficace pour repérer depuis un point quelconque de la surface terrestre le trajet du soleil à travers le ciel. La position précise du soleil dans le ciel à un moment donné se détermine à l'aide de deux coordonnées : l'azimut et la hauteur angulaire du soleil. Pour établir ce diagramme, nous avons procédé comme suit dans le processus vertical suivant :

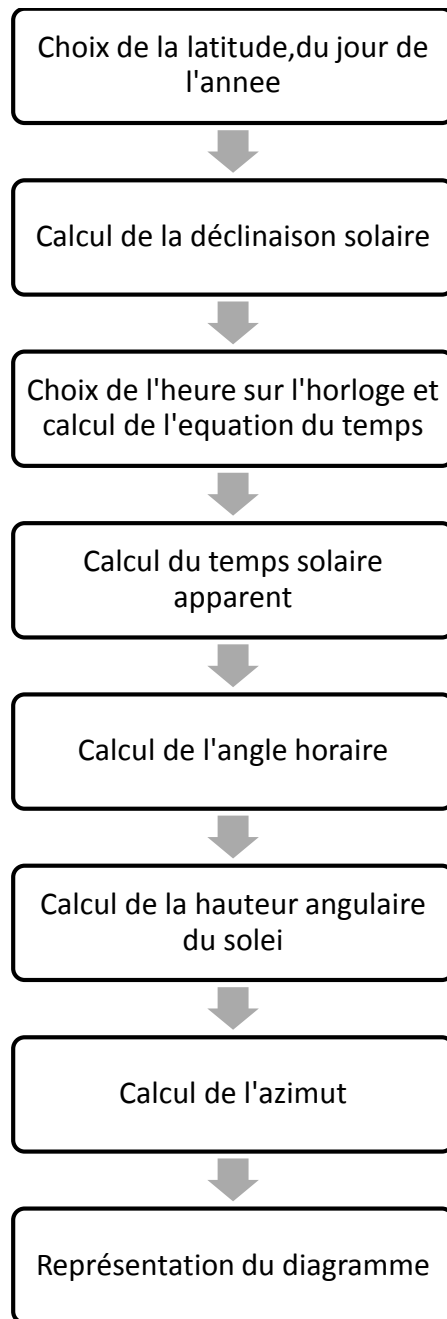


Figure 26 : Processus vertical pour la représentation du diagramme solaire

Nous avons utilisé EXCEL pour faire la représentation et voici les choix concernant les données du diagramme :

Tableau 14 : Données du diagramme

| Latitude | Jours de l'année | Choix de l'heure standard local | Année | Lieu considéré |
|----------|-----------------------|---------------------------------------|-------|----------------|
| -18,80°N | 17ième de chaque mois | 6 heures du matin à 18 heures du soir | 2017 | Ivato |

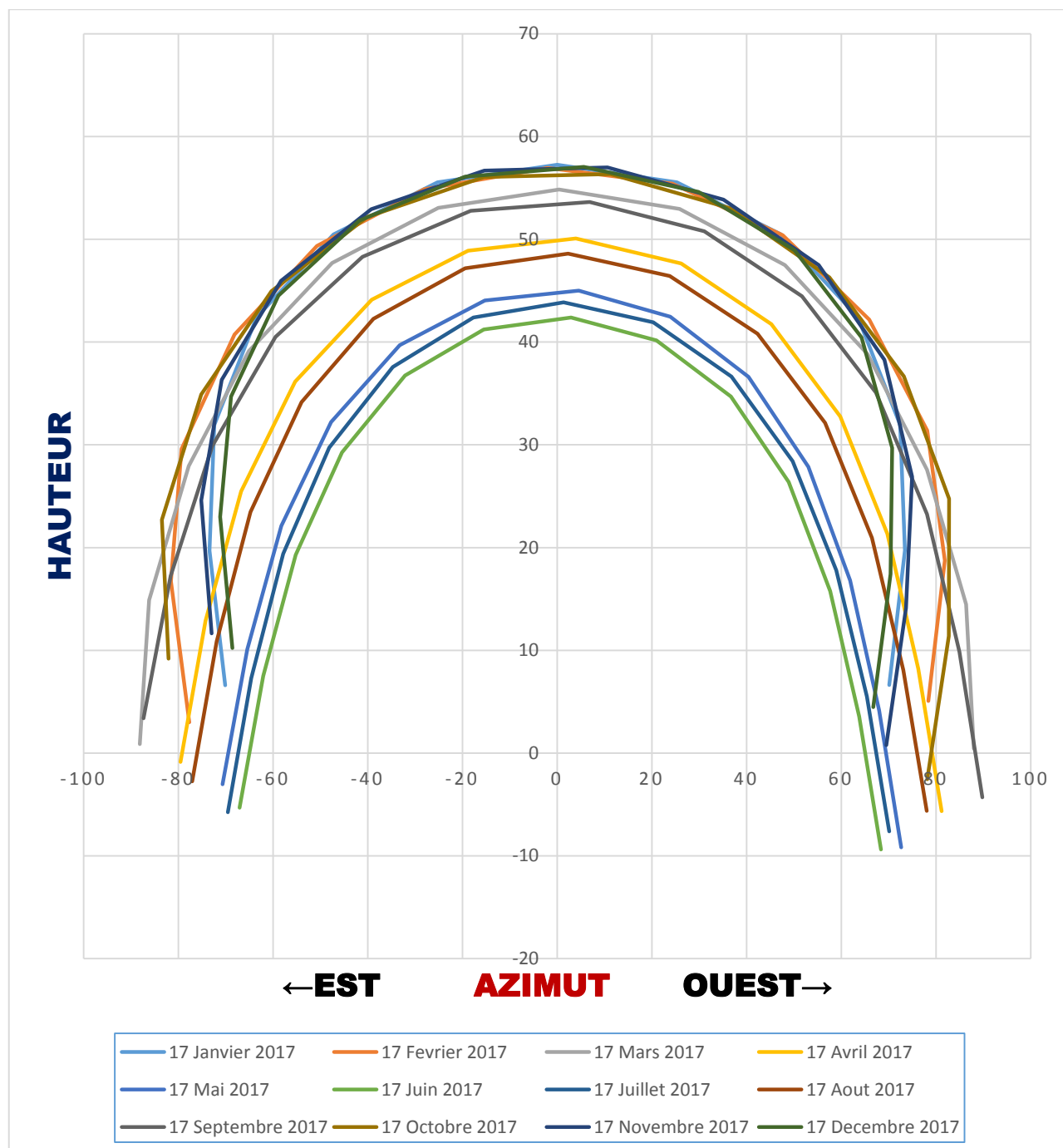


Figure 27 : Diagramme solaire pour tout le 17ième jour du mois de l'année 2017

Ce diagramme peut nous renseigner sur quelques données utiles pour l'année 2017 :

- Pendant les périodes estivales (Octobre à Mars), les courbes sur le graphe appartenant à cette période (surtout Octobre, Novembre, Décembre, Janvier et Février) sont situées en hauteur dans le diagramme.
- Pendant les périodes hivernales (Avril à Septembre) par contre, les courbes de cette période (en particulier Juin et Juillet) sont situées au plus bas dans le diagramme.

- Ces données nous permettent donc d'affirmer que la période d'ensoleillement pour le lieu considéré est plus propice au séchage solaire pendant les périodes estivales comparée aux périodes hivernales. Les récoltes pendant ces périodes doivent donc se faire en tenant compte que le séchage solaire peut être bénéfique pour limiter les pertes.

Nous avons aussi fait les diagrammes solaires pendant une période de séchage entre Février et Mars lors de nos expérimentations. Nous les présenterons comme suit :

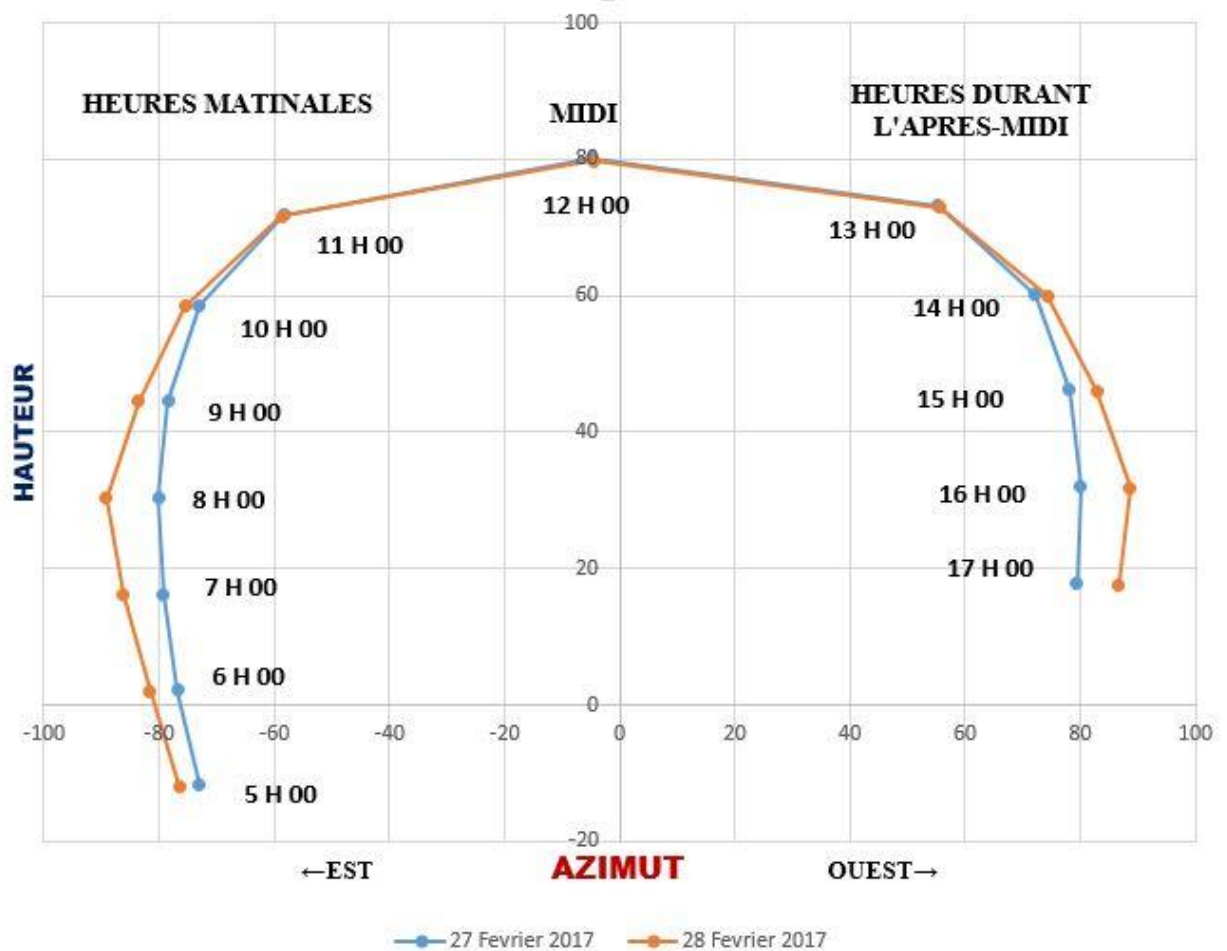


Figure 28 : Diagramme solaire du 27 et 28 Février 2017

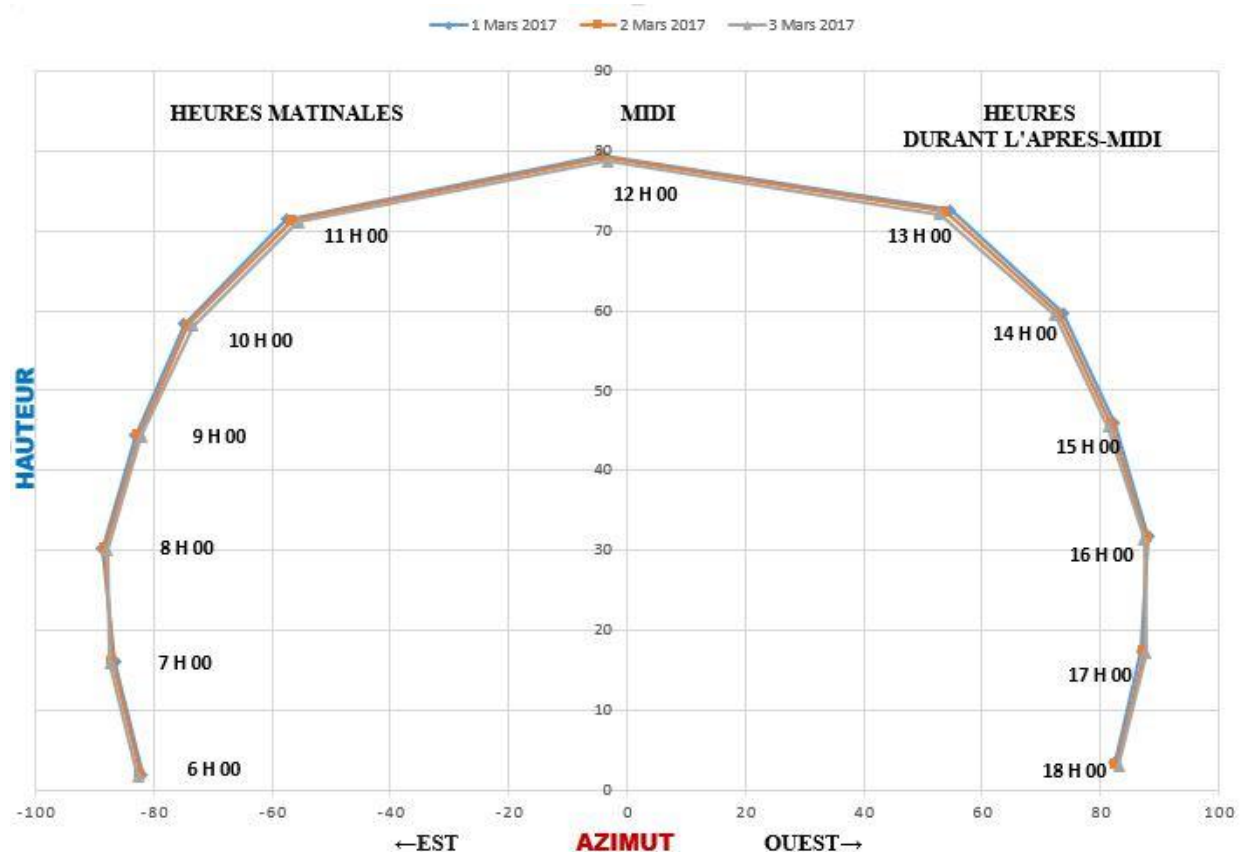


Figure 29 : Diagramme solaire du 1 au 3 Mars 2017

II.1.2 - Estimation du rayonnement solaire dans le lieu considéré

a. - Utilisation de données

Pour estimer les données relatives au gisement solaire dans le lieu considéré, nous avons choisi d'utiliser la base de données du logiciel RETScreen. Le logiciel d'analyse de projets d'énergies propres RETScreen est un outil unique d'aide à la décision développé en collaboration avec de nombreux experts de l'industrie, du gouvernement et du milieu académique. Offert gratuitement, il peut être utilisé partout à travers le monde pour évaluer la production et les économies d'énergies, le coût, les réductions des émissions, la viabilité financière et le risque de différentes technologies d'énergies renouvelables et d'efficacité énergétique. Le logiciel (disponible en plusieurs langues) inclut des bases de données de produits, de projets, hydrologiques et climatiques, un manuel de l'utilisateur, ainsi qu'un cours de formation de niveau collégial et universitaire basé sur des études de cas, incluant un manuel disponible en ligne d'ingénierie. [25]

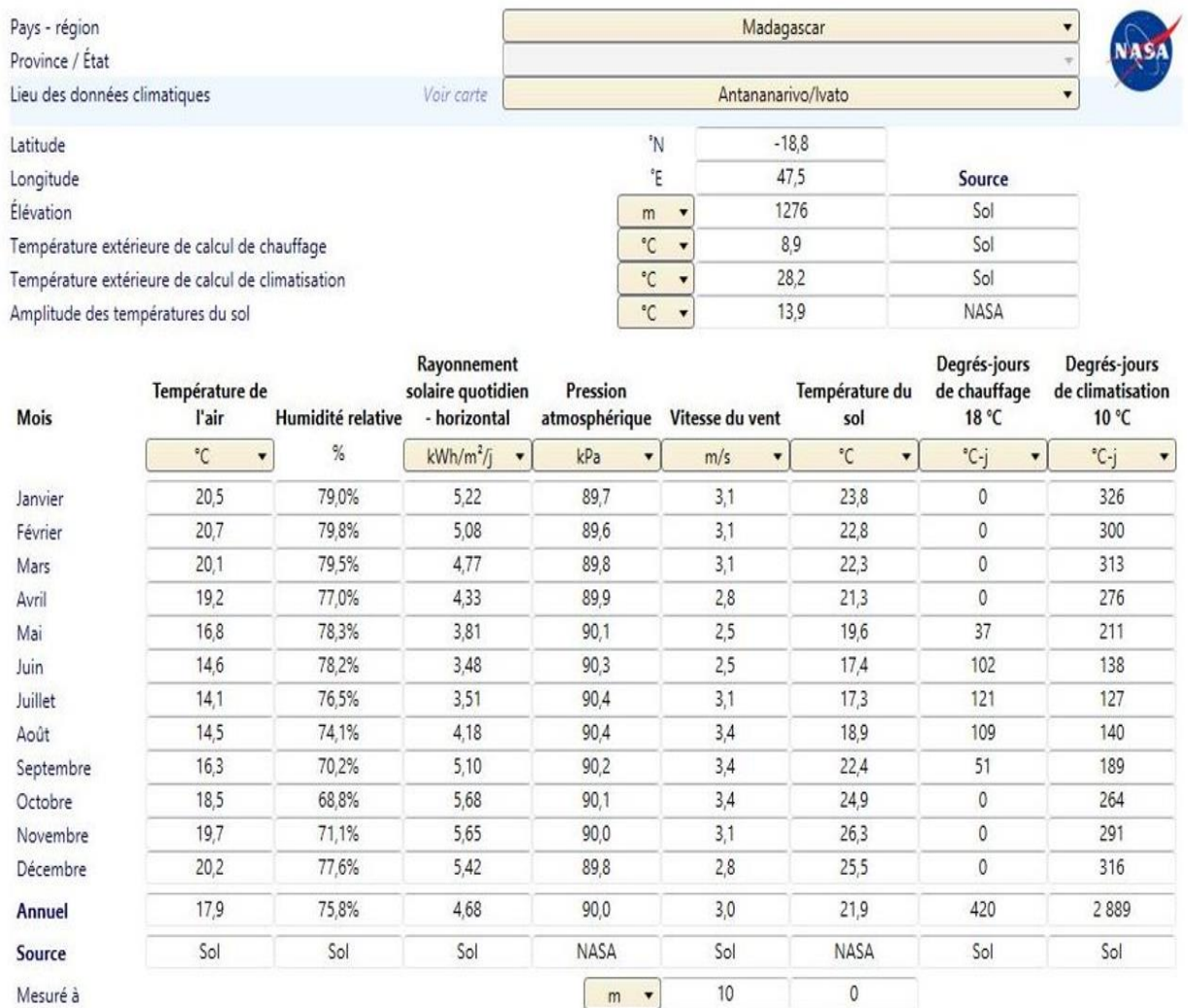


Figure 30 : Bases de données climatiques utilisées pour les calculs de l'estimation solaire. Source [25]

b. - Estimation du gisement solaire

Pour estimer le gisement solaire du lieu considéré, nous avons aussi utilisé EXCEL. Le lieu considéré pour les calculs du gisement solaire est Ivato-Antananarivo car c'est le lieu où se sont déroulées nos expérimentations. Le capteur est orientée vers le Nord avec un angle d'inclinaison de 29°. Nous avons choisi cet angle et cette orientation car la littérature suggère que l'angle d'inclinaison optimale d'une application solaire devrait être égale à la latitude d'un lieu avec une variation de +10° ou +15° avec une orientation plein Nord pour les sites de l'hémisphère Sud. [4] [5] Pour notre part, on a choisi une variation de +10°. La valeur de l'albédo au sol utilisée pour les calculs est 0,20.

Nous avons établi le processus vertical suivant pour connaître toutes les démarches à suivre pour les calculs :

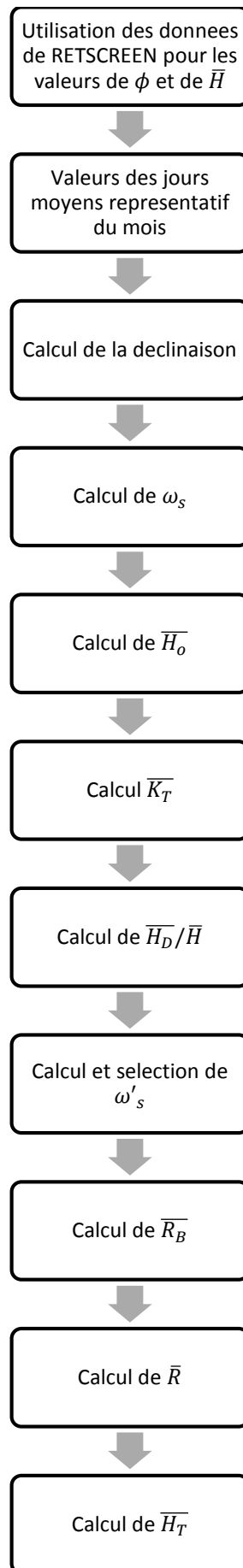


Figure 31: Processus pour le calcul de rayonnement global sur une surface inclinée

Tableau 15 : Valeurs du rayonnement global journalier en moyenne mensuelle sur une surface inclinée

| Mois | δ | N | \bar{H} | \bar{H}_0 | \bar{K}_T | \bar{H}_D/\bar{H} | \bar{R}_B | \bar{R} | \bar{H}_T |
|-----------|----------|-----|-----------|-------------|-------------|---------------------|-------------|-----------|-------------|
| Janvier | -20,92 | 17 | 5,22 | 11,55 | 0,45 | 0,48 | 0,77 | 0,86 | 4,49 |
| Février | -12,95 | 47 | 5,08 | 11,09 | 0,46 | 0,47 | 0,86 | 0,91 | 4,62 |
| Mars | -2,42 | 75 | 4,77 | 10,19 | 0,47 | 0,46 | 1,00 | 0,99 | 4,70 |
| Avril | 9,41 | 105 | 4,33 | 8,82 | 0,49 | 0,44 | 1,19 | 1,09 | 4,73 |
| Mai | 18,79 | 135 | 3,81 | 7,54 | 0,50 | 0,42 | 1,36 | 1,19 | 4,55 |
| Juin | 23,09 | 162 | 3,48 | 6,91 | 0,50 | 0,42 | 1,46 | 1,25 | 4,35 |
| Juillet | 21,18 | 198 | 3,51 | 7,15 | 0,49 | 0,44 | 1,41 | 1,22 | 4,27 |
| Aout | 13,45 | 228 | 4,18 | 8,21 | 0,51 | 0,42 | 1,26 | 1,14 | 4,75 |
| Septembre | 2,21 | 258 | 5,10 | 9,87 | 0,52 | 0,41 | 1,07 | 1,03 | 5,25 |
| Octobre | -9,60 | 288 | 5,68 | 10,72 | 0,530 | 0,40 | 0,91 | 0,93 | 5,29 |
| Novembre | -18,91 | 318 | 5,65 | 11,39 | 0,50 | 0,43 | 0,79 | 0,87 | 4,89 |
| Décembre | -23,05 | 344 | 5,42 | 11,56 | 0,48 | 0,46 | 1,24 | 1,11 | 6,02 |

Nous avons ensuite représenté dans un histogramme les variations des résultats obtenus :

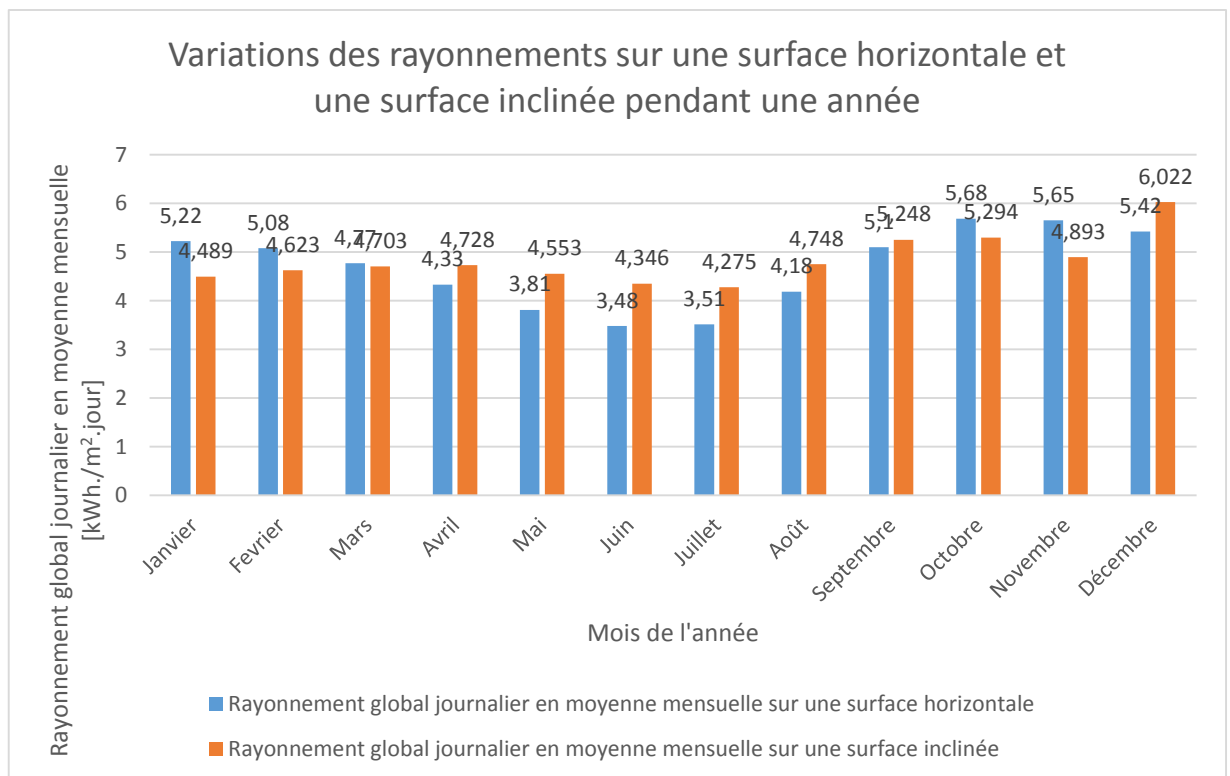


Figure 32 : Comparaison de valeurs obtenues

Nous pouvons interpréter les résultats obtenus pour l'inclinaison et l'orientation choisies comme suit :

- Le mois de Janvier est le mois de la période estivale avec le plus petit pourcentage de captage.
- Le mois de Décembre est le mois de la période estivale avec le plus grand pourcentage de captage. C'est donc la période des récoltes où on pourra exploiter pleinement les capacités du séchoir pour le séchage.
- Le mois de Septembre est le mois de la période hivernale avec le plus petit pourcentage de captage.
- Le mois de Juin est le mois de la période hivernale avec le plus grand pourcentage de captage.

Pour acquérir plus de données, nous avons tout de même tenu à calculer les valeurs du rayonnement global journalier pour un angle égal à la latitude avec une variation de $+15^\circ$ et nous avons établi l'histogramme des valeurs obtenus pour les comparer avec les résultats obtenus précédemment :

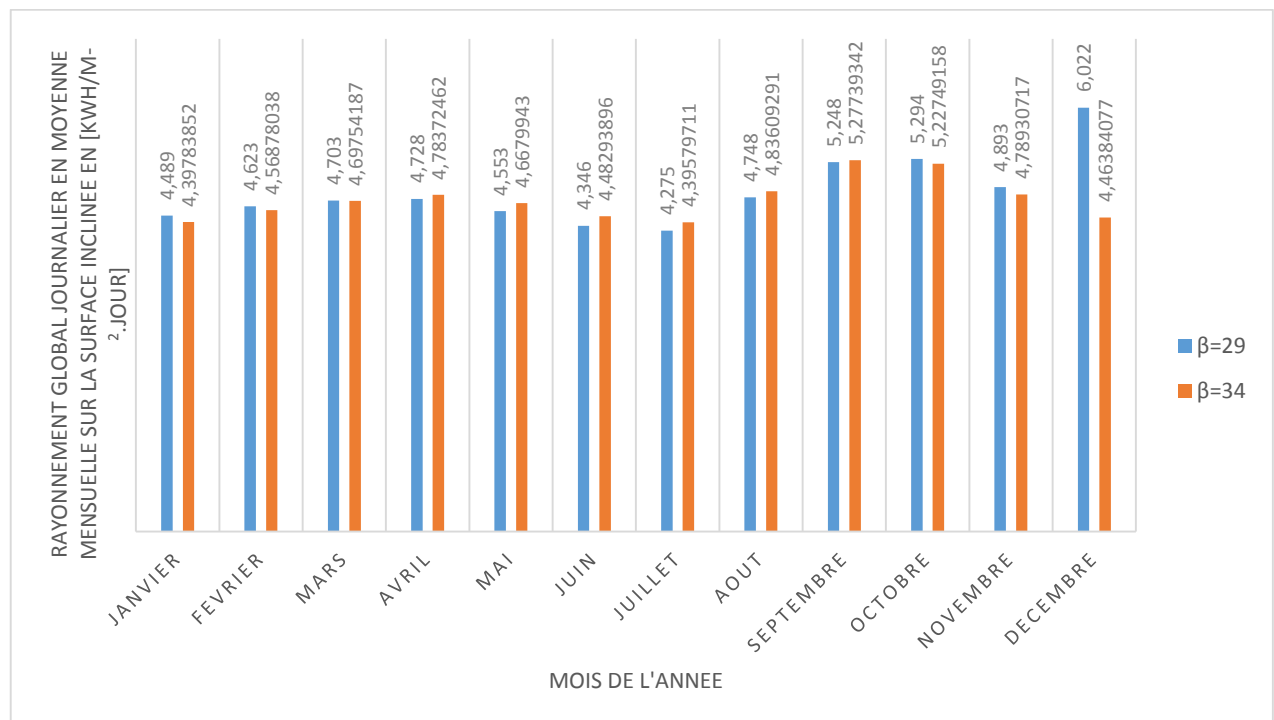


Figure 33 : Comparaison des variations d'angle

A partir de cet histogramme, nous pouvons donc affirmer qu'une inclinaison égale à la latitude avec une variation de $+10^\circ$ orientée vers le Nord est l'angle et l'orientation optimale pour notre application.

Nous avons aussi établi avec EXCEL la valeur globale horaire en moyenne mensuelle des rayonnements pendant le mois de Février, Mars et Avril. Ensuite nous les avons présentés sous formes de tableaux. Nous avons finalement construit un graphe pour pouvoir interpréter les résultats. Le processus vertical suivant donne toutes les étapes que nous avons suivies pour obtenir ces valeurs :

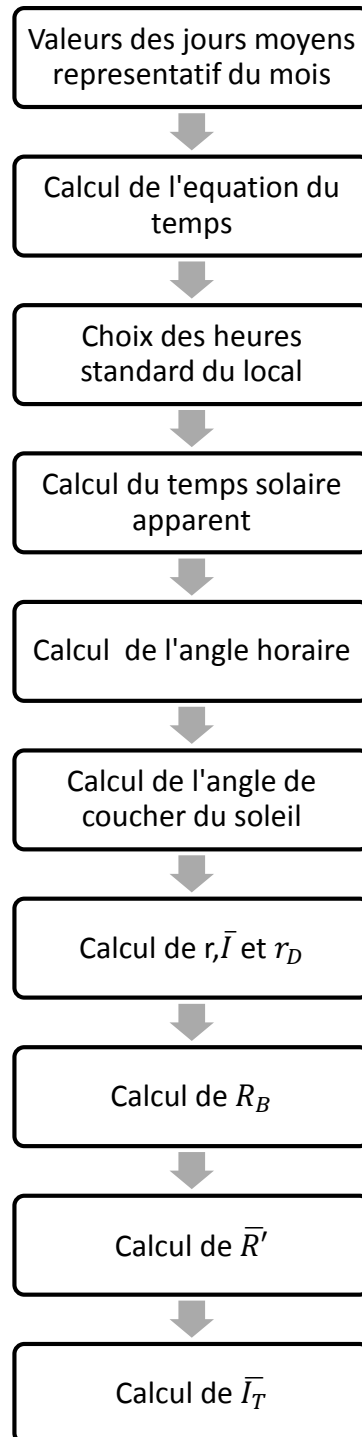


Figure 34: Etapes pour le calcul du rayonnement global horaire sur une surface inclinée

Tableau 16 : Rayonnement global horaire en moyenne mensuelle du mois de février

| TSL | TSA | ω | R | \bar{I} [W/m ²] | r_D | R_B | ρ_g | \bar{R}' | \bar{I}_T [W/m ²] |
|--------|-------|----------|-------|-------------------------------|-------|-------|----------|------------|---------------------------------|
| 6h:00 | 5,92 | -91,12 | 0,005 | 25,40 | 0,01 | -1,09 | 0,20 | 0,26 | 6,57 |
| 7h:00 | 6,92 | -76,12 | 0,03 | 147,32 | 0,04 | 0,65 | 0,20 | 0,83 | 122,90 |
| 8h:00 | 7,92 | -61,12 | 0,06 | 289,56 | 0,06 | 0,82 | 0,20 | 0,89 | 259,02 |
| 9h:00 | 8,92 | -46,12 | 0,09 | 436,88 | 0,09 | 0,88 | 0,20 | 0,92 | 401,79 |
| 10h:00 | 9,92 | -31,12 | 0,11 | 568,96 | 0,11 | 0,91 | 0,20 | 0,93 | 531,04 |
| 11h:00 | 10,92 | -16,12 | 0,13 | 655,32 | 0,12 | 0,92 | 0,20 | 0,94 | 616,07 |
| 12h:00 | 11,92 | -1,12 | 0,14 | 690,88 | 0,12 | 0,92 | 0,20 | 0,94 | 650,97 |
| 13h:00 | 12,92 | 13,87 | 0,13 | 665,48 | 0,12 | 0,92 | 0,20 | 0,94 | 625,96 |
| 14h:00 | 13,92 | 28,87 | 0,11 | 584,20 | 0,11 | 0,91 | 0,20 | 0,93 | 545,83 |
| 15h:00 | 14,92 | 43,87 | 0,09 | 462,28 | 0,09 | 0,88 | 0,20 | 0,92 | 426,27 |
| 16h:00 | 15,92 | 58,87 | 0,06 | 314,96 | 0,07 | 0,83 | 0,20 | 0,90 | 283,20 |
| 17h:00 | 16,92 | 73,87 | 0,03 | 167,64 | 0,04 | 0,69 | 0,20 | 0,85 | 142,01 |
| 18h:00 | 17,92 | 88,87 | 0,01 | 40,64 | 0,01 | -0,23 | 0,20 | 0,60 | 24,61 |

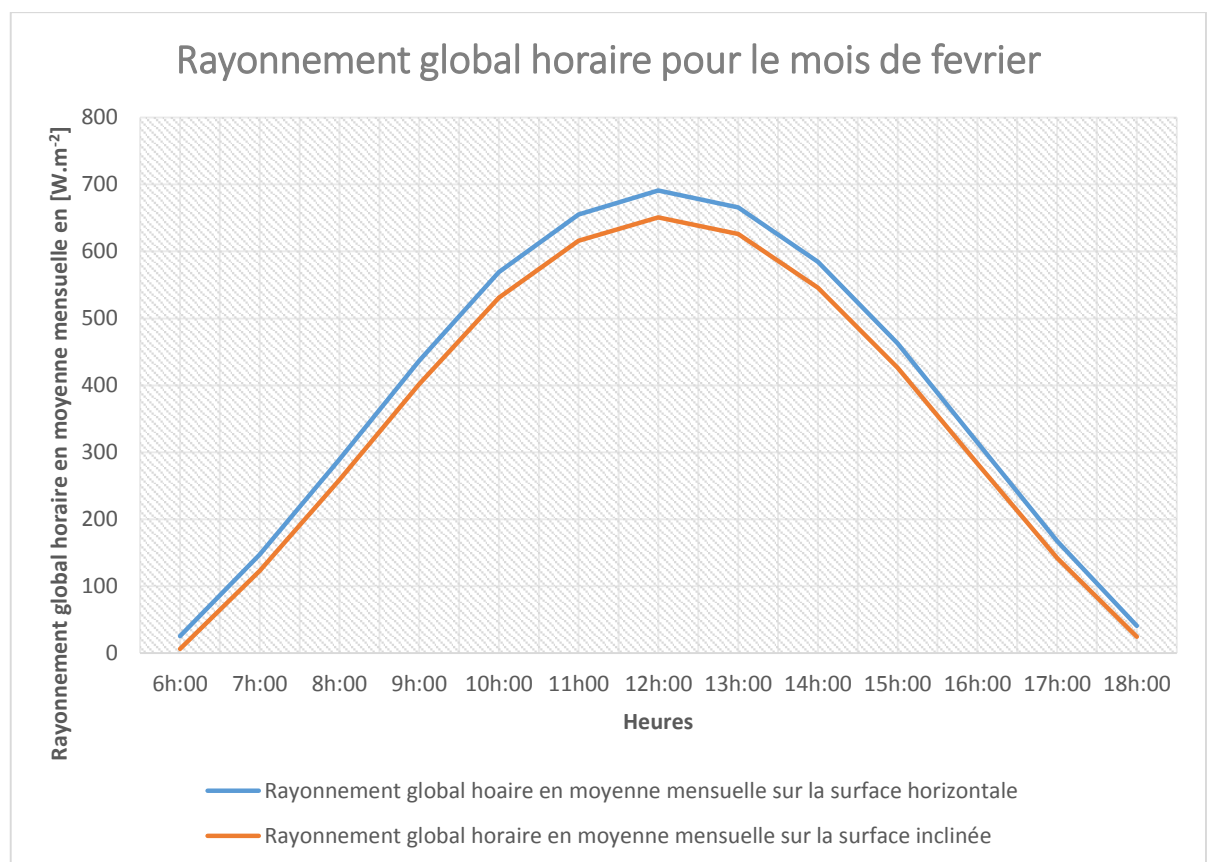


Figure 35 : Comparaison des valeurs du rayonnement global horaire pour le mois de février

Tableau 17 : Rayonnement global horaire en moyenne mensuelle pour le mois de mars

| TSL | TSA | ω | r | \bar{I} [W/m ²] | r_D | R_B | ρ_g | \bar{R}' | \bar{I}_T [W/m ²] |
|--------|-------|----------|-------|-------------------------------|-------|-------|----------|------------|---------------------------------|
| 6h:00 | 6,01 | -89,83 | 0,001 | 6,82 | 0,002 | -0,28 | 0,20 | 0,59 | 4,00 |
| 7h:00 | 7,01 | -74,83 | 0,03 | 130,17 | 0,03 | 0,96 | 0,20 | 0,96 | 124,65 |
| 8h:00 | 8,01 | -59,83 | 0,06 | 275,80 | 0,07 | 0,99 | 0,20 | 0,98 | 269,49 |
| 9h:00 | 9,01 | -44,83 | 0,09 | 424,86 | 0,09 | 0,91 | 0,20 | 0,93 | 397,36 |
| 10h:00 | 10,01 | -29,83 | 0,12 | 553,18 | 0,11 | 1,01 | 0,20 | 0,99 | 548,59 |
| 11h:00 | 11,01 | -14,83 | 0,13 | 640,56 | 0,12 | 1,02 | 0,20 | 0,99 | 637,04 |
| 12h:00 | 12,01 | 0,16 | 0,14 | 670,76 | 0,13 | 1,02 | 0,20 | 0,99 | 667,36 |
| 13h:00 | 13,01 | 15,16 | 0,13 | 639,27 | 0,12 | 1,02 | 0,20 | 0,99 | 635,73 |
| 14h:00 | 14,01 | 30,16 | 0,11 | 550,22 | 0,11 | 1,01 | 0,20 | 0,99 | 545,60 |
| 15h:00 | 15,01 | 45,16 | 0,09 | 421,62 | 0,09 | 1,01 | 0,20 | 0,99 | 415,83 |
| 16h:00 | 16,01 | 60,16 | 0,06 | 272,46 | 0,06 | 0,99 | 0,20 | 0,98 | 266,15 |
| 17h:00 | 17,01 | 75,16 | 0,03 | 127,45 | 0,03 | 0,95 | 0,20 | 0,96 | 121,95 |
| 18h:00 | 18,01 | 90,16 | 0,001 | 4,44 | 0,001 | -0,95 | 0,20 | 0,38 | 1,70 |

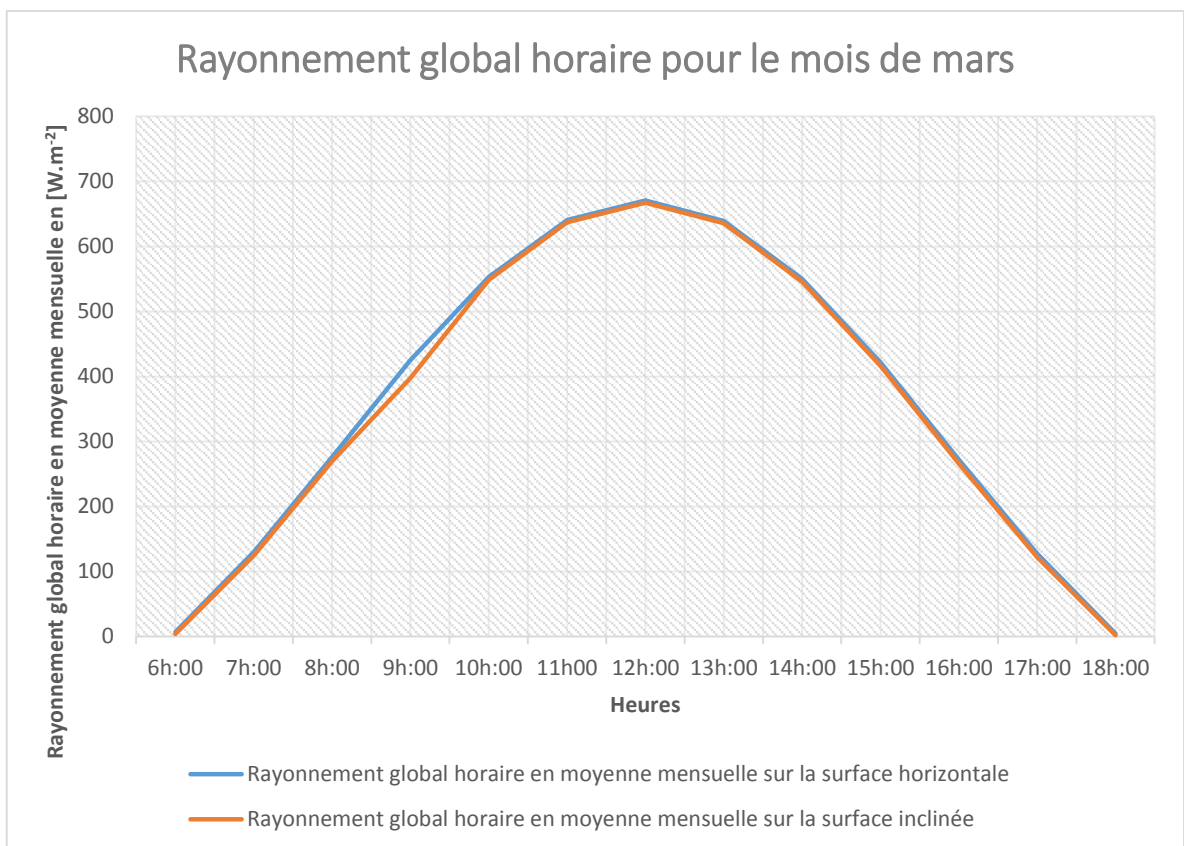


Figure 36: Comparaison des valeurs du rayonnement global horaire pour le mois de mars

Tableau 18 : Rayonnement global horaire en moyenne mensuelle pour le mois d'avril

| TSL | TSA | ω | r | \bar{I} [W/m ²] | r_D | R_B | ρ_g | \bar{R}' | \bar{I}_T [W/m ²] |
|--------|-------|----------|------|-------------------------------|-------|-------|----------|------------|---------------------------------|
| 6h:00 | 6,16 | -87,56 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,20 | 0 | 0 |
| 7h:00 | 7,16 | -72,56 | 0,03 | 116,04 | 0,03 | 1,41 | 0,20 | 1,15 | 133,71 |
| 8h:00 | 8,16 | -57,56 | 0,06 | 260,67 | 0,07 | 1,23 | 0,20 | 1,09 | 285,18 |
| 9h:00 | 9,16 | -42,56 | 0,09 | 407,02 | 0,10 | 1,17 | 0,20 | 1,08 | 438,13 |
| 10h:00 | 10,16 | -27,56 | 0,11 | 497,08 | 0,12 | 1,15 | 0,20 | 1,06 | 529,21 |
| 11h:00 | 11,16 | -12,56 | 0,14 | 612,26 | 0,13 | 1,14 | 0,20 | 1,07 | 653,90 |
| 12h:00 | 12,16 | 2,44 | 0,15 | 633,05 | 0,13 | 1,13 | 0,20 | 1,07 | 675,64 |
| 13h:00 | 13,16 | 17,44 | 0,14 | 591,48 | 0,13 | 1,14 | 0,20 | 1,07 | 632,05 |
| 14h:00 | 14,16 | 32,44 | 0,11 | 494,92 | 0,11 | 1,15 | 0,20 | 1,07 | 530,76 |
| 15h:00 | 15,16 | 47,44 | 0,08 | 360,69 | 0,09 | 1,18 | 0,20 | 1,081 | 389,99 |
| 16h:00 | 16,16 | 62,44 | 0,05 | 212,17 | 0,06 | 1,26 | 0,20 | 1,10 | 234,36 |
| 17h:00 | 17,16 | 77,44 | 0,02 | 73,18 | 0,02 | 1,60 | 0,20 | 1,22 | 89,00 |
| 18h:00 | 18,16 | 92,44 | 0 | 0 | 0 | 0,13 | 0,20 | 0 | 0 |

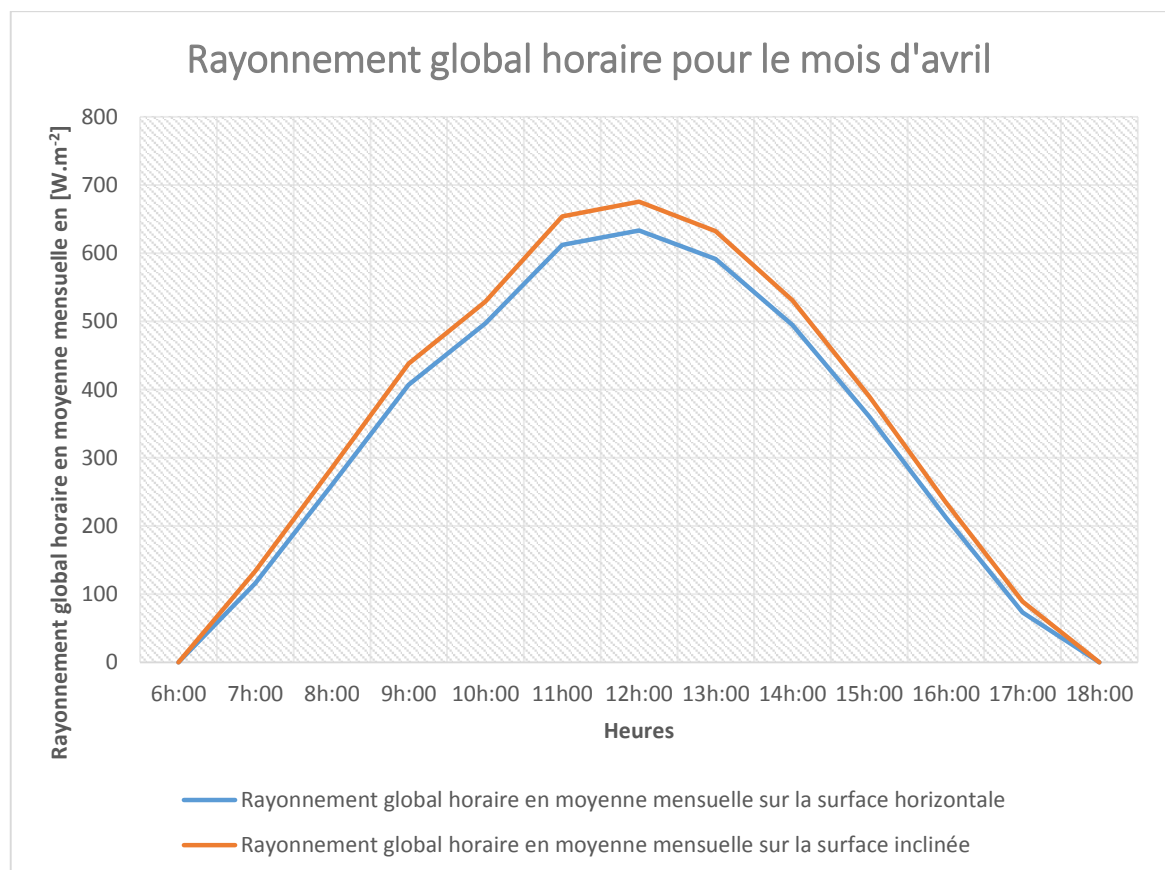


Figure 37 : Comparaison des valeurs du rayonnement global horaire pour le mois d'avril

Interprétations des résultats obtenus:

- Les courbes et les résultats obtenus précédemment, montrent que pour le mois de février, les valeurs de rayonnement global horaire (sur une surface horizontale et inclinée) reçues sont légèrement plus grandes durant l'après-midi par rapport à celles reçues pendant le matin. Pour les mois de mars et d'avril par contre, c'est l'inverse qui se produit
- Pour le mois d'Avril, les valeurs de rayonnement à l'heure du lever et du coucher du soleil sont nulles ce qui n'est pas le cas pour les mois de février et mars. Cela pourrait s'expliquer par le fait que la saison hivernale débute durant cette période.

II.2 - Expérimentations

II.2.1 - Choix des fruits à sécher

Les produits que nous avons séchés pour l'expérimentation du séchoir sont l'ananas et la pomme golden du fait de leur disponibilité durant la période considérée, mais aussi parce qu'ils sont parmi les fruits les plus récoltés et les plus commercialisés sur le plan national. [26]

II.2.2 - Description de l'expérience

a. - Expérimentation

L'expérimentation consiste à disposer les fruits après les prétraitements adéquats sur les claies et les sécher. Les fruits sont tranchés en rondelles avec une épaisseur inférieure ou égale à 5 mm, puis pesés et finalement installés sur les claies. Nous avons ensuite mesuré la température à l'intérieur de l'armoire de séchage et la durée du séchage. Après le séchage, une nouvelle pesée est effectuée pour connaître le taux d'humidité journalier perdu durant le séchage.

Pour l'ananas, les prétraitements physiques suivant un ordre bien précis sont le lavage, l'épluchage et le tranchage. Pour améliorer l'aspect visuel et par soucis de présentation, le rachis au centre de ce fruit est enlevé avec un vide pomme après tranchage. Pour améliorer le goût du produit fini, il faut tremper l'ananas dans une solution de sucre ou le saupoudrer de sucre avant de le sécher. Le sucre permet de conserver la couleur du fruit et masque le goût acide. Le sucrage permet aussi de diminuer partiellement l'activité de l'eau.



Photo 2 : Ananas après prétraitements

Pour la pomme golden, nous avons aussi suivi un ordre précis d'opération avant le séchage. Pour le lavage, nous avons choisi le Sur'eau comme agent détersif et nous avons trempé les pommes dans une solution d'eau et de Sur'eau (une capsule de Sur'eau pour 1,5 litres d'eau) pendant trente minutes suivi d'un rinçage abondant avec de l'eau froide. Nous avons ensuite effectué un blanchiment en les trempant une minute dans de l'eau bouillante suivi d'un rinçage rapide à l'eau froide. Après, les fruits sont pelés, puis épépinés avec un vide pomme et enfin tranchés en rondelles. Comme traitement chimique, nous avons trempé les pommes tranchées dans une solution de jus de citron (un litre d'eau pour un citron de taille moyenne) pendant environ 30 minutes. Le jus de citron permet de préserver les vitamines car les fruits à peau comme la pomme noircissent au contact de l'air par oxydation.



Photo 3: Pommes avant séchage

b. - Appareils de mesures

✚ Balance :

Nous avons utilisé une petite balance électronique domestique de cuisine pour mesurer la teneur en eau du produit avant et après séchage. Elle est équipée d'un capteur pourvu d'une jauge de contrainte de précision. Le principe de fonctionnement de ce genre de balance repose sur les variations des caractéristiques électriques de certains matériaux lorsqu'ils sont soumis à des compressions mécaniques. Ces variations électriques sont mesurées et envoyées à un cadran qui permet de donner une indication sur la masse de la charge inconnue qui a comprimé le matériau. Sa capacité est de 7000g



Photo 4 : Balance utilisée lors du pesage

✚ Thermomètre :

Nous avons utilisé deux thermomètres à alcool : un thermomètre ayant une capacité de -15°C à 60°C pour le premier et un autre ayant une capacité de -53°C à 52°C .

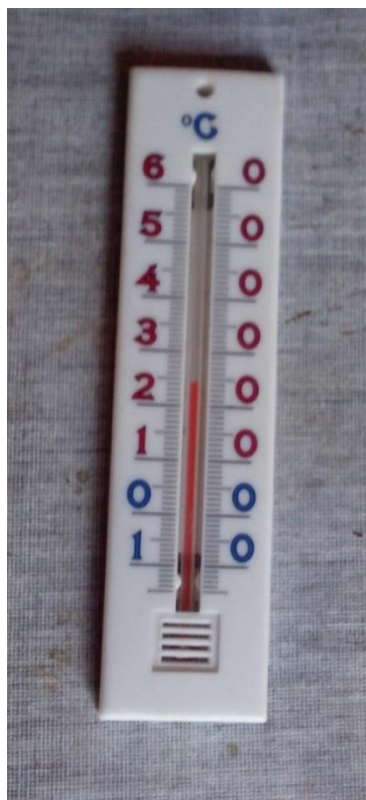


Photo 5 : Premier thermomètre



Photo 6 : Deuxième thermomètre

Ils ont été installés à proximité de la sortie d'air de l'armoire de séchage pour savoir la température de l'air sortant du séchoir et pour mieux contrôler le processus car les fruits doivent sécher à une température minimum de 30°C et ne pas dépasser 55°C durant le séchage.



Photo 7 : Installation des thermomètres.

c. - Problèmes rencontrés lors de l'expérimentation

Les problèmes les plus importants concernent surtout les intempéries (pluies et vents) durant les périodes des expérimentations car nous les avons effectuées pendant une période cyclonique amenant à une interruption momentanée et une reprise après plusieurs jours, ce qui influe énormément sur les résultats.

II.3 - Résultats expérimentaux

Nous avons noté les résultats des expériences dans un cahier de charges où sont répertoriés l'état du ciel, la période de la journée, la date, la pesée et la température de sortie d'air de l'enceinte.

Tableau 19 : Résultats de séchage de l'ananas

| Date | Temps de séchage (heure) | Température moyenne de sortie d'air (°C) | Masse au début de séchage (kg) | Masse en fin de séchage (kg) | Pourcentage d'eau perdu |
|------------|--------------------------|--|--------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| 01/03/2017 | 07H30 | 37,22 | 0,53 | 0,21 | 60,00% |
| 02/03/2017 | 09H00 | 37,36 | 0,21 | 0,11 | 47,20% |
| 03/03/2017 | 09H00 | 38,36 | 0,11 | 0,09 | 23,89% |
| | 25H30(total) | 37,65 | | | 83,93%(total) |
| 04/03/2017 | 07H30 | 37,00 | 0,58 | 0,26 | 54,87% |
| 05/03/2017 | 09H00 | 37,00 | 0,26 | 0,14 | 46,21% |
| 06/03/2017 | 08H00 | 36,11 | 0,14 | 0,12 | 14,79% |
| 12/03/2017 | 08H00 | 35,11 | 0,12 | 0,12 | 4,13% |
| | 39H00(total) | 36,30 | | | 80,34%(total) |
| 04/04/2017 | 07H00 | 34,22 | 0,72 | 0,41 | 43,45% |
| 05/04/2017 | 07H00 | 33,33 | 0,41 | 0,25 | 39,27% |
| 06/04/2017 | 05H00 | 35,57 | 0,25 | 0,18 | 28,51% |
| 07/04/2017 | 08H00 | 36,33 | 0,18 | 0,15 | 16,85% |
| | 27H00(total) | 34,86 | | | 79,59%(total) |

Tableau 20 : Résultats de séchage de la pomme

| Date | Temps de séchage (heure) | Température moyenne de sortie d'air (°C) | Masse au début de séchage (kg) | Masse en fin de séchage (kg) | Pourcentage d'eau perdue |
|------------|--------------------------|--|--------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 27/02/2017 | 05H30 | 37,43 | 0,56 | 0,32 | 43,54% |
| 28/02/2017 | 09H00 | 37,20 | 0,32 | 0,11 | 65,83% |
| | 14H30(total) | 37,31 | | | 80,71(total) |
| 15/03/2017 | 06H00 | 38,62 | 0,50 | 0,19 | 61,40% |
| 16/03/2017 | 05H45 | 38,00 | 0,19 | 0,10 | 46,11% |
| 17/03/2017 | 07H00 | 33,62 | 0,10 | 0,10 | 4,81% |
| | 18H45(total) | 36,75 | | | 80,34%(total) |
| 30/03/2017 | 06H30 | 33,22 | 0,53 | 0,30 | 43,26% |
| 01/03/2017 | 05H00 | 33,86 | 0,30 | 0,17 | 43,81% |
| 02/04/2017 | 05H00 | 34,57 | 0,17 | 0,11 | 33,33% |
| 03/04/2017 | 08H30 | 34,50 | 0,11 | 0,10 | 10,71% |
| | 25H00(total) | 34,04 | | | 81,02%(total) |

Nous allons utiliser ces résultats pour deux périodes choisies pour chaque fruit. Pour l'ananas on prendra la période du 1 Mars au 3 Mars et pour la pomme la période du 27 Février au 28 Février.

II.3.1 - Cas de l'ananas

Voici les données météorologiques relatives aux journées du 1 au 3 Mars 2017 lors du séchage de l'ananas.

Tableau 21 : Données météorologiques. Source auteur

| Date | Moment de la journée | Température de l'air ambiant | Etat du ciel |
|-------------|----------------------|------------------------------|--------------|
| 1 Mars 2017 | Matin | 17-30 °C | Clair |
| | Après-midi | | Clair |
| 2 Mars 2017 | Matin | 17-30 °C | Nuageux |
| | Après-midi | | Peu nuageux |
| 3 Mars 2017 | Matin | 16-29 °C | Clair |
| | Après- midi | | Clair |

Nous avons aussi dressé dans le graphe ci-dessous la variation de température dans l'enceinte de séchage.

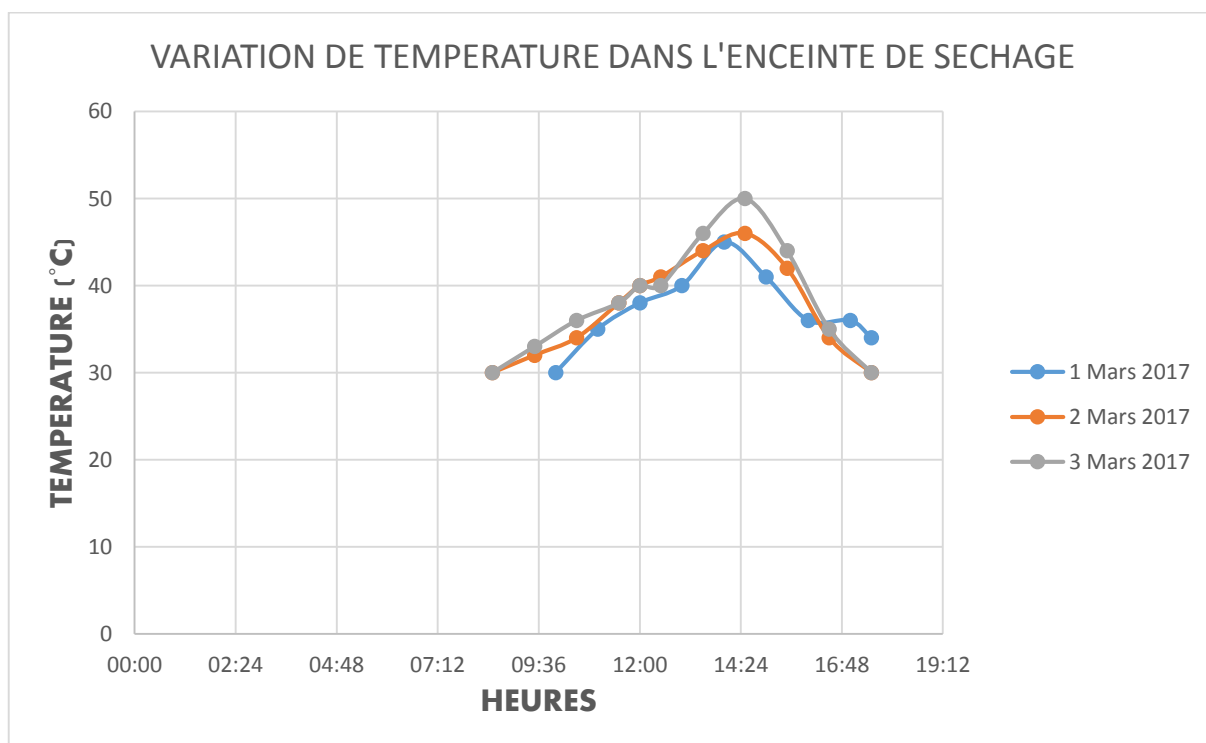


Figure 38 : Variation de température dans l'enceinte

Interprétations des résultats obtenus :

- La température augmente progressivement le matin au début de séchage jusqu'à 12 heures 00 minutes (heures standard du local). Durant l'après-midi, elle continue d'augmenter et la température maximale atteinte dans l'enceinte se situe entre 13 heures et 14 heures. Après cela la température diminue progressivement.
- La température maximale atteinte est 50°C le 3 Mars 2017 à 14 heures 30 minutes. La température maximale de l'air ambiant pour cette journée est de 29 °C et la température minimale est de 16 °C. Elles sont légèrement inférieures de 1 °C par rapport aux deux autres journées. Cette température obtenue pourrait s'expliquer par le fait que durant cette journée, le ciel a été toujours clair et dégagé.
- La température moyenne dans l'enceinte de séchage est de 37,65 °C pendant les trois jours de séchage. Ce serait donc une température appropriée pour le séchage de l'ananas pendant trois jours consécutifs car dans le tableau 19, les autres températures sont en dessous de cette valeur et il faut 4 jours pour sécher l'ananas.

II.3.2 - Cas de la pomme

Voici les données météorologiques relatives aux journées du 27 au 28 Février 2017 lors du séchage de la pomme.

Tableau 22 : Données météorologiques. Source auteur

| Date | Moment de la journée | Température de l'air ambiant | Etat du ciel |
|-----------------|----------------------|------------------------------|--------------------|
| 27 Février 2017 | Matin | 18-27 °C | Clair |
| | Après-midi | | Clair puis nuageux |
| 28 Février 2017 | Matin | 19-29 °C | Nuageux |
| | Après-midi | | Clair |

Comme pour l'ananas, la variation de température dans l'enceinte de séchage se trouve dans la figure suivante.

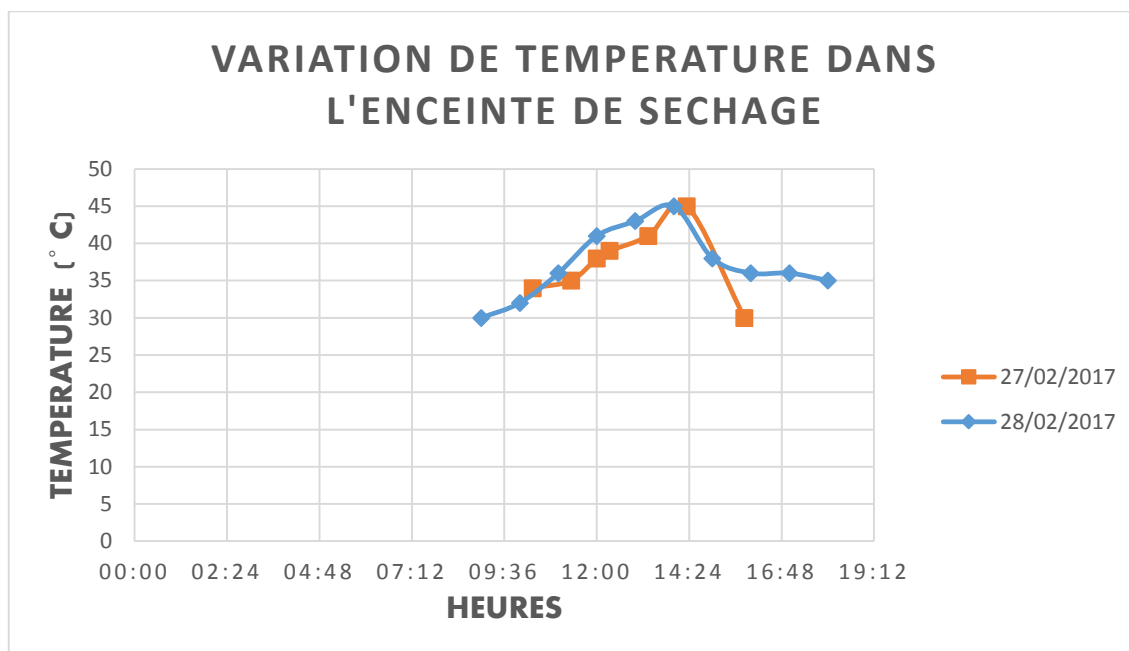


Figure 39 : Variation de température dans l'enceinte pour le séchage de la pomme

Interprétations des résultats :

- Comme pour le cas de l'ananas, la température augmente progressivement le matin au début de séchage jusqu'à 12 heures 00 minutes (heures standard du local). Durant l'après-midi, elle continue d'augmenter et la température maximale atteinte dans l'enceinte se situe entre 13 heures et 14 heures. Après cela la température diminue progressivement.
- La température maximale atteinte à l'intérieur du séchoir est de 45 °C pour les deux journées de séchage.
- Pour le 27 Février, nous avons interrompu précocement le séchage pour cause de pluie. Voilà pourquoi, la température a chuté brusquement de 45 °C à 30 °C.
- La température moyenne de séchage est de 37,31 °C. Ce serait donc une température appropriée pour le séchage de la pomme pendant deux jours consécutifs car dans le tableau 20, les autres températures sont en dessous de cette valeur et il faut 3 à 4 jours pour sécher la pomme.

II.3.3 - Interprétation globale des résultats

- Le séchoir que nous avons conçu est donc opérationnel et peut sécher les fruits dont la température de séchage se situe entre 30 et 50 °C.
- Le temps de séchage de l'ananas est supérieur à celui de la pomme. Cela pourrait s'expliquer par le fait que la teneur en eau de la pomme est inférieure à celle de l'ananas.

- Les conditions de séchage changent tout au long de la journée. Nous avons constaté que les produits en niveau inférieur sur les claies se sèchent plus rapidement par rapport à ceux en niveau supérieur. Il faut donc permuter chaque fois la place des claies pour chaque heure pour homogénéiser le processus de séchage.
- Les caractéristiques pour l'opération de séchage sont en valeurs moyennes.

II.4 - Etude économique

L'approche de la conception du système de séchage solaire doit être optimisée du double point de vue technique et économique. En effet la construction d'un système de séchage solaire n'est intéressante que si, par rapport à une installation conventionnelle, elle permet de réaliser des bénéfices.

II.4.1 - Evaluation du prix de revient du séchoir

Le tableau suivant donne une évaluation du prix de revient du capteur.

Tableau 23: Prix de revient du capteur

| Désignation | Quantité | Unité | Prix unitaire en Ariary | Prix total en Ariary |
|--|----------|----------------|-------------------------|----------------------|
| VITRAGE | | | | |
| Verre ordinaire d'épaisseur 5 mm et de dimension 0,70×0,49 | 1 | m ² | 14000 | 14000 |
| Silicone | 1 | ml | 6000 | 6000 |
| TOTAL VITRAGE | | | | 20000 |
| ISOLATION | | | | |
| Polystyrène expansé de 2 cm d'épaisseur et de dimension 1×0,70 | 1 | m ² | 10000 | 10000 |
| TOTAL ISOLATION | | | | |
| ABSORBEUR | | | | |
| Feuille de tôle plane galvanisée de 1 mm d'épaisseur et de 0,70×0,50 | 1 | m ² | 14000 | 14000 |
| Peinture noire mat | 1 | Kg | 9700 | 10000 |
| SUPPORT, CHICANES, COFFRE | | | | |
| Bois carré de 3 cm d'épaisseur et de dimension 2×0,05 | 1 | m ² | 3000 | 3000 |
| Plaque de contreplaqué de 1cm d'épaisseur et de dimension 2,44×1,22 | 1 | m ² | 60000 | 60000 |
| TOTAL CAPTEUR | | | | 117000 |

Le tableau suivant donne une évaluation du prix de revient de l'armoire de séchage.

Tableau 24 : Evaluation du prix de revient de l'armoire de séchage

| Désignation | Quantité | Unité | Prix unitaire | Prix total en Ariary |
|---|----------|----------------|---------------|----------------------|
| CHAMBRE DE SECHAGE | | | | |
| Plaque de contreplaque de 1cm d'épaisseur et de dimension 2,44×1,22 | 1 | m ² | 60000 | 60000 |
| SUPPORT | | | | |
| Bois carré de 3 cm d'épaisseur et de dimension 2×0,05 | 1 | m ² | 3000 | 3000 |
| CLAIES | | | | |
| Grillage métallique | 1 | U | 3000 | 2000 |
| TOTAL ARMOIRE DE SECHAGE | | | | 65000 |

Voici une évaluation des autres matériels supplémentaires intervenants

Tableau 25 : Matériels supplémentaires intervenants

| Désignation | Quantité | Unité | Prix unitaire en Ariary | Prix total en Ariary |
|--|----------|-------|-------------------------|----------------------|
| Colle pour bois | 1 | MI | 6000 | 6000 |
| Vis et clous | | | 7000 | 7000 |
| White Spirit | 1 | MI | 3000 | 3000 |
| TOTAL MATERIELS SUPPLEMENTAIRES | | | | 16000 |

La main d'œuvre est donnée comme suit :

Tableau 26 : Main d'œuvre et transport

| Désignation | Prix |
|---------------|---------------------|
| Main d'œuvres | 60000 Ariary |
| Transport | 7000 Ariary |
| TOTAL | 67000 Ariary |

Le prix de revient du séchoir est la somme de toutes les valeurs précédentes :

Tableau 27 : Prix de revient du séchoir

| Désignation | Prix |
|-----------------------------|----------------------|
| CAPTEUR | 117000 Ariary |
| ARMOIRE DE SECHAGE | 65000 Ariary |
| MATERIELS SUPPLEMENTAIRES | 16000 Ariary |
| MAIN D'ŒUVRES ET TRANSPORTS | 68000 Ariary |
| TOTAL | 265000 Ariary |

II.4.2 - Durée d'amortissement

Pour enlever l'eau par séchage, il faut fournir une certaine quantité d'énergie. La main d'œuvre pour la charge et décharge des produits et le suivi de l'opération est rémunérée. Ajouté à cela le prix de revient des produits frais à sécher; l'ensemble constitue les coûts de fonctionnement du séchoir. Le coût d'investissement représente le prix du séchoir complet. L'ensemble des coûts de fonctionnement et d'investissement représente le coût du séchoir. Le temps d'amortissement représente le temps nécessaire pour que l'ensemble des bénéfices annuels réalisés par le séchoir soit égal à l'investissement initial (coût du séchoir).

La pratique courante aujourd'hui veut qu'on rende compte de l'économie d'un système ou d'un procédé par son retour d'investissement pour savoir si un investissement ou un surinvestissement est amorti compte tenu des économies réalisées. Ces critères ainsi que celui du coût de possession sont des conditions d'appréciations déterminantes pour le client en plus des critères de qualité et du temps de séchage. Les conditions climatiques nous permettront d'utiliser notre prototype de séchoir pendant 5mois (150 jours) durant l'année. Le retour d'investissement est le temps nécessaire pour que la somme des bénéfices nets annuels réalisés soit égale au montant de l'investissement initial. On peut le déduire d'après la formule ci-dessous :

$$\text{Retour d'investissement} = \frac{\text{Investissement initial}}{\text{Benefice net annuel}}$$

Tableau 29 : Retour d'investissement pour le séchage de l'ananas

| | |
|--------------------------------|--|
| Coût du séchoir | 300000 Ariary |
| Capacité du séchoir | 1,50 kg |
| Dépréciation | 30000 Ariary (10% du coût du séchoir) |
| Durée de vie du séchoir | 5 ans |
| Coût de la maintenance | 7500 Ariary (2,5 à 2,65% du coût du séchoir) |
| Coût de la main d'œuvre | 150*2000 Ariary=300000 Ariary |
| Coût de l'ananas frais | 2000Ariary/kg*1,50kg/jour*150jours = 450000 Ariary |
| Coût total | 787500 Ariary |
| Revenu total | 4250 Ariary/kg*1,50kg/jour*150jours = 956250 Ariary |
| Revenu net | 956250 Ariary – 787500 Ariary = 168750 Ariary |
| Retour d'investissement | 1 an 9 mois 10 jours |

Dans notre cas, le temps de retour de l'investissement est de 2 ans 1 mois et 6 jours pour le séchage de la pomme et 1 an 9 mois 10 jours pour celui de l'ananas. Ces résultats obtenus sont convenables comparativement à la durée de vie du séchoir estimée approximativement à 5ans. Bien sûr, ce sont juste des hypothèses, mais des études plus approfondies doivent être effectuées pour pouvoir exploiter pleinement ce type de séchoir d'un point de vue financier.

CONCLUSION

Les perspectives d'améliorations des méthodes de préservations des denrées alimentaires comme les fruits sont nécessaires pour limiter les pertes dues aux lacunes en matière de structure routière et problèmes de transport. Ces perspectives doivent être exécutées après des analyses préalables des ressources d'énergie exploitables et disponibles à mettre en œuvre. L'utilisation des énergies renouvelables comme l'énergie solaire est une alternative raisonnable. En effet, l'énergie solaire est encore très peu exploitée et les applications qui en résultent peuvent être bénéfiques pour les pays en voie de développement comme le nôtre qui souffrent d'un problème énergétique stable et durable. Cependant, l'idée véhiculée concernant la gratuité de cette énergie n'est que partiellement vraie. Les installations transformant et exploitant cette énergie nécessitent des investissements de départ plus lourd par rapport aux sources d'énergies conventionnelles et une maintenance des équipements. Des études approfondies doivent donc être faites pour évaluer l'utilisation satisfaisante d'une application solaire.

Le travail que nous avons effectué nous a permis en premier lieu d'avoir une meilleure approche technique à partir des différentes bibliographies des modèles d'estimations du gisement solaire dans un lieu considéré, des différents transferts thermiques et des généralités sur le séchage. Ensuite, nous avons conçu un séchoir expérimental à partir des connaissances sur les matériaux. Après, nous avons expérimenté le séchoir dans les conditions réelles. Enfin, nous avons présenté les résultats et leurs interprétations ainsi que des évaluations financières.

Le séchoir expérimental que nous avons conçu est un séchoir solaire indirect de type passif opérationnel capable de sécher deux types de fruits qui sont la pomme et l'ananas. Le séchoir présente l'avantage d'améliorer la qualité des produits finis. L'efficacité et le temps de séchage varient relativement en fonction de la position du soleil dans le ciel, des nuages et de la circulation de l'air dans le séchoir. Le séchoir est facilement maniable et nécessite juste un lieu d'entreposage facile d'accès.

Les études que nous avons effectuées sur le séchage solaire sont encore en cours de développement. Le rendement et les capacités techniques du séchoir peuvent encore être améliorés. Des expérimentations dans des conditions différentes et une utilisation d'une source d'énergie auxiliaire (biomasse, électrique....) permettraient de spécifier de nouveaux paramètres pour l'amélioration du séchoir.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]- Werner Weiss, Josef Buchinger, Solar Drying, AEE INTEC, 110p.
- [2]- Sachin V. Jangam, Chung Lim Law an, Drying of Foods, Vegetables and Fruits Volume 1, 2010,232 p.
- [3]- Boussalia Amar, Contribution à l'étude de séchage solaire de produits agricole locaux, Mémoire de Magister en Génie Climatique, Université Mentouri de Constantine, 2010,127p
- [4]- Kalogirou Soteris, Solar energy engineering: processes and systems first edition, Elsevier Inc., 2009, 760p.
- [5]- RANDRIANARISOA Solomalala Herizo, Conception d'un logiciel de dimensionnement des installations photovoltaïque et éolienne de la société MAJINCO - cas de Madagascar, Génie Industriel ESPA, 2011,78p.
- [6]- C. Julian Chen, Physics of Solar Energy, John Wiley & Sons, Inc., 2011,373 p.
- [7]- Saadi SOUAD, Effets des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plans, Mémoire de Magistère en physique, Université Mentouri de Constantine, 2010,130 p.
- [8]- Daryl R. Myers, Practical Modelling for Renewable energy applications, CRC Press Taylor & Francis Group, LLC,2013,199 p.
- [9]- Zeghib Ilhem, Etude et Réalisation d'un Concentrateur Solaire parabolique, Mémoire de Magistère en physique, Université Mentouri de Constantine, 2005,105 p.
- [10]- RAZAFIMAMONJY Radoniaina Livaso, Modélisation Informatique d'un séchoir serre direct, Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur en Genie Industriel, ESPA, Mars 2004,95 p.
- [11]- Michel Daguenet, Les séchoirs solaires : Théories et pratiques, UNESCO, 1985, 566 p.
- [12]- RASOANAIVO Jean Luc, Contribution à l'étude, la conception et la réalisation d'un séchoir solaire polyvalent : Application à la valorisation des produits agricoles agroalimentaires, Mémoire de Doctorat en Génie Chimique, ESPA, 2010,195p.
- [13]- John A. Duffie, William A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes Fourth Edition, John Wiley & Sons Inc., 2013,910 p.

- [14] RANARIJAONA Jean Désiré, Thermodynamique, cours tronc commun, ESPA
- [15] YVES JANNOT, Transfert thermiques, Cours, 2012,161 p.
- [16]- A S. Mujumdar, Drying: Principles and Practice, International Workshop on drying of food and Biomaterials, Bangkok, June 2011, 64 p.
- [17]- Emilian Koller, Aide-mémoire Génie chimique troisième édition Dunod, Paris, 2001, 2005, 2009,628 p.
- [18]- Mohammad Shafiur Rahman, Handbook of food preservation 2nd edition, CRC Press Taylor & Francis Group, LLC,2007.1068p .
- [19]- Ching Lik Hii, Sachin Vinayak Jangam, Sze Pheng Ongand Arun Sada, Solar Drying: Fundamentals, Applications and Innovations, 2012,176 p.
- [20]- Yves JANNOT, Thermique solaire, Cours, Mars 2011,81p.
- [21]- ABABSA Dalila, Optimisation du rendement d'un capteur solaire par minimisation des pertes convectives, Mémoire de Magistère en Physique énergétique, Université EL-HADJ LAKHDAR-BATNA, 2010,122 p.
- [22]- C.V.Papade and M.A.Boda, Design & Development of Indirect Type Solar Dryer with Energy Storing Material, Mechanical Engineering Department, International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering Volume 1 Issue 12 , Solapur University,2014,pages 109-114.
- [23]- RANARIVELO Michel, Sélection des matériaux, Cours cinquième année SIM, ESPA, 2014-2015.
- [24]- RAHELIARILALAO Bienvenue, Mécanique des fluides, Cours deuxième année, ESPA.
- [25]- Manuel RETScreen
- [26]- Global Horticultural Initiative video conference on Post-Harvest and Transport Technologies Reducing Losses and Improving Quality in Fruits and Vegetables in Eastern and Southern Africa, Article, 2010.
- [27]- MAEP UPDR-VALY Agri développement, Filière Fruits et Légumes, Fiche, 2004,16 p.

ANNEXES

ANNEXE I : TABLE DES VALEURS DE $F_{0-\lambda T}$

Tableau 30 : Table des valeurs de $F_{0-\lambda T}$ en fonction de λT . Sources [4][11]

| λT (en $\mu\text{m.K}$) | $F_{0-\lambda T}$ | λT (en $\mu\text{m.K}$) | $F_{0-\lambda T}$ |
|-----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|-------------------|
| 555,6 | $1,70 \cdot 10^{-8}$ | 5666,7 | 0,70754 |
| 666,7 | $7,56 \cdot 10^{-7}$ | 5777,8 | 0,71806 |
| 777,8 | $1,06 \cdot 10^{-5}$ | 5888,9 | 0,72813 |
| 888,9 | $7,38 \cdot 10^{-5}$ | 6000,0 | 0,73777 |
| 1000,0 | $3,21 \cdot 10^{-4}$ | 6111,1 | 0,74700 |
| 1111,1 | 0,00101 | 6222,2 | 0,75583 |
| 1222,2 | 0,00252 | 6333,3 | 0,76429 |
| 1333,3 | 0,00531 | 6444,4 | 0,77238 |
| 1444,4 | 0,00983 | 6555,6 | 0,78014 |
| 1555,6 | 0,01643 | 6666,7 | 0,78757 |
| 1666,7 | 0,02537 | 6777,8 | 0,79469 |
| 1777,8 | 0,03677 | 6888,9 | 0,80152 |
| 1888,9 | 0,05059 | 7000,0 | 0,80806 |
| 2000,0 | 0,06672 | 7111,1 | 0,81433 |
| 2111,1 | 0,08496 | 7222,2 | 0,82035 |
| 2222,2 | 0,10503 | 7333,3 | 0,82612 |
| 2333,3 | 0,12665 | 7444,4 | 0,83166 |
| 2444,4 | 0,14953 | 7555,6 | 0,83698 |
| 2555,5 | 0,17337 | 7666,7 | 0,84209 |
| 2666,7 | 0,19789 | 7777,8 | 0,84699 |
| 2777,8 | 0,22285 | 7888,9 | 0,85171 |
| 2888,9 | 0,24803 | 8000,0 | 0,85624 |
| 3000,0 | 0,27322 | 8111,1 | 0,86059 |
| 3111,1 | 0,29825 | 8222,2 | 0,86477 |
| 3222,2 | 0,32300 | 8333,3 | 0,86880 |
| 3333,3 | 0,34734 | 8888,9 | 0,88677 |
| 3444,4 | 0,37118 | 9444,4 | 0,90168 |
| 3555,6 | 0,39445 | 10000,0 | 0,91414 |
| 3666,7 | 0,41708 | 11111,1 | 0,93349 |
| 3777,8 | 0,43905 | 12222,2 | 0,94751 |
| 3888,9 | 0,46031 | 13333,3 | 0,95788 |
| 4000,0 | 0,48085 | 14444,4 | 0,96572 |
| 4111,1 | 0,50066 | 15000,0 | 0,96892 |
| 4222,2 | 0,51974 | 16111,1 | 0,97423 |
| 4333,3 | 0,53809 | 22222,2 | 0,98915 |
| 4444,4 | 0,55573 | 33333,3 | 0,99649 |
| 4555,6 | 0,57267 | 44444,4 | 0,99845 |
| 4666,7 | 0,58891 | 500000,0 | 0,9989 |
| 4777,8 | 0,60449 | | |
| 4888,9 | 0,61941 | | |
| 5000,0 | 0,63371 | | |
| 5111,1 | 0,64740 | | |
| 5222,2 | 0,66051 | | |
| 5333,3 | 0,67305 | | |
| 5444,4 | 0,68506 | | |
| 5555,5 | 0,69665 | | |

ANNEXES II : COURBES CARACTERISTIQUES DE SECHAGE [19]

La figure suivante nous montre une courbe de la teneur en eau en fonction du temps t obtenu expérimentalement lors du séchage d'un solide.

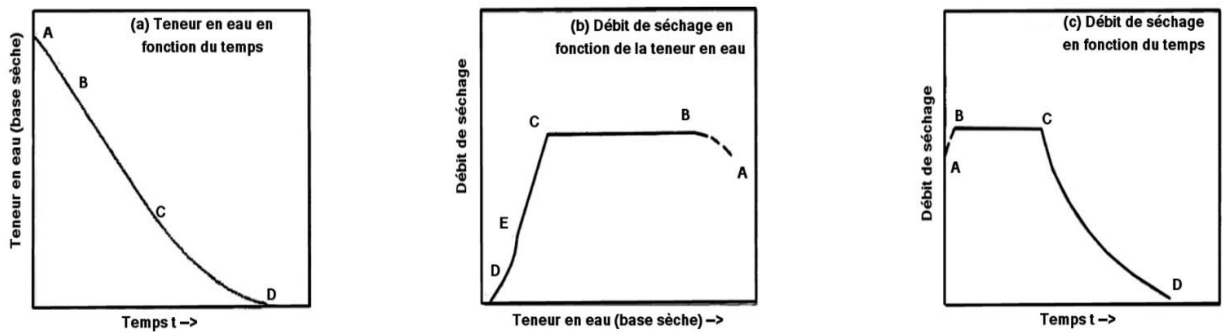


Figure 41 : Courbes de période de séchage. Source [19]

La courbe présente un cas typique du séchage, quand, au début, un solide mouillé est dépourvu de son humidité par évaporation sur la surface saturée du solide suivie d'une période d'évaporation sur la surface saturée du solide puis d'une période d'évaporation sur la surface saturée de l'aire du solide qui se rétrécit progressivement et enfin de l'évaporation à l'intérieur du solide. (a) montre que le débit de séchage varie en fonction du temps ou de la teneur en eau. Ces courbes de débits montrent bien que le procédé de séchage n'est pas un simple procédé continu dans lequel on peut contrôler toutes les mécanismes. (c) a l'avantage de nous montrer combien de temps chaque période de séchage nécessite.

La partie AB sur chaque courbe représente la phase d'échauffement du solide. La partie BC représente la phase d'évaporation à vitesse constante. Le point C où le débit de séchage commence à chuter est la teneur critique en eau. La partie CD représente la phase d'évaporation à vitesse décroissante et comme le montre (c) se caractérise par un changement continu de vitesse tout au long du cycle de séchage. Le point E représente le point sur lequel toutes les surfaces exposées deviennent complètement non saturée et marque le début de cette partie dans le cycle de séchage durant lequel le débit de l'écoulement de l'humidité interne influe sur la vitesse de séchage. La partie CE est définie comme la première phase d'évaporation à vitesse décroissante et la partie DE comme la seconde.

1. - Période d'évaporation à vitesse constante

Pendant cette période, l'écoulement du liquide à l'intérieur du solide est assez rapide pour maintenir une condition saturée à la surface, et la vitesse de séchage est contrôlée par le taux de chaleur transféré sur cette surface. Le procédé de séchage se produit par diffusion de la vapeur jusqu'à la surface saturée du matériau à travers une mince couche d'air environnante et au fur et à mesure que le débit de transfert de masse s'équilibre avec le transfert thermique, la température de la surface saturée reste constante. Si la chaleur fournie est exclusivement par convection, la température de la surface s'approche de la température d'ébullition, plutôt que celui du bulbe humide. Ce mode de séchage est typique des séchoirs de type indirect. Le rayonnement est un moyen efficace pour le transfert de la chaleur et au fur et à mesure qu'il augmente la vitesse d'évaporation constante par convection de la chaleur, la température à la surface augmente au-dessus de celle du bulbe humide. La période d'évaporation à vitesse constante dépend de trois paramètres consécutifs : le coefficient de transfert de masse ou de la chaleur, la surface moyenne exposée pendant le séchage et de la différence de température ou d'humidité entre la vapeur d'eau et la surface mouillée du solide. Ces paramètres sont des variables extérieurs. Le mécanisme d'écoulement du liquide d'imprégnation n'affecte pas la phase d'évaporation à vitesse constante.

2. - Période d'évaporation à vitesse décroissante

La phase d'évaporation à vitesse décroissante commence au point critique de teneur en eau quand la phase d'évaporation à vitesse constante se termine. Elle est répartie en deux zones distinctes : la zone non saturée de la surface séchée et la zone où est contrôlée l'écoulement intérieur. Dans la première zone, la surface d'évaporation totale ne peut plus être maintenue et devient saturée par l'écoulement de l'eau dans le solide. La vitesse de séchage diminue à partir de la partie non saturée ce qui conduit à ce que la vitesse d'évaporation sur la surface totale diminue. Généralement, la vitesse de séchage dépend des facteurs affectant la diffusion de l'eau jusqu'à la surface d'évaporation et du débit d'écoulement du liquide à l'intérieur du solide. Au fur et à mesure que le séchage avance, le point est atteint là où la surface d'évaporation devient non saturée. Le point d'évaporation se déplace à l'intérieur du solide et le procédé de séchage entre dans la seconde phase d'évaporation à vitesse décroissante. La vitesse de séchage est maintenant régie par le débit d'écoulement intérieur de l'eau et l'influence des paramètres extérieurs diminue. Cette période est très importante pour la détermination de la durée totale de séchage du solide à faible teneur en eau.

Table des matières

| | |
|---|------|
| Remerciements | i |
| SOMMAIRE..... | ii |
| LISTE DES NOTATIONS | iii |
| LISTE DES ABREVIATIONS | viii |
| LISTE DES FIGURES | ix |
| LISTE DES TABLEAUX..... | xi |
| LISTE DES PHOTOS | xii |
| INTRODUCTION | 1 |
| PARTIE I : BASES THÉORIQUES..... | 3 |
| <i>CHAPITRE I : GISEMENT SOLAIRE</i> | 4 |
| I.1 - L'énergie solaire..... | 4 |
| I.1.1 - Généralités..... | 4 |
| I.1.2 - Captation et utilisation [7]..... | 4 |
| I.1.3 - Mouvement de la terre autour du soleil [4] [8] [9]..... | 5 |
| I.2 - Systèmes de coordonnées [4] [6] [9] [10] | 5 |
| I.2.1 - Coordonnées géographiques | 6 |
| a. - Latitude | 6 |
| b. - Longitude..... | 6 |
| I.2.2 - Coordonnées horaires | 7 |
| a. - Déclinaison δ | 7 |
| b. - Calcul du temps | 7 |
| c. - Angle horaire ω | 8 |
| I.2.3 - Coordonnées azimutales..... | 9 |
| a. - La hauteur angulaire du soleil h | 9 |
| b. - Angle solaire azimut α | 10 |
| I.2.4 - Angle d'incidence θ | 11 |
| I.2.5 - Diagramme solaire | 12 |

| | |
|--|-----------|
| I.3 - Estimation du rayonnement solaire [4] [5] [7] [9] [10] [11] [12] [13]..... | 12 |
| I.3.1 - La radiation solaire extraterrestre..... | 13 |
| I.3.2 - Types de rayonnement | 14 |
| a. - Rayonnement direct | 14 |
| b. - Rayonnement diffus..... | 14 |
| c. - Rayonnement global | 14 |
| I.3.3 - Calcul du rayonnement global | 14 |
| a. - Rayonnement global sur une surface horizontale | 14 |
| b. - Rayonnement global sur une surface inclinée | 16 |
| c. - Rayonnement global journalier en moyenne mensuelle sur une surface inclinée | 18 |
| d. - Rayonnement global horaire sur une surface inclinée..... | 20 |
| CHAPITRE II : RAPPELS SUR LES TRANSFERTS THERMIQUES [14] [15].... | 21 |
| II.1 - Transfert de chaleur par conduction | 21 |
| II.1.1 - Définition | 21 |
| II.1.2 - Equation générale | 21 |
| II.2 - Transfert de chaleur par convection..... | 22 |
| II.2.1 - Définition | 22 |
| II.2.2 - Equation générale | 22 |
| II.3 - Transfert de chaleur par rayonnement | 23 |
| II.3.1 - Définition | 23 |
| II.3.2 - Lois fondamentales de rayonnement des sources noires | 23 |
| a. - Corps noir | 23 |
| b. - Loi de PLANCK..... | 24 |
| c. - Loi de Wien | 25 |
| d. - Loi de STEFAN-BOLTZMANN | 25 |
| II.3.3 - Rayonnement des corps opaques non noirs | 26 |
| a. - Facteur d'émission ou émissivité..... | 26 |
| II.3.4 - Réception du rayonnement par un solide..... | 26 |

| | |
|---|-----------|
| a. - Absorption du rayonnement par les matériaux | 27 |
| b. - Transmission du rayonnement par les matériaux | 27 |
| c. - Réflexion du rayonnement par les matériaux | 28 |
| II.3.5 - Propriétés des matériaux vis-à-vis du transfert de chaleur par rayonnement | 28 |
| a. - Loi de KIRCHHOFF | 28 |
| b. - Loi de BEER..... | 29 |
| c. - Propriétés radiatives des corps en tant qu'émetteurs..... | 30 |
| d. - Propriétés radiatives des corps en tant que récepteurs | 30 |
| II.3.6 - Equation générale | 31 |
| CHAPITRE III : GENERALITES SUR LE SECHAGE..... | 32 |
| III.1 - Définition..... | 32 |
| III.2 - Le séchage des produits agroalimentaires | 32 |
| III.3 - Paramètres influant le séchage [11] [12] [17] [19] [20] | 33 |
| III.3.1 - L'air humide | 33 |
| III.3.2 - Propriétés des corps humides | 33 |
| a. - Liaison d'eau | 33 |
| b. - Humidité absolue et humidité relative..... | 34 |
| III.3.3 - Activité de l'eau | 34 |
| III.3.4 - Isothermes de sorption..... | 35 |
| III.3.5 - Détermination de l'humidité des produits | 36 |
| a. - Mesures des pertes de poids obtenues par séchage | 36 |
| b. - Utilisation des isothermes de sorption..... | 36 |
| III.4 - Le séchage solaire [4] [11] [19]..... | 36 |
| III.4.1 - Types de séchoir | 37 |
| a. - Les systèmes de séchage d'énergie solaire actifs..... | 37 |
| b. - Les systèmes de séchage d'énergie solaire passifs | 39 |
| III.4.2 - Caractéristiques des capteurs solaires plans à air [1] [4] [7] [13] | 42 |
| a. - Composants d'un capteur | 42 |

| | |
|--|-----------|
| b. - Géométrie d'un capteur solaire à air | 43 |
| c. - Orientation et inclinaison d'un capteur [4] [21] | 43 |
| III.4.3 - Dimensionnement simplifié d'un séchoir solaire passif de type indirect [20] [22]..... | 44 |
| III.5 - Prétraitements des produits avant séchage [12] [18] | 45 |
| III.5.1 - Prétraitements physiques | 45 |
| a. - Lavage..... | 45 |
| b. - Triage..... | 45 |
| c. - Pelage..... | 45 |
| d. - Découpage | 46 |
| III.5.2 - Prétraitements chimiques..... | 46 |
| a. - Blanchiment | 46 |
| b. - Traitement par dioxyde de soufre | 47 |
| PARTIE II : REALISATION ET EXPERIMENTATION D'UN SECHOIR | |
| SOLAIRE | 48 |
| CHAPITRE I : CONCEPTION DU SECHOIR | 49 |
| I.1 - Sélection des matériaux pour le séchoir [23] | 49 |
| I.3 - Réalisation du séchoir solaire..... | 53 |
| I.3.1 - Réalisation du capteur | 53 |
| a. - Création du modèle | 54 |
| b. - Réalisation du modèle | 54 |
| I.3.2 - Réalisation de l'armoire de séchage..... | 57 |
| a. - Création du modèle | 57 |
| b. - Réalisation du modèle | 57 |
| I.3.3 - Finalisation du séchoir | 59 |
| CHAPITRE II : RESULTATS ET DISCUSSIONS | 61 |
| II.1 - Estimation des conditions optimales..... | 61 |
| II.1.1 - Diagramme solaire du lieu considéré..... | 61 |
| II.1.2 - Estimation du rayonnement solaire dans le lieu considéré | 65 |

| | |
|---|-----------|
| a. - Utilisation de données..... | 65 |
| b. - Estimation du gisement solaire..... | 66 |
| II.2 - Expérimentations | 74 |
| II.2.1 - Choix des fruits à sécher | 74 |
| II.2.2 - Description de l'expérience | 74 |
| a. - Expérimentation..... | 74 |
| b. - Appareils de mesures..... | 76 |
| c. - Problèmes rencontrés lors de l'expérimentation..... | 79 |
| II.3 - Résultats expérimentaux | 79 |
| II.3.1 - Cas de l'ananas | 81 |
| II.3.2 - Cas de la pomme..... | 82 |
| II.3.3 - Interprétation globale des résultats | 83 |
| II.4 - Etude économique..... | 84 |
| II.4.1 - Evaluation du prix de revient du séchoir | 84 |
| II.4.2 - Durée d'amortissement | 86 |
| CONCLUSION | 89 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 90 |
| ANNEXES | I |
| ANNEXE I : TABLE DES VALEURS DE $F_{0-\lambda T}$ | I |
| ANNEXES II : COURBES CARACTERISTIQUES DE SECHAGE [19] | II |
| 1. - Période d'évaporation à vitesse constante | III |
| 2. - Période d'évaporation à vitesse décroissante | III |
| Table des matières | IV |

AUTEUR : RANDRIANARY RADY Maneva
Nantenaina

ADRESSE MAIL : radymaneva@yahoo.com

TITRE : **SECHOIR SOLAIRE PASSIF DE TYPE
INDIRECT DESTINÉ AU SECHAGE DE FRUITS.**

NOMBRE DE PAGES : 91

NOMBRES DE TABLEAUX : 30

NOMBRES DE FIGURES : 41



RESUMÉ

La conservation des produits alimentaires abondants mais périssables comme les fruits nécessite l'utilisation d'une énergie adéquate et accessible pour réduire les pertes pendant les récoltes. Le procédé de séchage des fruits utilisant l'énergie solaire thermique est un moyen efficace pour leur conservation surtout dans les pays en voie de développement comme Madagascar. Notre pays est un producteur important de fruits et regorge d'un gisement solaire non négligeable, exploitable et accessible. Nous présentons dans ce mémoire les études sur un séchoir solaire passif de type indirect fabriqué à partir des matériaux locaux pour sécher les fruits. L'étape initiale de notre travail consiste à l'étude théorique du gisement solaire, des transferts thermiques et du séchage. Ensuite, nous avons réalisé un séchoir solaire à partir des connaissances sur les différents matériaux en accord avec l'étude théorique effectuée précédemment. L'étape finale regroupe les résultats obtenus lors de différents essais de séchage de deux types de fruits qui sont la pomme et l'ananas ainsi qu'une évaluation financière du séchoir. Le séchoir réalisé est opérationnel, mais nous devons faire des études plus approfondies pour mieux évaluer ses capacités techniques et économiques.

Mots-clés : Séchoir, Fruits, Rayonnement, Solaire, Séchage

ABSTRACT

The preservation of nourishing product which are abundant but perishable such as fruits required the use of suitable and available energy resource to reduce losses during harvests. Drying fruits with solar thermal energy is an efficient process for their preservations especially for developing countries like Madagascar. Our country is a huge fruit-producing country and has a significant amount of solar potential that is available and exploitable. In our researches, we present studies about a passive solar dryer of indirect type designed with local materials and used for drying fruits. The first step of our work concerns theoretical study about solar potential, heat transfers and drying. After that, we have designed a solar dryer according to our knowledge about materials and theoretical study made previously. The final step encompass different results obtained during various trials of drying of two kinds of fruits which are apple and pineapple followed by a financial estimation of the dryer. The dryer that we designed is operational but we need to investigate more for a better evaluation of its technical and economical capacity.

Keywords: Dryer, Fruits, Radiation, Solar, Drying

Directeur de mémoire : RAHELIARILALAO Bienvenue, Professeur Titulaire à l'ESPA